

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht – INDEX

### Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

### Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

## 1. Einleitung

### Aufgabenstellung

Die Firma Fronius entwickelt, fertigt und vertreibt bereits seit mehr als 20 Jahren Produkte im Bereich der Photovoltaik (PV) mit Fokus auf netzgekoppelten Wechselrichtern.

Für die Branche der Photovoltaik ist die Senkung der Systemkosten ein wesentliches Ziel. Dies ist notwendig, um eine Kostenstruktur zu erreichen, bei der Strom aus photovoltaischer Erzeugung mit Haushaltsstromtarifen konkurrieren kann. Dieser Zeitpunkt, der je nach Einstrahlungsverhältnissen und Stromkosten im jeweiligen Land unterschiedlich schnell erreicht wird, ist die so genannte Grid Parity. Diese stellt den nächsten entscheidenden Schritt im Wachstum dieser noch jungen Branche dar. Eine zentrale Einheit im PV-System ist der Wechselrichter. Da dieser aber nur einen geringen direkten Anteil an den Systemkosten hat, muss man auf Faktoren eingehen, welche in Summe die Kosten des Gesamtsystems senken. Hierzu ist es sinnvoll, die „Total Cost of Ownership“ heranzuziehen. Man kommt bei dieser Betrachtung auf zwei ganz wesentliche Stellhebel als Beitrag zur Kostensenkung: Die Gerätelebensdauer und der Gerätewirkungsgrad in Verbindung mit höchstmöglicher Flexibilität. Genau diese beiden Aspekte stellen daher auch die wesentlichen Merkmale für eine ganz neue Generation an Wechselrichter mit fundamental neuen Eigenschaften dar.

### Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt besteht aus den beiden Aspekten **Wirkungsgrad** und **Lebensdauer**, welche in enger Abstimmung auf konzeptioneller und methodischer Basis untersucht werden. Ziel ist, es einerseits sowohl Wissen, als auch Werkzeuge als Basis für zukünftige Entwicklungen aufzubauen und andererseits die Machbarkeit und Anwendbarkeit von grundlegenden Konzepten zu beweisen. Dies soll eine langfristige und umfassende Basis für kommende Entwicklungsprojekte und daraus folgende konkrete Produkte der Unternehmenssparte Solarelektronik bieten.

Das Ziel hinsichtlich der Effizienz war eine Halbierung der aktuellen Verlustleistung. Die theoretischen und umsetzungsrelevanten Aspekte dieses Konzepts sollten dabei analysiert werden. Ziel war es die technische Machbarkeit sowie die Umsetzbarkeit in großen Stückzahlen darzulegen. Dieses Ziel wird jeweils unter geforderten Rahmenbedingungen wie Eingangsspannungsfenster, Erdbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Kompaktheit betrachtet.

Der zweite wesentliche Stellhebel für die Systemkostenreduktion ist die Zuverlässigkeit von Wechselrichtern. Im Zuge unterschiedlicher Versuchsreihen wurden wesentliche theoretische Fragestellungen zu dieser Thematik geklärt. Auf Grund der extrem hohen Anforderung an die Gerätelebensdauer bei gleichzeitiger Forderung eines wartungsfreien Betriebs, ergibt sich eine sehr spezielle Herausforderung in Bezug auf Bauteile, Baugruppen und Geräte. Im Moment wird bei Photovoltaikanlagen aufgrund der langfristig angelegten Fördersituation (Deutschland 20 Jahre garantiert) auch eine dementsprechende Lebensdauer von den Komponenten erwartet. Da diese Werte aber bis heute in der Praxis kaum erreicht werden, ist es gängig, bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung von PV Anlagen auf 20 Jahre einen zweiten und zum Teil sogar einen dritten Wechselrichter einzurechnen.

Ziel des Projekts war es an dieser Stelle, Rechenmodelle für die Zuverlässigkeit von Geräten aufzustellen und anhand von Langzeittestreihen diese zu verifizieren.

#### Einordnung in das Programm

Erneuerbare Energien - 6. Photovoltaik / EE – Experimentelle Entwicklung

(EE genehmigt; IF – Industrielle Forschung eingereicht)

#### Verwendete Methoden /Aufbau der Arbeit

##### Projektteil Wirkungsgradsteigerung:

Zu Beginn des Projektes wurden die vollständigen Rahmenbedingungen für ein zukünftiges Leistungsteilkonzept aufgestellt. Die Größe des Eingangsspannungsfensters und die geforderte Erdbarkeit wurden dabei mit den am Markt verfügbaren Solarmodulen bzw. mit zum Teil noch nicht kommerziell verfügbaren Modultechnologien abgestimmt. Gemeinsam mit der internen Normungsabteilung wurden die normativen Voraussetzungen und im Speziellen die Vorgaben hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit definiert. Input dafür sind neben konkreten normativen Vorgaben Erfahrungen über Schwierigkeiten, die sich von einer generellen Konzeptüberlegung hin, zu einem konkreten Produkt ergeben. Im Zuge der grundlegenden Überlegungen wurde eine ausführliche Literaturstudie verbunden mit einer umfassenden Patentrecherche durchgeführt. Von Fachexperten aus den Bereichen Leistungselektronik sowie Regelungstechnik wurden auf dieser Basis konzeptionelle Ansätze erarbeitet. Dabei wurden Topologien sowohl ganzheitlich als auch in ihre Teilbereiche zerlegt betrachtet, um ein möglichst umfangreiches Gesamtbild zu erhalten.

Auf Basis der konzeptionellen Untersuchungen sollte eine erste Potentialanalyse die Möglichkeiten der einzelnen Ansätze klären. Hierzu wurden bereits die im Vorfeld erarbeiteten Rahmenbedingungen herangezogen. Wesentliche Bewertungskriterien an dieser Stelle sind das Potential aber auch die Realisierbarkeit der einzelnen Konzepte. Hierzu wurden Simulationsmodelle erstellt und untersucht. Die Simulation umfasste zum einen die hardwarenahe und regelungstechnische Simulation mit Matlab/Simulink sowie die Modellierung der magnetischen Komponenten (z.B. Trafo) mit Fluent und Comsol. Dabei konnte auf umfassendes internes Know-how in der Anwendung dieser Methoden und Softwarepakete zurückgegriffen werden.

Basierend auf den Ergebnissen wurden im Hinblick auf Topologien und deren Ansteuerungsverfahren die Methode Model-based Design in Matlab/Simulink weiter verbessert und deutlich aufgewertet. Abgrenzbare Teilprojekte wurden durch einen Master-Studenten der TU-Wien / Elektrotechnik im Sommer abgearbeitet. Der Themenschwerpunkt Induktivitäten wurde durch Vergabe einer Masterarbeit, welche später in eine Dissertation übergeführt wird auf ein solides wissenschaftliches Fundament gesetzt. Bezüglich automatisierbare Fertigungsmethoden wurden die internen Bereiche Elektronikproduktion und Fertigungstechnik miteinander „gekoppelt“. Hardwarebasierende Funktionsnachweise wurden mittels Rapid-Control-Prototyping-Methoden erbracht. Das dafür notwendige Wissen wird für zukünftige Vorentwicklungsprojekte die Basis bilden. Zum Themenschwerpunkt neue Halbleitermaterialien und deren Einsatzfähigkeit (technische Performance und Lieferantenbewertung) wurde eine Auditreise durchgeführt. Diverse Lieferanten waren in unserem Hause vorstellig.

Aufbauend auf diese Untersuchungen wurden die AC- und DC-Stufe mit Hilfe einer Schaltentlastung optimiert. Dadurch wurde zur weiteren Erhöhung des Wirkungsgrades auf ein transformatorloses Konzept gewechselt. Die technische Machbarkeit hinsichtlich der elektrischen Funktion wurde geklärt und praxisrelevante Themen, wie die Verlustleistungsabführung und die EMV-Tauglichkeit geprüft. Daneben gibt es noch eine wissenschaftliche Untersuchung zu magnetisch vorgespannten Drosseln mit Dauermagneten (NdFeB) an der TU-Wien.

#### Projektteil Lebensdauer:

Im Zuge des Projektes wurden Lösungsansätze zur Überprüfung und Verbesserung der Lebensdauer von Wechselrichtern erarbeitet. Bevor konkrete Maßnahmen und Möglichkeiten untersucht wurden, war eine umfangreiche Anforderungsanalyse notwendig. Diese wurde im Kontext der speziellen Anforderungen an Photovoltaikwechselrichter durchgeführt und sollte zeigen, wo genau die Stärken und Schwächen der jetzigen Verfahren liegen. Umfangreiche Studien sollten klären, welche theoretischen Ansätze zur Verbesserung der Bestimmung der Lebensdauer von Wechselrichtern beitragen können, und wo die Grenzen derartiger Systeme liegen. Dabei wurde auf Erfahrungen und Anwendungsbeispiele aus verwandten, jedoch bereits „reiferen“ Branchen zurückgegriffen. Durch einen intensiven Austausch mit unseren Lieferanten wurde zusätzliches Wissen eingebracht. Auf Basis der Untersuchungen wurden im Zuge einer detaillierten Bewertung konkrete Verfahren für den Einsatz bei Fronius definiert. Dabei wurde auch eine Kosten-Nutzen-Analyse der einzelnen Verfahren durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit abschätzen zu können. Die gewählten Verfahren wurden in einem weiteren Schritt durch reale Testreihen verifiziert. Dabei wurden reale Tests theoretischen Berechnungen gegenübergestellt. Dies war notwendig, um zum einen die Leistungsfähigkeit der Systeme zu untersuchen und zum anderen die Grenzwerte der einzelnen Berechnungsverfahren zu definieren. In diesem Zuge wurden auch Testprozeduren festgelegt, die auch zukünftig die Richtigkeit der eingesetzten Berechnungsmethoden sicherstellen sollen.

Um dieses Wissen auch langfristig sicherstellen zu können, wurde als Teil des Projektes eine eigene Abteilung, welche sich ausschließlich dem Thema Zuverlässigkeit und Lebensdauerberechnung widmet, aufgebaut.

Des Weiteren wurden dominierende Schädigungsmechanismen in mathematischen Modellen, sog. Schädigungsmodellen beschrieben. Die Recherche von Literatur- und Lieferantendaten zeigte, dass bei vielen Elektronikkomponenten nur eine Quantifizierung der streuungsbedingten Spontanausfälle unter Annahme einer über die Zeit konstanten Ausfallrate vorliegt. Die Anforderungen für einen Grid Parity Wechselrichter ist eine geringe Ausfallrate bis zum Erreichen der Ziellebensdauer von

20 Jahren. Neben den Spontanausfällen führen Schädigungsmechanismen zu Ausfällen, welche keine konstante Ausfallrate aufweisen. Die Erforschung der Schädigungsmodelle zeigte auf, welche Einflüsse schädigend wirken. Dies führte zur genaueren Erfassung der Einsatzbedingungen.

Nach der Entwicklung einzelner Schädigungsmodelle wurden die Lebensdauermodelle durch Versuchsergebnisse validiert. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Schädigungsmodelle ist die Auswertung der Ausfälle. Da Fronius bereits seit über 20 Jahren Solarwechselrichter baut, und die Ausfälle während des Reparaturprozesses analysiert werden, wurden diese Daten zuerst herangezogen. Es zeigte sich, dass die Ausfälle zwar teilweise auf eine einzelne Komponenten-Schadensart Kombination eingegrenzt werden konnte, zur Erforschung eines Schädigungsmodelles fehlten aber wichtige Parameter, wie Laufzeit und Belastungsbedingungen. Dazu müssten auf jedem Print des Gerätes ein Betriebsstundenzähler und ein Datenlogger vorhanden sein, welcher die Umgebungs- und Belastungszustände aufzeichnet. Dem war bislang aber nicht so.

Die Laufzeit bis zum Ausfall konnte jedoch grob geschätzt werden, da die Sonnenstunden über ein Jahr gemittelt kaum variieren. Anders sieht es bei den Umgebungstemperaturen und der Belastung aus, welche sich je nach Anlage stark unterscheiden können. Diese Informationslücke macht die Validierung eines Schädigungsmodelles anhand der Reparaturstatistik derzeit noch zu ungenau. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass in der Vergangenheit kritisch eingeschätzte Komponenten und Schadarten bisher sehr geringe Ausfallraten zeigen. So zum Beispiel Elektrolytkondensatoren, welche auch nach über 10 Jahren im Betrieb keine erhöhten Ausfallraten zeigen.

## 2. Inhaltliche Darstellung

AP	Bezeichnung	Dauer (Mon.)	Beginn	Ende
1	Recherche	4	01.01.2010	30.04.2010
2	Erarbeitung und Bewertung von möglichen Konzepten	12	01.05.2010	30.04.2011
3	Detaillierung von ausgewählten Konzepten	8	01.05.2011	31.12.2011
4	Absichern der techn. Machbarkeit und Optimierung	12	01.01.2012	31.12.2012

**Tabelle 1 Arbeitspakete und Zeitplan**

### **Arbeitspaket 1:**

#### Recherche der technischen Rahmenbedingungen

Wesentlicher Bestandteil und Grundlage war die detaillierte Ausarbeitung der Normenlandschaft und der regional geltenden Netzanschlussbedingungen. Diese dienten als Basis für eine spätere Bewertung der Konzepte. In Abstimmung mit regionalen Testinstituten wurde eine detaillierte Analyse für alle relevanten Märkte durchgeführt. Daraus wurde eine Liste mit Netzformen, relevanten Normen und länderspezifischen Netzanschlussbedingungen erstellt. Diese ist durch ihren Umfang zukunftssicher gestaltet und auch für zukünftige potentielle Märkte anwendbar und dient nun als Basis für alle weiteren Arbeiten im Projekt.

#### Recherche der Systemaspekte

Neben der Auflistung der geltenden Normen und Anschlussbedingungen wurden auch die technischen Anforderungen an Geräte unterschiedlicher Leistungsklassen erhoben. Diese Erhebung wurde in enger Abstimmung mit Kunden und Installateuren weltweit durchgeführt.

Mit dieser Auflistung wurde versucht, alle gängigen und für Fronius relevanten Geräteklassen hinsichtlich ihrer notwendigen DC- und AC seitigen Anforderung hin, zu beschreiben.

#### Einflussfaktoren auf erreichbare Lebensdauer

##### Einsatzbedingungen

Ein wesentlicher Punkt zum Nachweis der Zuverlässigkeit ist die Erfassung der schädigenden Einflüsse im Betrieb. Es gilt festzustellen, welche Umgebungsbedingungen auf den Wechselrichter einwirken und welches Lastkollektiv sich durch den Anlagenbetrieb ergibt. Dazu wurden Daten von unterschiedlichsten Anlagen weltweit gesammelt. Die Klassierung der Daten ermöglichte einen relativen Vergleich unterschiedlicher Systeme und Standorte und ergab die Basis für die Zuverlässigkeitstests (Abbildung 22).

##### Schädigungsmodelle

Um die Wirkung der schädigenden Betriebsbedingung zu quantifizieren, wurden sogenannte Schädigungsmodelle erstellt. Dabei wurde der Einfluss der Schädigungsphysik auf die Lebensdauer mathematisch beschrieben. Die Schädigungsmodelle stützten sich auf Literatur, Ergebnisse von Zulieferern und eigenen Versuchsergebnissen. So wurde z.B. in der Literatur die Ursache für den Bruch von Bonddrähten als thermomechanische Ermüdung beschrieben. Grundlage für das Schädigungsmodell war daher die Beschreibung der ertragbaren Dehnungszyklen als Funktion der relativen Dehnung. Die Dehnung konnte wiederum als Funktion der Bauteiltemperatur beschrieben werden.

##### Lebensdauertests

Für die kritischen Komponenten wurden Lebensdauertests durchgeführt. Einzelne Tests konnten dabei auf Platinen- oder Geräteebeane zur Absicherung unterschiedlicher Bauteile verwendet werden. Die Überlastung kritischer Komponenten zur Beschleunigung der Lebensdauertests im Geräteverband kann zur Zerstörung anderer weniger kritischer Komponenten führen. Daher wurden sehr komponentenspezifische Schadarten mit Komponententests abgesichert. Die aus den Schädigungsmodellen errechneten Beschleunigungsfaktoren ermöglichten es in wenigen Monaten die geforderten hohen Lebensdauerziele nachzuweisen.

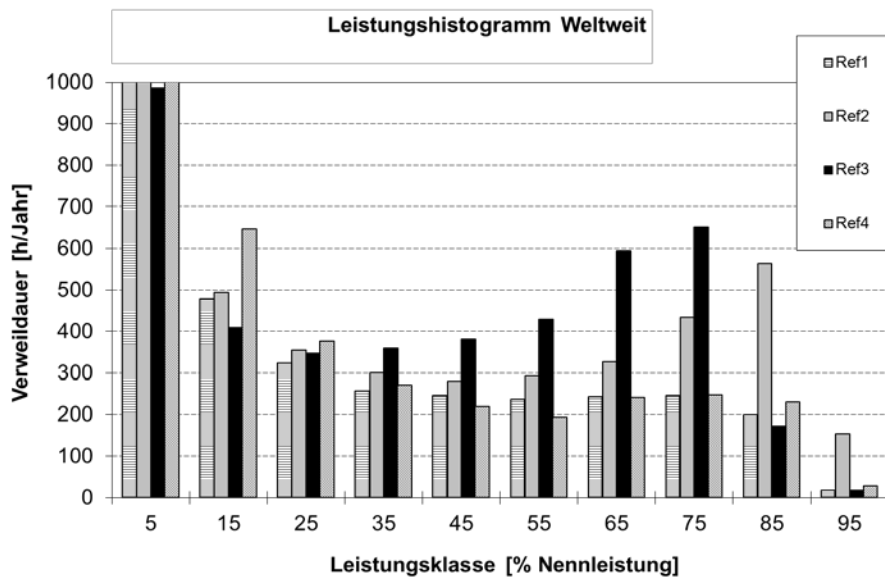
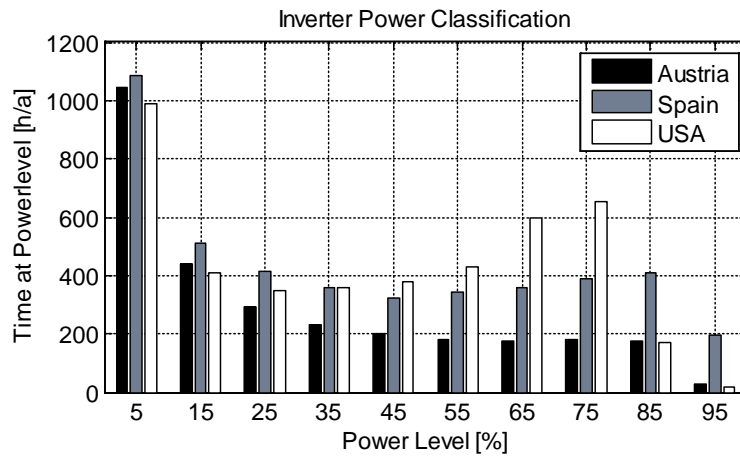


Abbildung 1: Leistungsklassen in verschiedenen Klimazonen

### Topologien und Ansteuerverfahren:

Die Recherchephase wurde in drei voneinander bedingt abhängige Arbeitspakete unterteilt:

1. Topologien und deren Ansteuerverfahren
2. Neuartige Materialien (z.B.: Halbleiter, Induktivitäten) und
3. Modell-basierte Entwicklung und geeignete Hardwareplattformen für Rapid-Control-Prototyping (RCP)

Als Ergebnis dieser Phase wurden folgende Charakterisierungsvorhaben abgeleitet:

1. konventionelle B6-Topologie mit SiC-JFETs (aus deren Vorentwicklung)
2. 3-Level-NPC Konzept mit unterschiedlichen Ansteuerverfahren (unipolar, bipolar, Raumzeigerregelungen) und Halbleiterkonfigurationen (Si-IGBTs, Si-MOSFETS,...)

### 3. Schaltentlastete Topologie mit bidirektionalen Hilfsschaltern (mit Si- und SiC-Schaltern)

Bereits patentierte Topologien und Ansteuerverfahren waren NICHT Gegenstand unserer Untersuchungen.

Als sehr zeitaufwändig stellte sich zu Beginn die Wechselrichtermodellierung mit Matlab/Simulink heraus. Die Früchte der modell-basierten Entwicklung wurden gegen Ende dieses Projekts geerntet!



**Abbildung 2: Evaluationsboard von Spectrum Digital**

Begonnen wurde RCP mit der D1103-Umgebung von dSPACE. Da die Grenzen der dieses Systems schnell erreicht wurden, erfolgte der Umstieg auf das Board von Spectrum Digital (Abbildung 23) bereits im ersten Projektjahr. Ebenso wurden diverse Spezialschulungen zu den Themen Stateflow und Code Generation bei Mathworks von unseren Projektmitarbeitern im Jahre 2010 besucht.

#### **Arbeitspaket 2:**

In AP2 stand die Erarbeitung und Bewertung von möglichen Wechselrichterkonzepten an. Dies wurde mittels Berechnungen und Simulationen durchgeführt. Das Vertraut-werden mit den neuartigen SiC-Transistoren in der Applikation, und der Aufbau einer RCP-Vorentwicklungsumgebung, welche als Plattform für die nächsten Jahre gemäß unseren steigenden Anforderungen einfach adaptier- und erweiterbar ist, waren die AP-Inhalte.

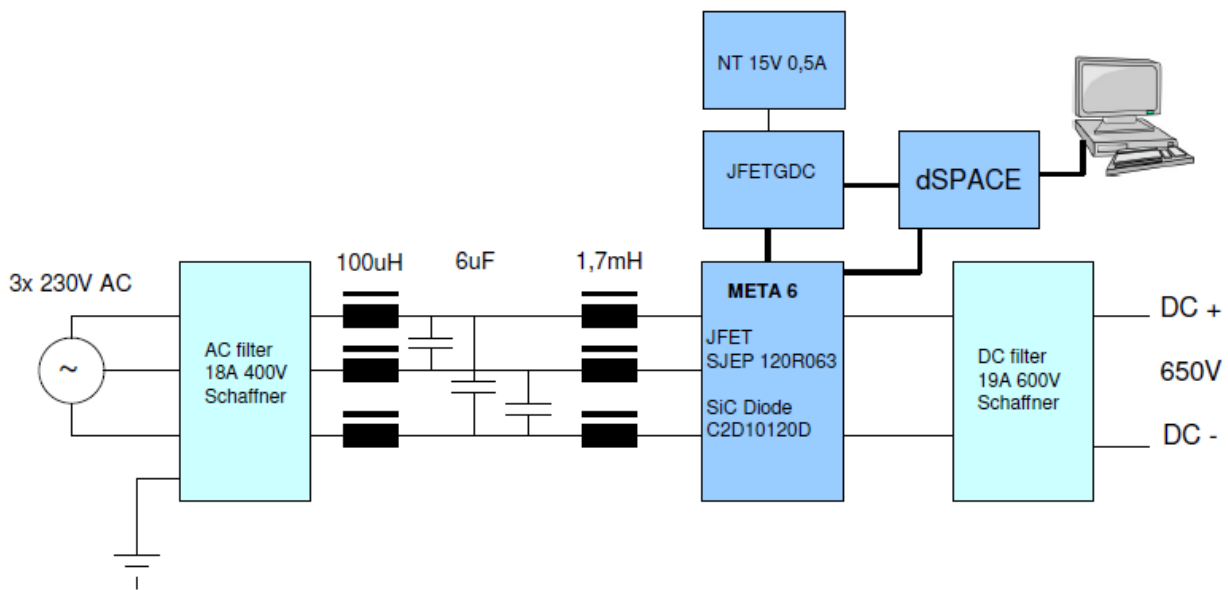


Abbildung 3: Blockschaltbild des SiC-Wechselrichter

Das Blockschaltbild des SiC-basierten Wechselrichters zeigt Abbildung 24. Das PV-Feld wird durch eine Stromquelle nachgebildet. Das Leistungsteil, welches sehr vereinfacht in Abbildung 25 dargestellt ist, ist auf dem Print META6 realisiert. Die Treiberschaltung für die SiC-JFETs befindet auf den Prints JFETGDC. Die Regelung und Steuerung ist mittels Matlab/Simulink realisiert und arbeitet in Echtzeit über das dSPACE-Board DS1103. Als Regelungsverfahren wird die SVPWM verwendet.

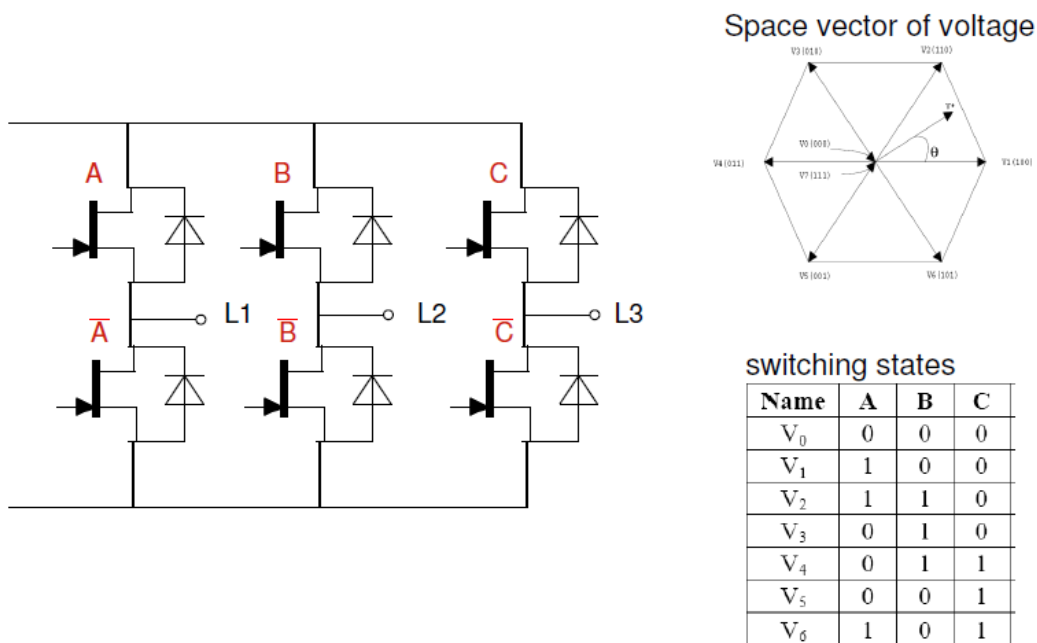
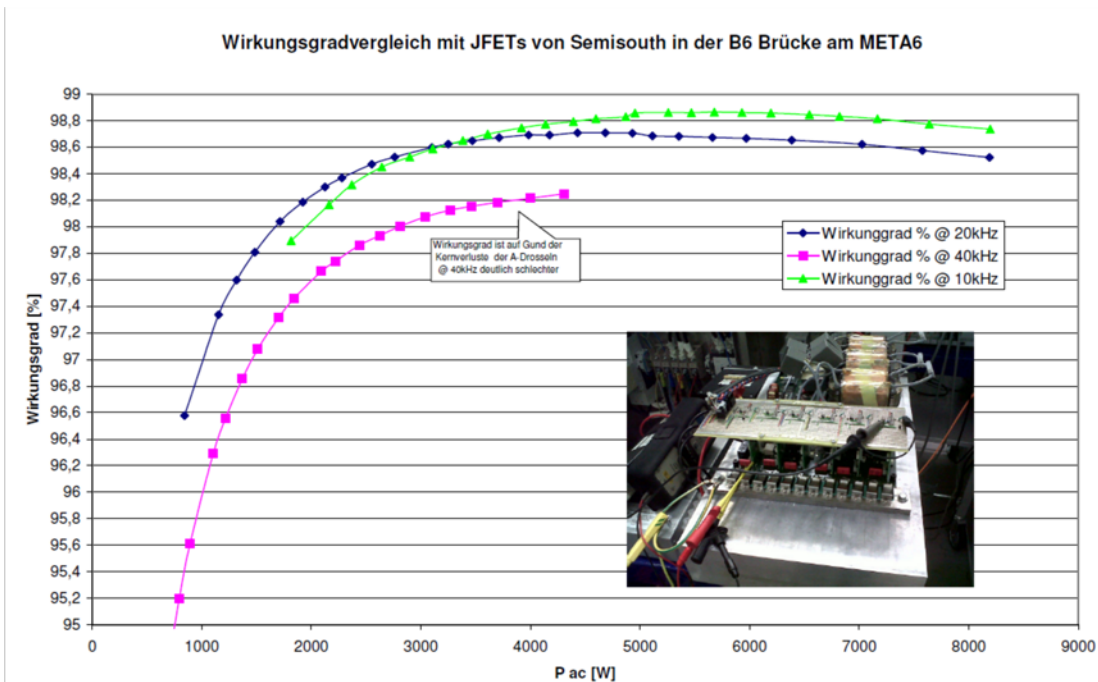


Abbildung 4: Schaltbild und Ansteuerverfahren der B6-Brücke





**Abbildung 5: Wirkungsgradvergleich in Abhängigkeit der Schaltfrequenz und Foto des Prototypenaufbaus**

Durch die Verwendung von SiC-Transistoren konnte eine Wirkungsgradsteigerung von mehr als 1,5 % gegenüber Si-Transistoren erreicht werden. Dargestellt in Abbildung 26 ist der durchgeführte Wirkungsgradvergleich für unterschiedliche Schaltfrequenzen (hier 10 kHz, 20 kHz und 40 kHz).

Als zweite vielversprechende Topologie wurde die 3-Level NPC (neutral-point diode clamped converter) untersucht. Hierzu wurden folgende Varianten aufgebaut und auch charakterisiert:

- Alle Schalter sind Si-IGBTs (75 A)
- Alle Schalter sind Si-CoolMOS (45 mOhm)
- Parallelschaltung von IGBT und CoolMOS (45 A-IGBT und 99-mOhm-CoolMOS)

Um auch eine Aussage über die Leistungsfähigkeit verschiedener Pulsmuster in Hinblick auf den Wirkungsgrad tätigen zu können wurden auch noch folgende Taktungsvarianten untersucht:

- Unipolare Taktung
- Bipolare Taktung
- 50 Hz – Chopping

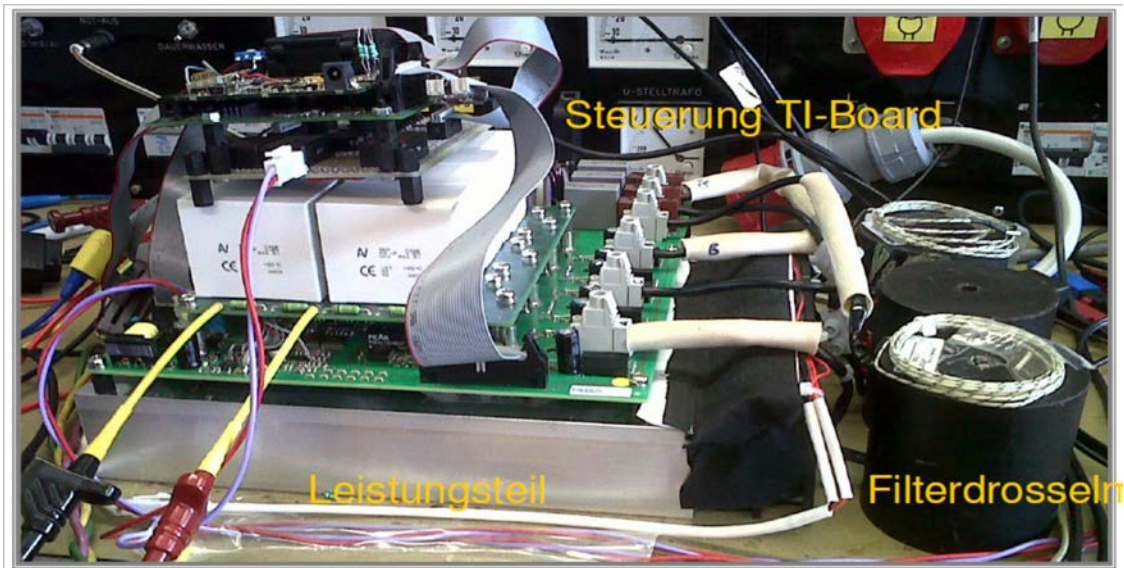


Abbildung 6: Prototyp 3-Level-NPC

Weitere Prototypen für die Charakterisierung von SiC-Transistoren namhafter Hersteller wurden entwickelt (Abbildung 27 und Abbildung 28). Über mehrere Monate wurden die Transistoren und Dioden der unterschiedlichen Hersteller vermessen und miteinander verglichen. Die Berichterstattung über die Messergebnisse erfolgte mit Messprotokollen und/oder Präsentationen. Ein Audittermin mit dem Schwerpunkt auf SiC-Halbleiterbauelemente wurde im Herbst 2011 durchgeführt.

Parallel dazu erfolgte auch die Untersuchung, Optimierung und Messung der AC-Induktivitäten, wobei unterschiedliche Kernmaterialien, wie z.B. Eisenpulver-, amorphe oder Megaflex Pulverkerne miteinander verglichen wurden.

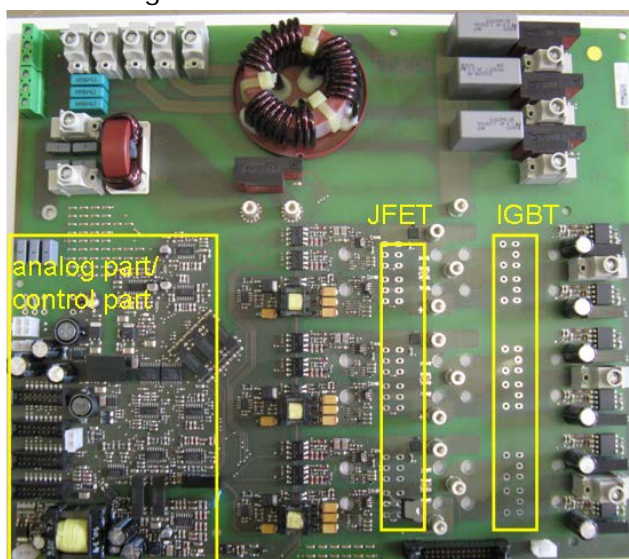


Abbildung 7 Prototyp zur Charakterisierung von SiC-Schaltern

### Stand der Technik in der Zuverlässigkeits-Methodik

Bei der Recherche von Methodiken zur Sicherstellung einer möglichst geringen Ausfallrate wurde festgestellt, dass bisher im Bereich der Elektronik kaum zwischen Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit unterschieden wird. Entwicklungsbegleitende Methoden sowie Verfahren zur statistischen Versuchsplanung gehen bei elektronischen Komponenten und Produkten von einer konstanten Ausfallrate aus. Dies ist u.a. im komplexen Aufbau von modernen Schaltungen begründet. Streuungsbedingte Spontanausfälle welche in allen der verbauten Komponenten vorkommen können, bewirken eine über die Betriebsdauer konstante Ausfallrate. Des Weiteren ist der Lebenszyklus der meisten Elektronik-Komponenten vergleichsweise kurz, weshalb alterungsbedingte Ausfallmechanismen kaum erforscht sind.

Erst seit wenigen Jahren gibt es umfangreiche Forschungsarbeiten welche sich mit dem Thema Dauerhaltbarkeit von elektronischen Komponenten befassen. Die Zielsetzung von Grid Parity Wechselrichter erforderte die Optimierung von beiden Parametern, Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit.

Eine entwicklungsbegleitende Abschätzung der Zuverlässigkeit durch in der Elektronik gängige Vorhersagemethoden ist im Bereich der Solarelektronik nicht zielführend. Die Berechnungsmodelle stützen sich auf tabellierte Ausfallzahlen für Bauteilgruppen, welche mit Faktoren für Temperatur und Überdimensionierung skaliert werden können. Da bei Solar-Wechselrichtern speziell entwickelte Bauteile zur Anwendung kommen, bzw. Standardbauteile in Solar Wechselrichtern eine sehr individuelle Belastung erfahren, sind die Literaturwerte nicht aussagekräftig.

Da wie bereits erwähnt die Ausfallrate in der Elektronik meist konstant angenommen wird, konzentrieren sich Lebensdauertests meist auf den Nachweis der Zuverlässigkeit. Um die Dauerhaltbarkeit für 20 Jahre in vertretbarer Zeit zu überprüfen, ist das Verständnis der Schädigungsmechanismen erforderlich, was ebenfalls Ziel des Projektes war.

### Zuverlässigkeit

Da ein Wechselrichter aus etwa 1000 Elektronikbauteilen zusammengesetzt ist, muss die Zuverlässigkeit der einzelnen Bauteile um mehrere Größenordnungen besser sein, als das Zuverlässigkeitsziel des Wechselrichters. Um die Zuverlässigkeit bereits in der Entwurfsphase abzuschätzen, sind Ausfallraten der verschiedenen Bauteiltypen nötig. Berücksichtigt man die Abhängigkeiten (Serienschaltung oder redundanter Aufbau) so kann man aus Bauteil-Ausfallraten auf die System-Ausfallrate des Wechselrichters schließen. Herstellerangaben bergen, wie bereits erwähnt, sehr hohe Unsicherheiten. Fronius hat jedoch die Möglichkeit Reparaturdaten der verkauften Produkte statistisch auszuwerten. Die daraus gewonnenen Ausfallzahlen ergaben, verglichen mit der Anzahl der installierten Wechselrichter, die Ausfallrate, welche wesentlich aussagekräftiger als Literatur- oder Herstellerangaben ist.

Ein Vergleich der FIT<sup>1</sup>-Raten aus den Herstellerangaben mit den tatsächlichen Reparaturdaten zeigte, dass die FIT-Raten einen guten Anhalts Wert für die Ausfallswahrscheinlichkeit geben.

---

<sup>1</sup> FIT: Failures in Time = Ausfälle pro 10<sup>9</sup> Bauteilstunden  
3. AS NE 2020 Endbericht

**Tabelle 2: FIT Raten einzelner Bauteile**

Bauteil	Hersteller Angaben	Tatsächliche Fehlerrate
	FIT	FIT
Stromwandler	1000	600
SMD Widerstand	1	0

Tabelle 3 zeigt, dass Bauteile mit hoher spezifizierter Ausfallrate (FIT) tatsächlich häufiger ausfallen.

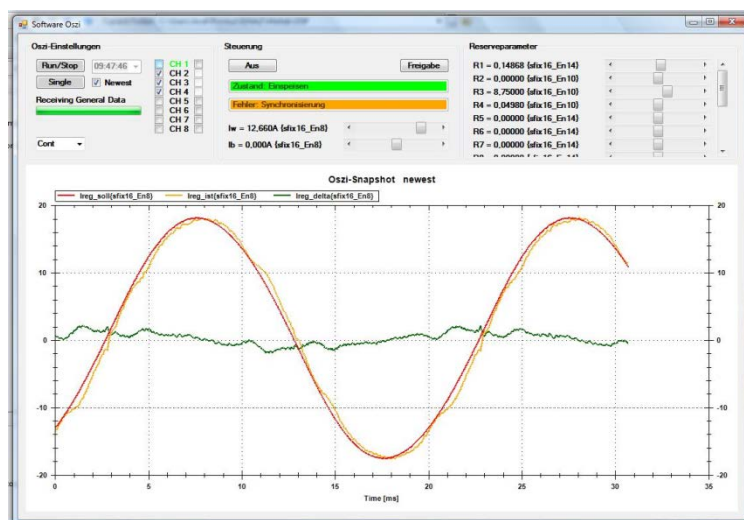
Ausfallsmechanismen

Schon in der Konzeptphase eines Produktentwicklungsprojekts wird für jede geplante Komponente die Belastung im Einsatz und die daraus resultierende Schädigung abgeschätzt. Nachdem ein Entwurf feststeht wird das System in seine Komponenten und deren Ausfallursachen aufgeteilt. Dies unterscheidet sich von einer FMEA dahingehend, dass nur lebensdauerrelevante Schadarten betrachtet werden. Alterungsbedingte Schädigungsmechanismen werden in Lebensdauertests auf Komponenten- Baugruppen und Systemebene erprobt.

**Arbeitspaket 3 und Arbeitspaket 4:**

Schwerpunkt Simulation & Rapid Control Prototyping:

Ziel von AP3 war die Verfeinerung der Simulationsmodelle in Matlab/Simulink und die Entwicklung eines SW-Tools, das einfach in Simulink eingebunden werden kann, das sogenannte Software-Oszilloskop. Dieses erlaubt für die Inbetriebnahme des Prototyps eine optimale Visualisierung der internen DSP-Variablen. Per serieller Schnittstelle erfolgt die die Datenübertragung vom TI-DSP zum PC. Die Oberfläche wurde in C# erstellt. Die in Abbildung 29 dargestellte Visualisierung kann auf die Reglerparameter, die Sollgrößen,... „on-the-fly“ eingreifen.



**Abbildung 8 Software-Oszilloskop zur Darstellung der internen Regelungsgrößen**

### Schwerpunkt Topologieuntersuchung:

Nach erfolgreicher Simulation erfolgte die hardwaretechnische Umsetzung, wie Abbildung 30 zeigt. Absolute Priorität für diese Umsetzung wurde in die kompakte Bauweise und in den möglichst hohen SMD-Bestückungsanteil gelegt. Um das Volumen und Gewicht weiter zu reduzieren wurde die Schaltfrequenz auf 70 kHz gesteigert. Durch die aktive Schallentlastung konnten erste vielversprechende Wirkungsgradmessungen durchgeführt werden

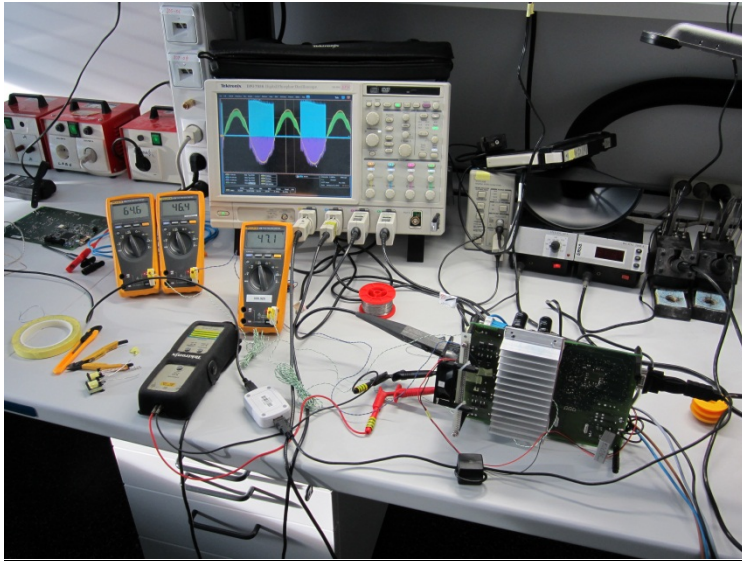


Abbildung 9 Schallentlasteter 1 ~ Wechselrichterprototyp (3 kW Einspeiseleistung ins 230V-Netz)

### **Teilprojekt Lebensdauertests**

Für die kritischen Komponenten wurden Lebensdauertests durchgeführt. Einzelne Tests konnten dabei auf Platinen- oder Geräteebene zur Absicherung unterschiedlicher Bauteile verwendet werden. Die aus den Schädigungsmodellen errechneten Beschleunigungsfaktoren zeigten, dass es möglich ist, das Lebensdauerziel von 20 Jahren in wenigen Monaten nachzuweisen.

#### Schädigungsrechnung anhand eines Beispiels:

##### **- Ermüdungsrisse an Lötstellen der Leiterplatten**

Der betrachtete Schadensmechanismus wird durch Temperaturzyklen angetrieben. Hierbei werden nur Bauteile bzw. Schaltungen betrachtet, deren Temperatur mit der Umgebungstemperatur korreliert.

#### Einsatzbedingungen:

Zur Beschreibung des Lastkollektivs müssen die Schwankungen der Umgebungstemperatur in Anzahl und Amplitude quantifiziert werden. Dafür wird das Temperatursignal einer Referenzanlage durch einen Rainflow-Algorithmus gefiltert und die Temperaturzyklen klassiert (Abbildung 31). Man erkennt, dass nur ein geringer Anteil der Zyklen eine Amplitude von über 20 K aufweist. Als



Lastkollektiv wird eine Anzahl von 150 Zyklen pro Jahr mit einer Amplitude von 30 K angenommen (stark aufgerundet).

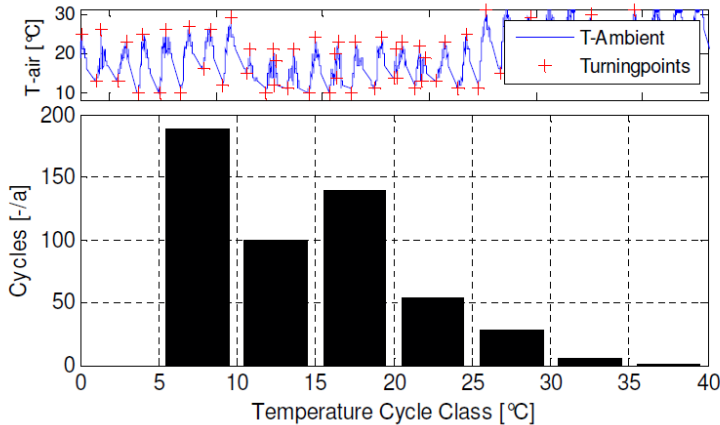


Abbildung 10: Temperaturzyklen einer Referenzanlage

#### Schädigungsrechnung:

Der Schadensmechanismus bei Lötstellen ist das Wachsen von Ermüdungsrissen aufgrund von Dehnungszyklen. Die Dehnungszyklen sind wiederum durch Temperaturzyklen verursacht. Dieser Vorgang wird in der Literatur durch das Coffin-Manson-Modell [1] beschrieben, welches besagt, dass die Schädigungsgeschwindigkeit exponentiell mit der Amplitude der Dehnungs- respektive Temperaturzyklen steigt.

$$AF = \left( \frac{\Delta T_{TEST}}{\Delta T_{FIELD}} \right)^C$$

AF ... Beschleunigungsfaktor

$\Delta T$  ... Temperatur Amplitude

C ... Material Exponent

Für die betrachteten Werkstoffe ist der Exponent  $C=3$ .

- Lebensdauertest

Da Temperaturzyklen den dominierenden Einfluss auf den Schädigungsmechanismus haben, wird diese auch im Lebensdauertest simuliert, wobei die Amplitude möglichst hoch zu wählen ist, um den Test möglichst stark zu beschleunigen.

In der Praxis werden also bestückte Leiterplatten in einem Klimaschrank Temperaturzyklen von -25 bis + 65 °C ausgesetzt. Daraus ergibt sich ein Beschleunigungsfaktor von 27.

$$AF = \left( \frac{90}{30} \right)^3 = 27$$

Um die Belastung durch die Zyklen der Umgebungstemperatur über 20 Jahre abzutesten, reichen beim beschriebenen Testprogramm (90 K Temperaturunterschied) also 111 Zyklen Testzeit aus.

#### **4. Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Mit einer auf minimale Verluste optimierten schaltentlasteten DC/AC-Topologie unter Verwendung von „konventionellen“ Si-Halbleitern (z.B.: MOSFETs) kann beinahe derselbe hohe Wirkungsgrad erreicht werden, wie bei Verwendung von SiC-Halbleiterschaltern in einer nicht entlasteten Topologie. In Punkto Zuverlässigkeit und Kosten spricht zur Zeit ebenso noch alles für den Einsatz von Si-Halbleiterschalter neuester Generation - dies zeigte auch die durchgeführte USA-Auditreise.

Die bisherigen Ergebnisse der Lebensdauertests haben gezeigt, dass auch bei hohen Stichprobenumfängen eine sehr lange Testdauer erforderlich ist um Ergebnisse also Ausfälle zu finden. Sofern sich die Schädigung als Messgröße quantifizieren lässt, können Schädigungsmodelle sehr gut validiert werden.

Ein validiertes Schädigungsmodell ist die Voraussetzung um die Lebensdaueranforderungen experimentell nachzuweisen. Die Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit des Systems entscheidet sich jedoch in der Entwurfsphase. Es hat sich gezeigt, dass die Erforschung der Schädigungsphysik bereits in den frühen Entwicklungsphasen das Bewusstsein auf die Robustheit lenkt. Das Verständnis der Schädigungstreiber (Temperatur, Spannung, etc.) führt zu Systemen, welche über ausreichend Robustheits-Marge verfügen. Die Robustheit wird durch Lebensdauertests auf Bauteil-, Platinen- und Systemebene nachgewiesen. Dadurch ist auch bei leicht geänderten Gerätevarianten eine Aussage zur Dauerhaltbarkeit möglich.

Um die Parameter Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit weiter zu optimieren, müssen in Zukunft noch wichtige Aufgaben gelöst werden. So wird etwa bei jeder kritischen Komponenten-Schadart-Kombination bei der Entwicklung eines Lebensdauermodelles versucht, eine messbare Größe zu finden, mit welcher sich der Fortschritt der Schädigung quantifizieren lässt. Dadurch müssen Tests nicht mehr bis zum Ausfall mehrerer Versuchsträger geführt werden.

Auch wenn große Anstrengungen unternommen wurden, ist nicht auszuschließen, dass es im Kundenbetrieb zu Ausfällen kommt. Im Zuge des Reparaturprozesses wird neben der raschen Behebung des Ausfalls beim Kunden dafür gesorgt, dass die Ausfallsursache untersucht wird. Da bei zukünftigen Geräten auf jeder Platine ein Datenlogger, ähnlich einer Black-Box im Flugzeug, installiert ist, lassen sich zu jedem Ausfall wichtige Parameter wie die Laufzeit, Temperatur, Spannungsprofil etc. dokumentieren. Diese Daten werden zur weiteren Verfeinerung der Schädigungsmodelle herangezogen.

Einen wesentlichen Anteil hat auch das Verankern der Erfahrungen hinsichtlich Lebensdauer in die Prozesskette. In enger Zusammenarbeit mit dem Qualitätsmanagement werden die Abläufe und internen Tools untersucht, um die idealen Eingriffspunkte zu definieren. Hierzu wurde bereits jetzt eine Anpassungsprogrammierung unserer Fronius internen Bauteil- und

Funktionsgruppenverwaltung beauftragt, um dort die FIT Rate bzw. weiterführende Qualitätsmerkmale mit zu verankern.

Des Weiteren stehen Anwendungstests mit sich in Entwicklung befindlichen Geräten an. Geplant ist, die finale Bauteilerauswahl bereits mit der erarbeiteten Datenbasis und Rechenmodellen zu machen.

## 5. Ausblick und Empfehlungen

### @ Topologien, neuartige Halbleitermaterialien & neue Entwicklungsmethoden

Schaltentlastung gilt als Schlüssel für den Erfolg von kompakten und sehr effizienten Wechselrichtern. Die Schaltentlastung ermöglicht hierbei die Schaltfrequenz von Si-basierten PV-Wechselrichtern unter Beibehaltung des hohen Wirkungsgrades deutlich hinaufzusetzen (Faktor 3!), ohne dabei die (noch) sehr teuren SiC-Transistoren verwenden zu müssen, deren Langzeitstabilität in Photovoltaik-Wechselrichtern noch nicht nachgewiesen werden konnte. Neben der Schaltentlastung wird die ganzheitliche Herangehensweise in der Produktentwicklung für alle Geräte als Schlüssel des Erfolges gesehen, da die Disziplinen Leistungselektronik und Konstruktion/Fertigung, Regelung-/Steuerung miteinander aufs Stärkste durch die Entwärmung, das Gehäusekonzept und die EMV gekoppelt sind. Modellbasierte Entwicklung mit Werkzeugen, wie etwa Matlab/Simulink samt automatischer Codegenerierung, wurden mit diesem Projekt erfolgreich eingeführt und haben sich mittlerweile schon für weitere Vorentwicklungsprojekte etabliert. Im Zuge dieses Projektes wurde ein Team innerhalb der Leistungselektronik gegründet und von einem auf vier Mitarbeiter vergrößert.

### @Zuverlässigkeit

Bei den Forschungen zur Lebensdauer hat sich schnell herausgestellt, daß der Zugang zu diesem Thema interdisziplinär ist. Die Basis für die Entwicklung möglichst zuverlässiger und langlebiger Geräte ist das Verständnis der Schädigungsphysik. Aus der Erforschung der Schädigungsmechanismen folge die Erfassung von schädigenden Betriebsbedingungen und Ereignissen. Die Anforderung ein Gerät nur aus dem Blickwinkel möglicher Ausfallsursachen zu betrachten führte zum Aufbau eines eigenen Teams. In diesem Team werden auch die Lebensdauererests durchgeführt. Somit besteht ein optimales Zusammenspiel aus Schädigungsrechnung, Testdesign, Lebensdauererests und Rückführung der Ergebnisse zum Abgleich der Schädigungsmodelle. Das Team arbeitet entwicklungsbegleitend fast ausschließlich mit dem Thema Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit. Dadurch wird ein unbefangener Zugang zur Geräteentwicklung möglich, was u.a. bei Risikoanalysen von großem Wert ist.

## 6. Literaturverzeichnis

1 ... S. Suresh, Fatigue of Materials, 2004

## 7. Anhang