

**U N I K A S S E L  
V E R S I T ' A T**



Kompetenzzentrum für  
Dezentrale Elektrische  
Energieversorgungstechnik



Center for  
Environmental  
Systems Research



Elektrische  
EnergieVersorgungsSysteme

## **Schlussbericht des Teilvorhabens**

**Grundlagenuntersuchungen zu klimatischen  
Anforderungsprofilen sowie zu Leistungselektronik  
und Lebensdaueraspekten**

### **Im Verbundprojekt**

**Giga-PV: Systemoptimierung PV-Großkraftwerke für den  
globalen Sonnengürtel**

Autoren des Berichts: Christian Nöding, Christian Felgemacher,  
Dr.-Ing. Samuel Araujo

Förderkennzeichen: 13N11737

Projektlaufzeit: 01.08.2011 bis 31.07.2015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N11737 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger: Universität Kassel

Kompetenzzentrum für dezentrale elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) – Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme

Wilhelmshöher Allee 73

34121 Kassel

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Samuel Araujo

E-Mail: [s.araujo@uni-kassel.de](mailto:s.araujo@uni-kassel.de)

Telefon: 0561-804-6516

## Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung .....	2
1.1.	Aufgabenstellung und Ziele .....	2
1.2.	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	2
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4.	Stand von Wissenschaft und Technik zum Antragszeitpunkt .....	4
1.5.	Vernetzung und Zusammenarbeit .....	5
2.	Eingehende Darstellung .....	6
2.1.	Überblick über die durchgeführten Arbeiten .....	6
2.2.	Ermittlung des Anforderungsprofils an PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel.....	6
2.3.	Untersuchung von Wandlertopologien für Zentralwechselrichter .....	9
2.4.	Untersuchungen zu Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PV-Wechselrichtern an Sonnengürtelstandorten .....	14
2.4.1.	Thermische Belastung der Leistungshalbleiter .....	14
2.4.1.1.	Untersuchung zur Belastung durch Lastwechsel und Umgebungstemperaturschwankungen an Sonnengürtelstandorten.....	14
2.4.1.2.	Untersuchung von Temperaturzyklen innerhalb der Netzperiode .....	16
2.4.2.	Entwicklung eines Regelverfahrens für das Kühlssystem von PV-Wechselrichtern zur Minimierung der Belastung durch thermische Zyklen .....	18
2.5.	Condition Monitoring.....	20
2.5.1.	Entwicklung eines Verfahrens zur Online-Temperaturmessung von IGBTs im laufenden Betrieb des Wechselrichters .....	20
2.5.1.1.	Lüfter .....	24
2.5.1.2.	AC Leistungsschalter.....	24
2.6.	Untersuchungen zur Integration von PV-Großkraftwerken in AC-Übertragungsnetze .....	25
3.	Zusammenfassung .....	26

# **1. Kurzdarstellung**

## **1.1. Aufgabenstellung und Ziele**

Das Teilvorhaben des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungssysteme (EVS) innerhalb des Kompetenzzentrums für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) hat einen Beitrag zum Vorhaben „Systemoptimierung PV-Großkraftwerke für den globalen Sonnengürtel (Giga-PV)“ geleistet.

Ziel des Projekts „GigaPV“ war die deutliche Kostenreduzierung der Systemtechnik für PV-Großkraftwerke im Leistungsbereich mehrerer 100 MW für Zielmärkte in sehr sonnenreichen Gebieten (z.B. Wüstenregionen).

Das KDEE unterstützte dieses Vorhaben mit der Untersuchung von Lebensdaueruntersuchungen, Steuerverfahren, Wandlertopologien und Bauelementen für Wechselrichter mit erhöhter Systemspannung. Aufgabe und Ziel war hierbei die Erarbeitung von wissenschaftlichen Grundlagen, welche speziell auf die Besonderheiten der Wechselrichter mit erhöhter Systemspannung zugeschnitten sind (z.B. Multi-Level-Anordnungen oder Parallel-Interleaving).

## **1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Ziel des Vorhabens war die deutliche Kostenreduzierung der Systemtechnik für PV-Großkraftwerke im Leistungsbereich mehrerer 100 MW für Zielmärkte in sehr sonnenreichen Gebieten (z.B. Wüstenregionen). Hierfür sollten die Projektpartner, der Modulhersteller Q-Cells SE und der PV-Anlagenbauer Q-Cells International GmbH sowie der Wechselrichterhersteller und Systemspezialist SMA Solar Technology AG unter Einbeziehung weiterer spezieller Fachkompetenzen (Wissenschaftspartner Universität Kassel sowie der TÜV Rheinland) eng zusammenarbeiten, um so zu einer ganzheitlichen Optimierung zu gelangen. Hierbei galt es, einerseits hinsichtlich der Kosten zu optimieren und andererseits aber auch den besonderen Anforderungen solcher Standorte gerecht zu werden.

Mit dieser neuen PV-Großkraftwerketechnologie, also sowohl den neuen Systemkonzepten wie auch den hierfür entwickelten und optimierten Komponenten, sollte es der deutschen PV-Industrie ermöglicht werden, diesen neuen und zukunftsreichen Exportmarkt kurzfristig und durch Innovationsführerschaft zu erschließen. Ein besonderes Augenmerk galt dabei auch, neben den eigentlichen technischen FuE-Zielen, der öffentlich sichtbaren Profilierung sowohl für die PV-Großanlagen-Kompetenz der deutschen Industrie – insbesondere der beteiligten Partner – als auch für die Photovoltaik als solche (z.B. in Konkurrenz und ergänzend zu thermischen Solarkraftwerken in Sonnenregionen, wie beispielsweise bei „desertec“).

## **1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Gesamtvorhaben wurde in fünf thematische Arbeitspakete unterteilt, die jeweils wiederum in zahlreiche Unterpakete gesplittet wurden. Das Teilvorhaben „Grundlagenuntersuchungen zu klimatischen Anforderungsprofilen, sowie zu Leistungselektronik und Lebensdaueraspekten“ hatte dabei Anteile an den Arbeitspake-

ten AP1, AP3 und AP5, wobei der Schwerpunkt der Tätigkeiten auf die Arbeitspakete 1 und 3 entfiel.

In der folgenden Tabelle sind die Unterarbeitspakete, auf die sich die Tätigkeiten des Teilvorhabens erstreckten, aufgeführt. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Bearbeitung großer Teile des Arbeitspaket 1, insbesondere der Unterarbeitspakete 1.1 und 1.2, durch das CESR Institut der Uni Kassel durchgeführt wurde.

<b>AP#</b>	<b>Titel des Arbeitspaketes und Kurz-Beschreibung der Tätigkeiten</b>
1.1	Untersuchungen zur Ermittlung klimatischer Anforderungsprofile für typische Standorte weltweit
1.2	Ermittlung von Anforderungsprofilen für die Komponentenentwicklung
1.3	Ermittlung sonstiger Anforderungsprofile
1.4	Ausarbeitung von Test- und Prüfverfahren für erhöhte klimatische Bedingungen
3.1	Relevanz der spezifischen Anforderungen für den Wechselrichter
3.2	Erhöhte klimatische Anforderungen
3.3	Erhöhte sonstige Anforderungen
3.5	Höhere Bauteilbelastungen der elektrischen Komponenten
3.7	Höhere Systemspannung
3.9	Labortests und Feldtests
5	Systemevaluation, Bewertung, ergänzende Untersuchungen und Ergebnisverarbeitung

Der ursprünglich geplante zeitliche Ablauf des Teilvorhabens ist in der folgenden tabellarischen Darstellung verdeutlicht

	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
<b>AP0:</b> Projektkoordination												
<b>AP1:</b> Ermittlung des Anforderungsprofils an PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel						<b>M1</b>		<b>M2</b>				
<b>AP3:</b> Entwicklung angepasster und systemoptimierter PV-Wechselrichter großer Leistung						<b>M1</b>		<b>M2</b>		<b>M3</b>		<b>M4</b>
<b>AP5:</b> Systemevaluation, Bewertung, ergänzende Untersuchungen und Ergebnisverbreitung						<b>M1</b>		<b>M2</b>		<b>M3</b>		<b>M4</b>

Abbildung 1.1: Zeitplan vom 28.04.2011

Zu Beginn der Projektbearbeitung sind zeitliche Verzögerungen aufgetreten. Insbesondere die Bearbeitung der Unterarbeitspakete 1.1 und 1.2 hat erst mit Einbindung des Center for Environmental Systems Research (CESR) der Uni Kassel

Fahrt aufgenommen. Diese Verzögerung hatte Auswirkungen auf weitere Arbeitspakte. Weiterhin führte der verspätete Einstieg von Hanwha Q Cells nach der Übernahme der Q.cells SE durch die Hanwha Gruppe zu Verzögerungen. Vor diesem Hintergrund wurde am 28.08.2013 im Rahmen einer Sitzung des Verbunds der Arbeits- und Meilensteinplan, wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht, angepasst. Das Teilverfahren der Universität Kassel wurde, ebenso wie die weiteren Teilverfahren der Verbundpartner, um ein Jahr bis zum 31.07.2015 kostenneutral verlängert um sicherzustellen, dass alle Projektziele in vollem Umfang erreicht werden konnten.

	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				4. Jahr			
	Q1 Aug. 11 - Okt. 11	Q2 Nov. 11 - Jan. 12	Q3 Feb. 12 - Apr. 12	Q4 Mai 12 - Jul. 12	Q1 Aug. 12 - Okt. 12	Q2 Nov. 12 - Jan. 13	Q3 Feb. 13 - Apr. 13	Q4 Mai. 13 - Jul. 13	Q1 Aug. 13 - Okt. 13	Q2 Nov. 13 - Jan. 14	Q3 Feb. 14 - Apr. 14	Q4 Mai. 14 - Jul. 14	Q1 Aug. 14 - Okt. 14	Q2 Nov. 14 - Jan. 15	Q3 Feb. 15 - Apr. 15	Q4 Mai. 15 - Jul. 15
<b>AP0:</b> Projektkoordination																
<b>AP1:</b> Ermittlung des Anforderungsprofils an PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel								<b>M1</b>								
<b>AP3:</b> Entwicklung angepasster und systemoptimierter PV-Wechselrichter großer Leistung							<b>M1</b>						<b>M2</b>	<b>M3</b>		<b>M4 Ende Jul. 15</b>
<b>AP5:</b> Systemevaluation, Bewertung, ergänzende Untersuchungen und Ergebnisverbreitung														<b>M3</b>		<b>M4 Ende Jul. 15</b>

Abbildung 1.2: Aktualisierter Zeitplan vom 28.08.2013

## 1.4. Stand von Wissenschaft und Technik zum Antragszeitpunkt

Stand der Technik zum Zeitpunkt des Antrags waren PV-Großanlagen im zweistelligen MW-Bereich, die oftmals auch schon in geeigneten Wüstengebieten aufgestellt wurden. Besonders kritische Klimaregionen oder besonders abgelegene Gebiete wurden aber derzeit, auch wenn diese sehr gute Solareinstrahlungserträge versprechen, eher gemieden.

Klimatische Anforderungen an die Systemkomponenten wurden durch speziell angepasste Lösungen, Materialien und z.B. aufwendig klimatisierte Wechselrichter technisch gelöst. Hiermit war jedoch ein beträchtlicher Kostenaufwand verbunden und etwaige Kostenreduktionspotentiale wurden noch nicht ausgeschöpft, bzw. noch nicht ausreichend analysiert. Bei der Frage der Zuverlässigkeit wurde zudem oftmals auf empirische Methoden oder Erfahrungswerte zurückgegriffen.

Wechselrichter wurden zum Antragszeitpunkt nur auf Spannungen bis 1.000V DC ausgelegt, sodass es neue Wandlertopologien und Bauelemente speziell auf die Besonderheiten der Applikation mit erhöhter Systemspannung zuzuschneiden galt.

Die beteiligten Projektpartner – insbesondere die Industriepartner – verfügten bereits über vielfältige Schutzrechte bezüglich ihrer jeweiligen Produkte. Es waren keine bestehenden Schutzrechte Dritter bekannt, die der Umsetzung des geschilderten Lösungsansatzes entgegengestanden oder sich speziell auf den generellen Weg des Lösungsansatzes bezogen hätten. Die Universität Kassel/KDEE selbst besaß keine Schutzrechte mit direkter Relevanz für die geplanten Arbeiten.

## **1.5. Vernetzung und Zusammenarbeit**

In Kooperation mit SMA Solar Technology AG in Niestetal untersuchte das KDEE verschiedene Wechselrichtertopologien für 1.500V Systemspannung. Hierzu lieferte SMA unter anderem Spezifikationen und Bauteile für die praktischen Untersuchungen. Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit SMA eine Zustandsüberwachung für großtechnische PV-Kraftwerke beurteilt. Einzelne Komponenten wurden hierfür in den Laboren des KDEE Belastungstests untersucht und die Ergebnisse mit SMA diskutiert und ausgetauscht. Weiterhin wurden auf Basis von SMA Messdaten Lebensdaueranalysen einzelner Komponenten (z.B. der Halbleiter-Module) durchgeführt und in praktischen Tests die Belastbarkeit (z.B. der Wärmeleitpaste von Leistungsmodulen) detailliert untersucht.

Der TÜV Rheinland LGA Products GmbH entwickelte als Projekt-Kooperationspartner Materialprüfungsverfahren unter anderem auf Basis von Erkenntnissen des KDEE. Mit diesen Tests soll die Zuverlässigkeit des geplanten Endprodukts sichergestellt und nachvollziehbar geprüft und dokumentiert werden.

Q-Cells SE, bis 2012 auch als Hanwah Q.cells und seit 2015 Hanwah Qcells Co. Ltd. firmiert, sollte für den später geplanten Feldversuch angepasste PV-Module mit erhöhter Systemspannung 1.500V entwickeln, konstruieren und liefern. Durch unternehmensinterne Umstrukturierungen wurde die Kooperation mit Q-Cells SE/Hanwah Q.cells zunächst eingefroren und schließlich zur Gänze beendet.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1. Überblick über die durchgeführten Arbeiten

Die an der Universität Kassel durchgeführten Arbeiten lassen sich grob drei Schwerpunkten zuordnen:

Der erste Schwerpunkt lag in der Recherche und Aufbereitung von standortspezifischer meteorologischer und weiterer Daten und Informationen zur Erstellung von Anforderungsprofilen für PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel. Die Aufgaben dieses Tätigkeitsbereichs im Arbeitspaket 1 wurden durch das „Center for Environmental Systems Research“ (CESR) der Universität Kassel bearbeitet (siehe Kapitel 2.2).

Der zweite Schwerpunkt war die Bewertung und Detailuntersuchung von geeigneten Wechselrichtertopologien für höhere Systemspannung im Rahmen von Arbeitspaket 3.7 (siehe Kapitel 2.3). Der theoretischen Ausarbeitung folgten themenbegleitende, praktische Untersuchungen im Labor.

Der dritte Themenblock betraf die Untersuchung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PV-Zentralwechselrichtern in Bezug auf die zu erwartenden Gegebenheiten an Standorten des Sonnengürtels im Rahmen von Arbeitspaket 3.5. Die Topologiestudie sowie die Untersuchung von Lebensdauer und Zuverlässigkeit wurden am „Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik“ (KDEE) durchgeführt (siehe Kapitel 2.4 und 2.5).

### 2.2. Ermittlung des Anforderungsprofils an PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel

Das Ziel der an der Universität Kassel bearbeiteten Unterarbeitspakete innerhalb des Arbeitspaket 1 bestand in der Recherche und Aufbereitung standortspezifischer meteorologischer und anderer Daten und Informationen sowie davon abhängiger komponenten-spezifischer Kenngrößen. Diese Informationen dienten als Basis für die Ableitung von Anforderungsprofilen an die Komponenten von PV-Großkraftwerken im globalen Sonnengürtel.

In einem ersten Schritt wurden gemeinsam mit allen Projektbeteiligten sechs klimatische Belastungskategorien identifiziert. Für jede dieser Belastungskategorien wurden weltweit repräsentative Standorte (siehe Tabelle 2.1) ausgewählt auf die sich in der Datenrecherche konzentriert wurde. Neben diesen Standorten wurden Referenzstandorte in Süddeutschland identifiziert, mit dem Ziel testen zu können ob die beobachteten Ausfälle mit den aus dem Klimadatensatz abgeleiteten Stressfaktoren korrelieren.

Tabelle 2.1: Belastungskategorien und zugeordnete Standorte

Wüste trocken, sandig	Wüste trocken, Inselnetz	Wüste Tag/Nacht Amplitude	Küste, feucht	Küste, trocken	Wüste hoch
Riad, Saudi Arabien	Pilbara, Australien	Wüste Gobi, Mongolei	Mumbai, Indien	Masdar, Vereinigte Arab. Emirate	Atacama Wüste, Chile

Es erfolgte eine Spezifizierung der Klassen klimatischer Stressfaktoren (Temperatur, Einstrahlung, usw.), der für Gerätetests und Simulationen benötigten zeitlichen Auflösung, der statistischen Kenngrößen und Relevanz für die jeweiligen Standorte. Um die Anforderungen an die Kenngrößen und die Daten-Verfügbarkeit abzugleichen wurden regelmäßig Treffen mit den Projektpartnern abgehalten.

Für die klimatischen Informationen stand ein globaler historischer Datensatz zur Verfügung, der im Idealfall stündliche Informationen für die wichtigsten Klimainformationen aller Standorte in konsistenter und vergleichbarer Form aufwies.

Ausgehend von den identifizierten Standorten und den benötigten Daten wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Überprüfung der Datenqualität, d.h. Überprüfung auf Vollständigkeit, Fehler und Plausibilität einzelner Werte und der Homogenität der Daten durch vergleich mehrerer Stationen für einen Standort.
- Erstellung und Überprüfung von Datensätzen wie z.B. exemplarischer Tageszeitreihen und Extremwerte für die Standorte.
- Durchführung weiterer Datenrecherche u.a. zum Thema Sandbelastung, extreme Niederschlagsereignisse, Gewitterhäufigkeit, biologische Belastung durch Temperatur und Feuchte.
- Analyse der Auftrittshäufigkeit und daraus abgeleitet eine Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von potentiell kritischen Kombinationen meteorologischer Variablen.
- Datenbereitstellung zum Themenkomplex „atmosphärische Korrosivität“ durch das Fraunhofer-Institut Solare Energiesysteme ISE in Freiburg inhaltlich vorbereitet und koordiniert.
- Erstellung einer ausführlichen Dokumentation der Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung sowie eine Einschätzung der Datenqualität für die einzelnen Klimastationen wurde erstellt.

Für die ausgewählten Standorte wurden folgende Auswertungen auf Basis der vorliegenden Daten erstellt und den Projektpartnern bereitgestellt:

- Temperaturmaxima/-minima
- Temperatur-Tagesamplituden (siehe Abbildung 2.1)
- Identifikation exemplarischer Extremtageszeitreihen für  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , relative Feuchte und Windgeschwindigkeiten
- Häufigkeit und Dauer von Sand-/Staubstürmen

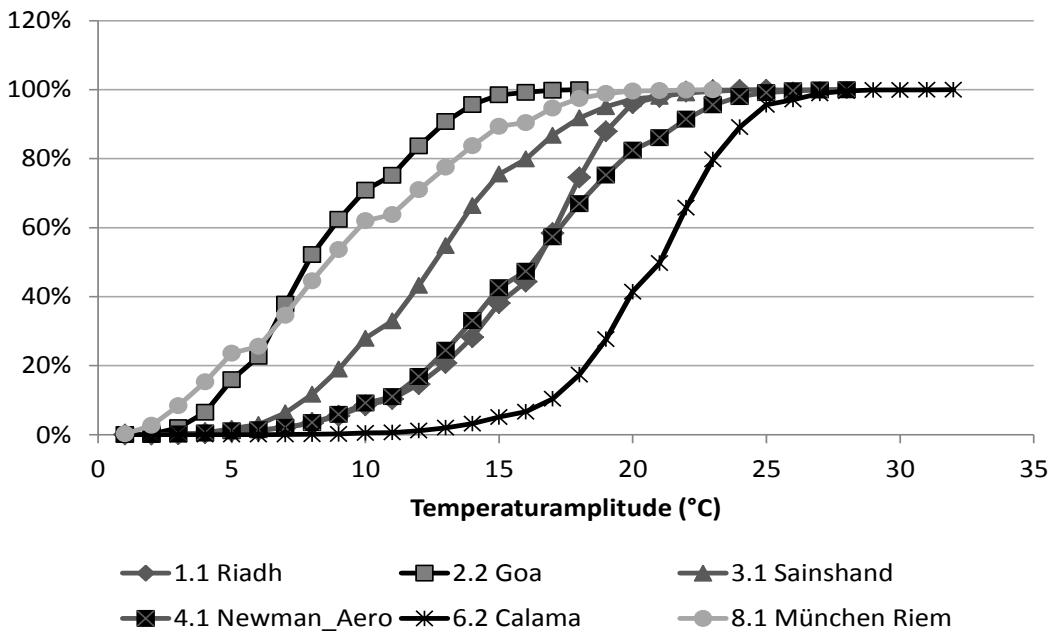


Abbildung 2.1: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen für Amplituden der Tagestemperatur an fünf Standorten im Sonnengürtel und am Referenzstandort München

Die Datenrecherchen zu den o.g. Themenkomplexen brachten nur zum Teil befriedigende Ergebnisse. So konnte zum Thema Sandbelastung bzw. atmosphärische Sandkonzentration nur für einen Standort (Sainshand, Mongolei) ein Zusammenhang zwischen beobachteter Sichtweite und Sandkonzentration während Sandsturmereignissen abgeleitet werden. Insbesondere die Erfassung und Quantifizierung von Extremereignissen wie z.B. Extremniederschläge oder Gewitterhäufigkeit ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da zum einen diese Ereignisse kleinräumig, d.h. lokal sehr begrenzt auftreten und u.U. an der verfügbaren Datenstation nicht erfasst werden. Zum anderen sind die verfügbaren Datensätze in den relevanten Regionen (z.B. Mumbai, Indien) z.T. sehr lückenhaft.

Für das Auftreten kritischer Kombinationen von meteorologischen Variablen wurden vier Varianten/Kombinationen (siehe Tabelle 2.2) für alle sechs Referenzstandorte ausgewertet. Diese Kombinationen wurden hinsichtlich der relativen Auftretshäufigkeit, d.h. zum Beispiel wie häufig wird an einem Standort eine Temperatur in der Klasse 30-35°C und gleichzeitig eine relative Luftfeuchte in der Klasse 50-60% beobachtet (siehe Abbildung 2.2, links).

Tabelle 2.2: Belastung durch kritische Kombinationen von meteorologischen Variablen

Kombination	Abkürzung Tabellenblatt	Begründung für Stress
Temperatur und rel. Luftfeuchte	T_rH	Diffusion von Feuchtigkeit durch Dichtungen/Kunststoffe
Temperatur und Windgeschwindigkeit	T_SPD	Kühlung der Komponenten bei ungünstiger Anströmung
Windgeschwindigkeit und rel. Luftfeuchte	SPD_rH	Diffusion von Feuchtigkeit durch Kunststoffe wird durch eine hohe Austauschrate begünstigt
Maximale tägliche rel. Luftfeuchtigkeit und Tages-temperaturamplitude	rHmax-TAmpl	Kondensation von Feuchte

An diese Daten wurde eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angepasst sowie der Fehler der jeweiligen Funktionswerte ermittelt (siehe Abbildung 2.2, Mitte und rechts). Die berechneten Wahrscheinlichkeiten im extremeren Bereich der Werte sind danach mit relativ hohen Fehlern im Vergleich zur Auftrittswahrscheinlichkeit behaftet und entsprechend mit Vorsicht zu interpretieren.

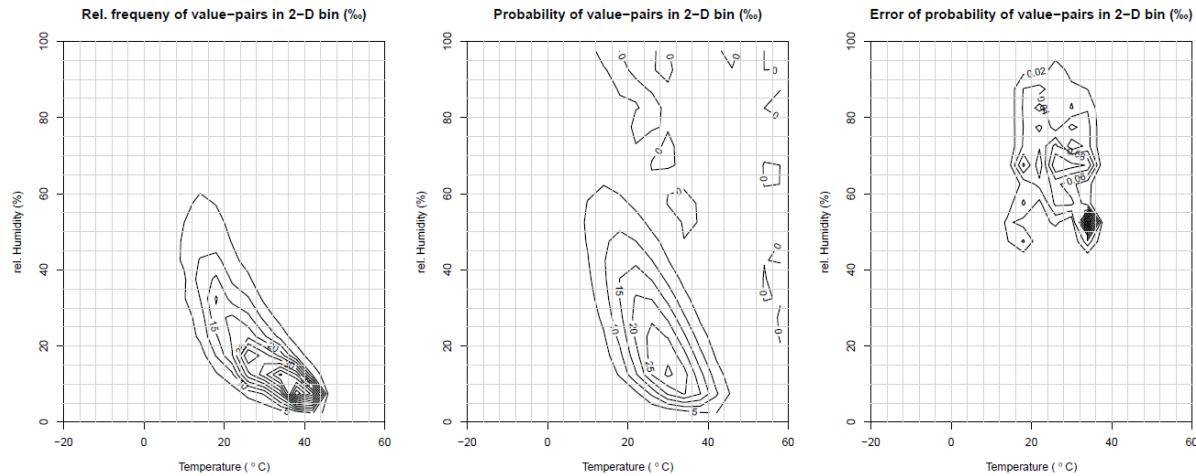


Abbildung 2.2: Relative beobachtete Auftrittshäufigkeit einer Wertepaarung von Temperatur und relativer Feuchte (links), Auftrittswahrscheinlichkeit der Paarung (Mitte) und Fehlerbehaftung des Wertepaars (rechts).

Die Ergebnisse der Datenrecherche und -auswertung wurden den Projektteilnehmern in Form von Excel-Dateien zur Verfügung gestellt. Eine ausführliche Dokumentation der Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung sowie eine Beschreibung der Datenverfügbarkeit für die einzelnen Standorte wurden ebenfalls bereitgestellt.

## 2.3. Untersuchung von Wandlertopologien für Zentralwechselrichter

Die Bewertung und Detailuntersuchung von geeigneten Wechselrichtertopologien für höhere Systemspannung war Ziel von Arbeitspaket 3.7. Im Fokus stand hierbei die wissenschaftliche Erarbeitung von Grundlagen zu leistungselektronischen Wandlern bei Einsatz unter erhöhter PV-Systemspannung oberhalb der typischen 1.000V. Zudem sollte dem wechselrichterherstellenden Kooperationspartner „SMA Solar Technology AG“ am Ende der Untersuchungen eine Empfehlung für einen Wechselrichtertypus ausgesprochen werden, der für den gewählten Einsatz passend scheint.

Für die durchzuführenden Untersuchungen wurden im Vorfeld Randbedingungen durch den Kooperationspartner SMA erstellt. Unter anderem sahen diese eine Unterteilung in zwei Spannungsszenarien vor: Szenario 1 deckt eine Betriebsspannung von  $U_{PV}=750V \dots 1.200V$  und erreicht die geplante maximale PV-Spannung von  $U_{PV}=1.500V$  lediglich im Leerlauf- oder Abschaltfall. Szenario 2 deckt hingegen den vollen Bereich von  $U_{PV}=750V \dots 1.500V$  auch im ordnungsgemäßen Betrieb des Wechselrichters ab. Dies führte schließlich in der Untersuchung zu unterschiedlichen Empfehlungen in Bezug auf die zu verwendende Wechselrichtertopologie.

Eine große Anzahl an einsetzbaren Schaltungsarten für die Umwandlung von Gleichstrom zu Wechselstrom verlangte nach einer zeitsparenden, aber auch hinreichend belastbaren Vergleichsmethode. Hierfür wurden miteinander vergleichbare Faktoren für Belastungen der wichtigsten und kritischsten Bauteile entwickelt. Faktoren für die Halbleiter konnten über leistungselektronische Simulationen in Form von Durchlass- und Schaltverlusten ermittelt werden. Für induktive Wickelgüter (Drosseln) wurden der Bauteilstrom, sowie der maximal zugelassene Stromripple für die Ermittlung eines vergleichbaren Drossel-Volumenfaktors herangezogen. Der Kondensatoraufwand konnte als Abbildung der Nennspannung, der Kapazität und der Strombelastbarkeit ebenfalls als Volumenfaktor abgebildet werden. Die elektrischen Belastungsprofile konnten anhand von leistungselektronischen Simulationen für jede einzelne Topologie gewonnen werden. Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft die Hauptoberfläche der Simulation einer 2-Level B6-Standardtopologie.

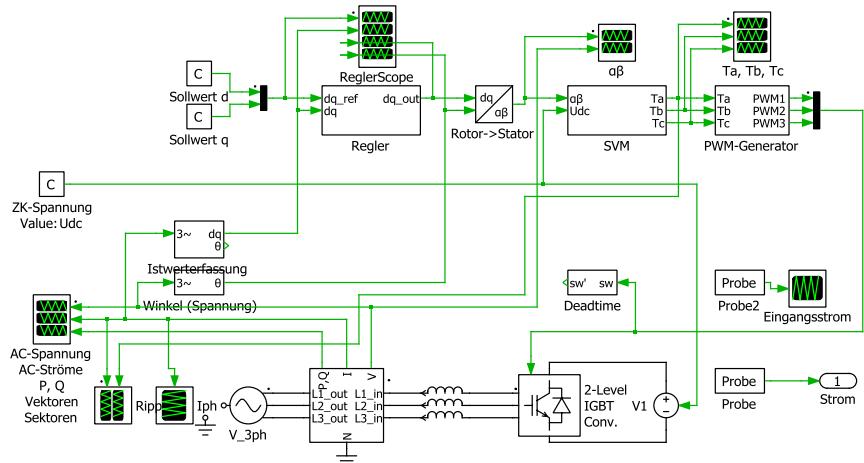


Abbildung 2.3: Beispielhafte Abbildung der leistungselektronischen Simulation einer Topologie

Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zeigen einige Signalformen, die durch die Simulation gewonnen werden können. Links ist die Strombelastung einzelner Halbleiterschalter zu sehen, während auf der rechten Seite die AC-Ausgangsgrößen (Strom, Spannung und Leistung) des gesamten Wechselrichtersystems dargestellt ist.

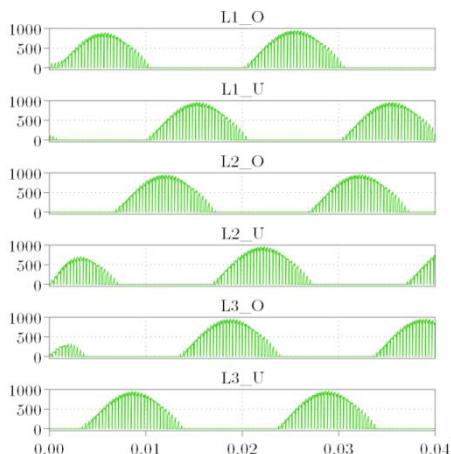


Abbildung 2.4: Strombelastung einzelner Halbleiterschalter

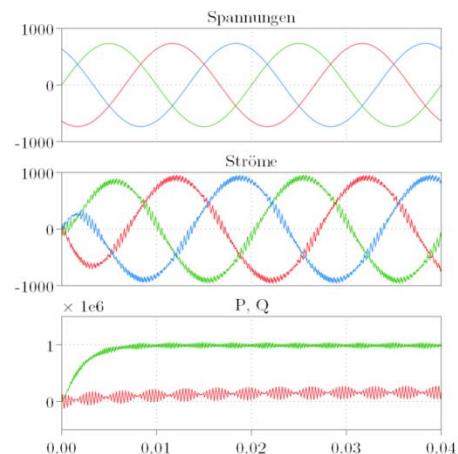


Abbildung 2.5: Simulierte Ausgangsgrößen eines 1MW-Wechselrichters

Für die Voruntersuchung wurden nach begründetem Ausschluss von sechs, für „GigaPV“ offensichtlich ungeeigneten, Wechselrichtertopologien insgesamt 8 Topologien bei verschiedenen AC-Netzspannungen ausgewählt, was zu insgesamt 20 Schaltungsvarianten pro Szenario führte. Aufgrund ihres technologisch anspruchsvollen Designs wurden im Zuge der Untersuchung drei zusätzliche Schaltungsvarianten für spätere Projekte aufgeschoben. Die Nichtberücksichtigung für das Projekt „GigaPV“ ließ sich mit dem erheblichen technischen Risiko rechtfertigen und ist im technischen Bericht zu Arbeitspaket 3.7 weitergehend beschrieben. Durch geeignete Algorithmen wurden diese Varianten miteinander über die zuvor beschriebene Faktoren gegenübergestellt und in einer Rangfolge, jeweils für Szenario 1 und 2 getrennt, bewertet.

Eine Auswahl der vielversprechendsten Topologien wurde im Detail untersucht und schließlich ebenfalls durch Faktoren bewertet. Hierfür wurden statt gemittelter Bauteilbelastungsprofile nun reale Stromverläufe verwendet. Somit konnten über Datenblattangaben und zuvor durchgeföhrten Verlustmessungen umfassendere Halbleiterverluste berechnet und schließlich auch vollständige Halbleiterwirkungsgrade einer Topologie gebildet werden. Durch Berechnung der IGBT Schalt- und Durchlassverluste wurden zudem die Chiptemperaturen ermittelt, über welche schließlich wiederum die benötigte, minimale IGBT-Chipfläche und somit die anfallenden Kosten für eine Topologie abgeschätzt werden konnten. Die Detailuntersuchung umfasste nicht nur unterschiedliche AC-Ausgangsspannungen, sondern auch verschiedene Halbleiterkonfigurationen und Schaltfrequenzen, sodass schließlich eine Gesamtanzahl von 70 unterschiedlichen Wechselrichtertopologien für Szenario 1 und 45 Topologien für Szenario 2 miteinander verglichen wurden.

Am Ende wurden jeweils drei Tabellen für beide Szenarien aufgestellt. Die erste Tabelle listete die untersuchten Topologien als kostengewichtete Rangfolge auf, sodass auf Basis von zur Verfügung gestellten Kostenfaktoren zu Halbleiter-Chipfläche, Drosselbauvolumen, Treiberschaltungsbedarf und Kondensatorvolumen der finanzielle Aufwand für den Bau einer Wechselrichtertopologie abgeschätzt werden konnte. Die zweite Tabelle zeigte den auf eine Referenzschaltung normierten Bauteilaufwand für eine Topologie. Eine dritte Tabelle führte schließlich die errechnete Verlustleistung (somit auch den Kühlungsaufwand) einer Wechselrichtertopologie, sowie den erwarteten Wirkungsgrad in Relation zu einer Referenzschaltung auf. Diese Tabellen dienten somit dem Wechselrichterhersteller als Empfehlung für eine günstige Topologie bei entsprechend gewählter AC-Netzspannung.

Nach Abschluss der Topologiebewertung galt es in Arbeitspaket 3.7 eine Serienschaltung zweier IGBTs als Alternative zu bestehenden Lösungsansätzen zu untersuchen, sowie eine stabile Betriebsführung zu entwickeln. Da eine PV-Systemspannung von 1.500V angestrebt wurde, sind für einen stabilen Betrieb je nach gewählter Topologie selbst 1.700V IGBTs nicht ausreichend, da mit Blick auf die Lebensdauer lediglich 65% bis 75% (1.105V bis 1.275V bei 1.700V IGBTs) der maximalen Sperrspannung dauerhaft von einem IGBT gesperrt werden sollten. Bei der Serienschaltung von IGBTs kann eine symmetrische Aufteilung der Spannung ohne weitere Hilfsmittel nicht garantiert werden (siehe Abbildung 2.6).

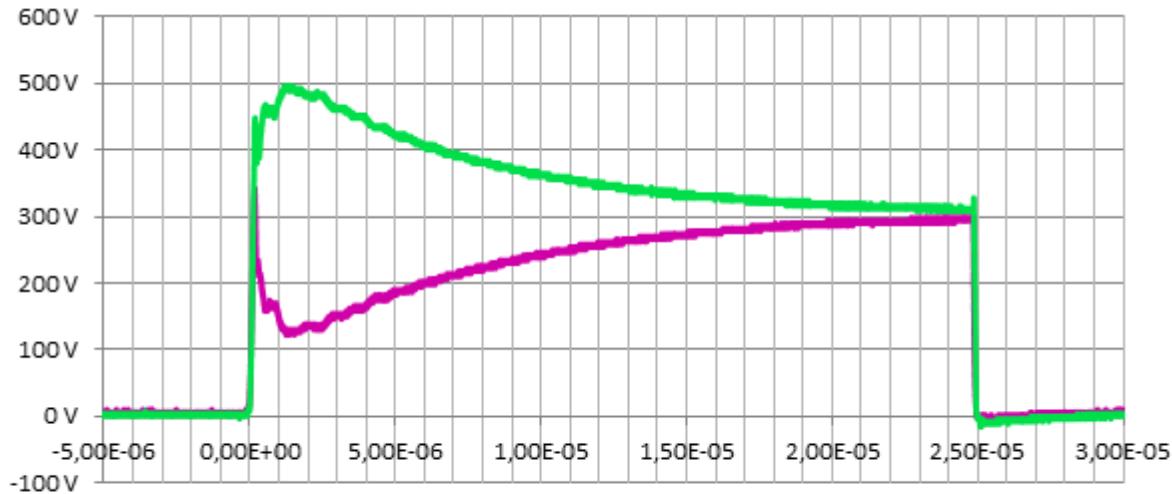


Abbildung 2.6: Ungleichmäßige Spannungsaufteilung bei IGBT-Serienschaltung

Neben der Erarbeitung einzelner Problemlösungen wurden Grundlagen und Ursachen zu Spannungsunsymmetrien erarbeitet. Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt sechs verschiedene Verfahren zur Spannungssymmetrierung von IGBTs in einer Serienschaltung untersucht. Davon wurden schließlich zwei geeignete Methoden ermittelt und weiterentwickelt, sodass in ihrem kombinierten Einsatz ein Einsatz der Serienschaltung auch bei Wechselrichtern der Megawatt-Klasse zuverlässig ermöglicht wird. Zum einen kommt das bereits länger bekannte „Active-Clamping“ zum Einsatz, welches den IGBT bei Überschreiten einer bestimmten Spannung wieder einschaltet, um die Spannung abzubauen. Zum anderen wurde eine weiterentwickelte Gate-Signal-Zeitkorrektur empfohlen, die ein aktives Einstellen der Spannungsverteilung über den Serien-IGBTs erlaubt.

Experimentelle Untersuchungen belegen die Wirkungsweise des ermittelten Lösungsvorschlags (siehe im Vergleich Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8). Zusätzlich wurde ein Vergleich der Schaltverluste zwischen einfachem IGBT und der Serienschaltung durchgeführt (siehe Abbildung 2.9). Es konnte somit belegt werden, dass bei Verwendung von zwei IGBTs in Reihe keine zusätzlichen Schaltverluste zu erwarten sind. Detaillierte Ergebnisse der gesamten Untersuchung sind in einem 86 Seiten umfassenden Detailbericht zusammengefasst und wurden dem Kooperationspartner SMA übergeben.

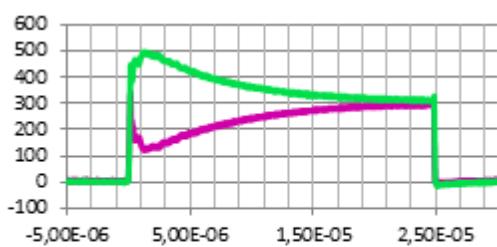


Abbildung 2.7: Unsymmetrierte Spannungsverteilung

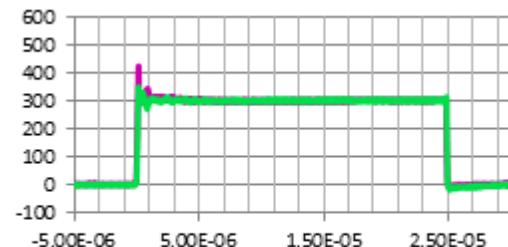


Abbildung 2.8: Angewendete Spannungssymmetrierung

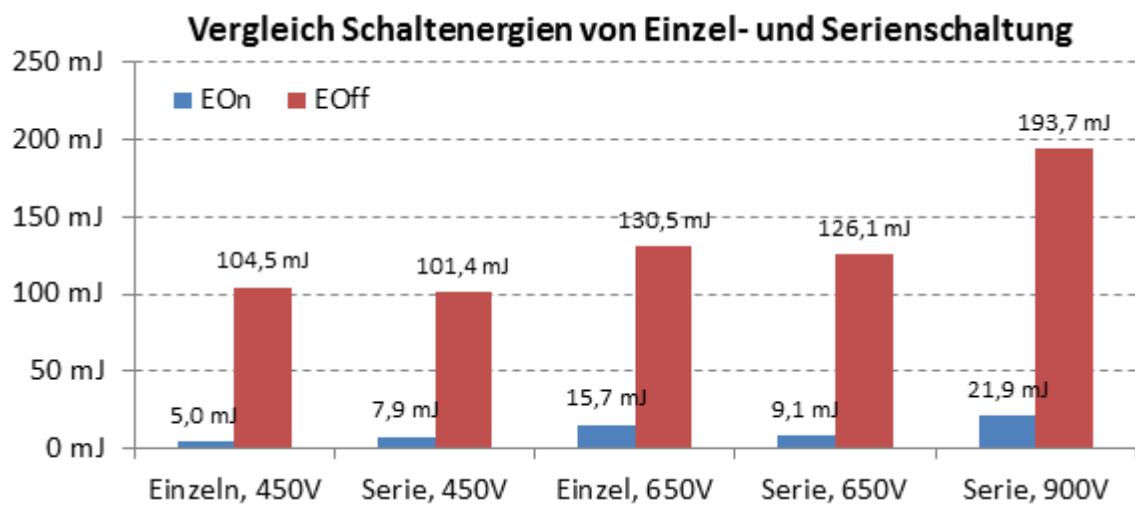


Abbildung 2.9: Vergleich von Schaltverlusten von Einzel- und Serienschaltung

## **2.4. Untersuchungen zu Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PV-Wechselrichtern an Sonnengürtelstandorten**

Das Ziel der Bearbeitung des Arbeitspakets 3.5 ist die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Systemkomponente „Zentralwechselrichter“ unter Bezug auf die in Arbeitspaket 1 ermittelten regionalen Gegebenheiten an Sonnengürtelstandorten zu bewerten. Hierzu wurden die Ergebnisse der Standortuntersuchung aus AP 1 auf deren Relevanz für den Wechselrichter untersucht.

In Kooperation mit dem Konsortialpartner SMA wurde basierend auf Erfahrungen mit momentanen Zentralwechselrichtern und Ergebnissen einer ersten Literaturrecherche eine Bewertung der Komponenten des Wechselrichters vorgenommen um zu entscheiden, welche Komponenten eingehend auf deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu untersuchen sind. Es wurde entschieden, dass sich das KDEE schwerpunktmäßig mit den Komponenten des Leistungsteils, insbesondere den Leistungshalbleitern, des Wechselrichters beschäftigen wird.

### **2.4.1. Thermische Belastung der Leistungshalbleiter**

Als möglicherweise relevante Belastung für die Halbleitermodule wurden die auftretenden Temperaturwechsel identifiziert, welche die Lot-Verbindungen im Modul sowie die Bonddrahtverbindungen schädigen. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der Materialien im Halbleitermodul kommt es an den Übergängen zu Rissbildungen. Dies hat zur Folge, dass nach einer hohen Anzahl von Temperaturzyklen die Verbindung zwischen Bonddrähten (Aluminium) und Chip (Silizium) bzw. die Lotstelle zwischen Chip und DCB soweit geschädigt wird, dass sich die Bonddrähte ablösen können, bzw. die thermische Verbindung zwischen Chips und DCB sich soweit verschlechtert, dass die Chips im Betrieb unzulässig erwärmt werden.

Ziel der Untersuchung war es die thermische Belastung der Halbleiter im Zentralwechselrichter zu ermitteln um Anhand der Angaben des Halbleitermodulherstellers eine Aussage zur erwarteten Lebensdauer der Module im Zentralwechselrichter zu treffen. Ein Modell für das Fortschreiten der Schädigung im Modul zu finden ist nicht Ziel der Untersuchung, da entsprechende Versuche eines erheblichen Aufwandes bedürfen und Daten zur Zyklensfestigkeit vom Hersteller bereitgestellt wurden.

#### **2.4.1.1. Untersuchung zur Belastung durch Lastwechsel und Umgebungs-temperaturschwankungen an Sonnengürtelstandorten**

Zur Ermittlung der thermischen Belastung der Halbleiter wurde eine Simulation entwickelt. Diese ermöglicht es Mission-Profiles nahezu beliebiger Länge (z.B. eines ganzen Jahres), bestehend aus den zeitlichen Verläufe der Eingangsleistung des PV-Wechselrichters -  $U_{DC}(t)$  und  $I_{DC}(t)$ - sowie die zugehörige Umgebungstemperatur zu analysieren.

Mittels einer elektrischen Simulation des Wechselrichters wurden, unter Berücksichtigung gemessener Schaltverluste und Datenblattangaben zu Durchlassverlusten, die Gesamtverluste in den Halbleitern an über 150 stationären Arbeitspunkten des Wechselrichters ermittelt. Weiterhin wurde anhand dieser Simulation der Einfluss unterschiedlicher Modulationsverfahren auf die Schaltverluste im Wechselrichter untersucht. Ergebnisse hierzu finden sich in einem gesonderten Bericht.

Unter Verwendung der ermittelten Verlustleistungen der Halbleiter an den jeweiligen Arbeitspunkten wurde ein zeitlicher Verlauf der Verlustleistungen ermittelt, welcher die Eingangsgröße für eine thermische Simulation darstellt. Die thermische Simulation wiederum basiert auf einem kompakten thermischen Modell für den Leistungsteil des momentanen Zentralwechselrichters, welches die Regelung der Lüfterleistung berücksichtigt und welches, basierend auf Messungen die SMA durchgeführt hat, erstellt wurde. Das Zusammenspiel der verschiedenen Simulationsschritte ist in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt.

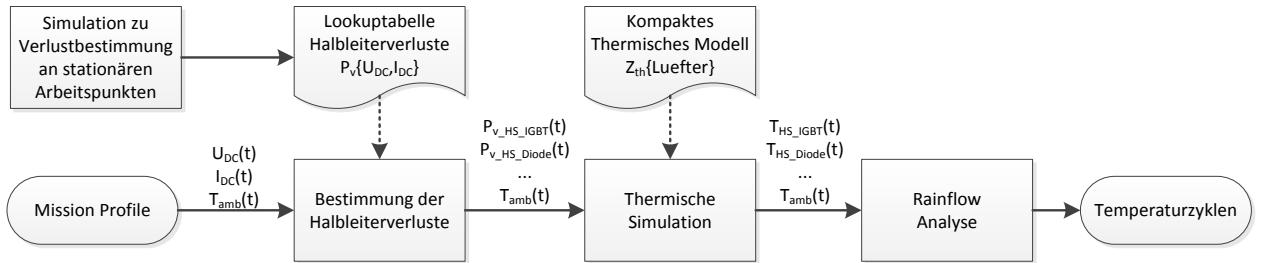


Abbildung 2.10: Schritte zur Bestimmung der thermischen Belastung anhand von Mission Profiles

Mit der entwickelten Simulation wurden von SMA bereitgestellten Belastungsprofilen für Standorte im globalen Sonnengürtel simuliert um die Halbleiterbelastungen an diesen Standorten abzuschätzen.

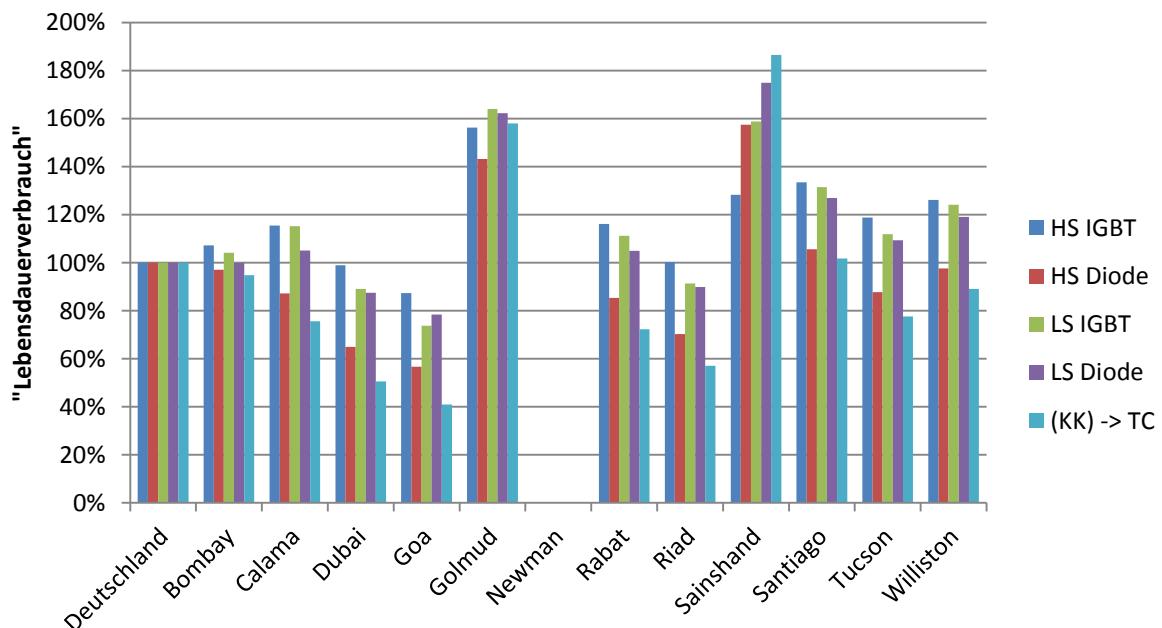


Abbildung 2.11: Prognostizierter Lebensdauerverbrauch an den GigaPV Standorten, normiert auf die Belastungen am Referenzstandort (Deutschland)

Die in Abbildung 2.11 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass extrem kontinentale Standorte wie Golmud (China) und Sainshand (Mongolei) die größten Belastungen für die Halbleitermodule darstellen. Dies ist auf die sehr niedrigen nächtlichen Umgebungstemperaturen zurückzuführen.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse berücksichtigen nur thermische Zyklen die auf Grund von variierender Leistung (PV-Einstrahlung) oder sich ändernder Umgebungstemperaturen auftreten. Schnelle Temperaturzyklen im Bereich der 20ms-Netzperiode werden nicht erfasst. Eine Untersuchung dieser Effekte ist im nächsten Abschnitt dargestellt.

#### 2.4.1.2. Untersuchung von Temperaturzyklen innerhalb der Netzperiode

Auf Grund des sich ständig verändernden Momentan-Werts des Netzstroms und somit des Stroms durch einen gegebenen Halbleiter kommt es innerhalb der Netzperiode von 20ms zum Auftreten eines Temperaturzyklus am Halbleiter.

Die zu erwartenden Temperaturzyklen innerhalb der Netzperiode können am Zentralwechselrichter nicht direkt gemessen werden sondern nur durch elektro-thermische Simulationen abgeschätzt werden.

Zur Überprüfung ob die durch Simulationen ermittelten thermischen Zyklen innerhalb der Netzperiode mit den in der Realität auftretenden Zyklen übereinstimmen wurden Messungen an einem skalierten Wechselrichter Aufbau durchgeführt (siehe Abbildung 2.16). Hierzu wurde zunächst eine Simulation zur Vorhersage der auftretenden netzfrequenten Temperaturzyklen an den Halbleitern im Versuchsaufbau erstellt. Die in der Simulation an einigen Arbeitspunkten ermittelten netzfrequenten Temperaturzyklen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

*Tabelle 2.3: Von der Simulation des skalierten Aufbaus vorausgesagte Temperaturhöhe des Power Cycles innerhalb einer Netzperiode, fsw = 16kHz*

Modulation	U <sub>DC</sub> / V	I <sub>DC</sub> / A	T <sub>case</sub> / °C	cos φ	HS IGBT	HS Diode	LS IGBT	LS Diode
SVM	290	12,2	60	1,0	2,4	2,1	2,4	2,1
DSVM1 (Flat-Bot)					1,1	2,1	2,3	0,3
DSVM2 (Sek. Gr.)					1,8	1,4	1,8	1,4
DSVM3 (Sek. M.)					1,8	1,4	1,8	1,4
DSVM4 (Sek. MI.)					1,6	1,1	1,6	1,2

Die Simulation wurde durch Messungen am aufgebauten Wechselrichter validiert. In Abbildung 2.12 ist ein Thermogramm einer Halbbrücke des verwendeten IGBT Moduls (FS50R12KT4\_B15) beim Arbeitspunkt U<sub>DC</sub>=290V, I<sub>DC</sub>=23.6A, U<sub>AC</sub>=200V, cosφ=1.0 und Standardmodulation sowie der zeitliche Verlauf der Temperaturen der zentralen Halbbrücken-Chips im Modul dargestellt.

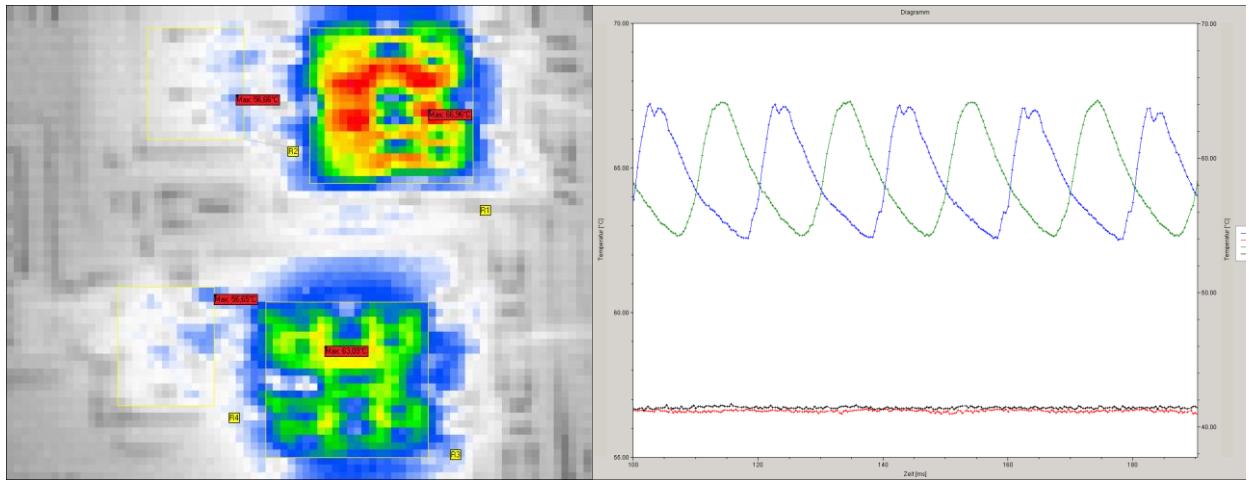


Abbildung 2.12: Thermogramm und zeitlicher Temperaturerlauf (über 100ms) der zentralen Halbbrücken-Chips im Modul FS50R12KT4\_B16  
 $(f_{sw}=16\text{kHz}, U_{DC}=290\text{V}, I_{DC}=23.6\text{A}, U_{AC}=200\text{V}, \cos\varphi=1.0, \text{STD-Modulation})$

Die Messungen an einem weiteren Arbeitspunkten, der dem Simulierten Arbeitspunkt entspricht, mit unterschiedlichen Modulationsverfahren sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2.4: An skaliertem Aufbau gemessene Power Cycles innerhalb der Netzperiode,  $f_{sw} = 16\text{kHz}$

Modulation	$U_{DC} / \text{V}$	$I_{DC} / \text{A}$	$T_{case} / ^\circ\text{C}$	$\cos \varphi$	HS IGBT (R4)	HS Diode (R2)	LS IGBT (R3)	LS Diode (R1)
SVM	290	12	ca. 60	1,0	2,0	N/A	2,0	N/A
DSVM1 (Flat-Top)					2,3		1,0	
DSVM1 (Flat-Bot)					0,9	0,5	2,2	
DSVM2 (Sek. Gr.)					1,7	0,3	1,7	
DSVM3 (Sek. M.)					2,2	0,3	1,9	
DSVM4 (Sek. MI.)					0,9	0,3	1,2	

Der Vergleich der Messergebnisse (Tabelle 2.4) mit den Simulationsergebnissen (Tabelle 2.3) zeigt, dass die real auftretenden Temperaturzyklen bei allen Modulationsarten geringer sind als in der Simulation, die Tendenzen jedoch untereinander vergleichbar sind. Die Simulation erscheint somit geeignet, um eine Worst-Case Abschätzung der Zyklenbelastung durch PowerCycles im Bereich der Netzperiode vorzunehmen.

## Zusammenfassung

Durch Messungen an einem skalierten Wechselrichteraufbau mittels der für das Projekt angeschafften Hochgeschwindigkeits-IR-Kamera konnten die durch Simulationen vorhergesagten Temperaturzyklen innerhalb der Netzperiode von 20ms experimentell überprüft werden.

Bei den Messungen wurden geringfügig kleinere Zyklen ermittelt, als durch die Simulation vorhergesagt, was u.a. auf Worst-Case Angaben für die thermischen Impedanzen im Datenblatt zurückzuführen ist. Es konnte somit gezeigt werden, dass sich die auftretenden netzfrequenten Temperaturzyklen an den Halbleiterchips durch elektro-thermische Simulationen voraussagen lassen.

## **2.4.2. Entwicklung eines Regelverfahrens für das KühlSystem von PV-Wechselrichtern zur Minimierung der Belastung durch thermische Zyklen**

Die Untersuchungen der Belastung der Halbleiter in PV Zentralwechselrichtern durch Temperaturzyklen haben gezeigt, dass die größte Wechselbelastung der Halbleitermodule durch große Temperaturzyklen zwischen der Maximaltemperatur am Tag und der Minimaltemperatur in der Nacht auftritt. Es wurde untersucht, wie diese Belastung durch Änderungen am Regelverfahren des Kühlsystems reduziert werden kann.

Das KühlSystem ist darauf ausgerichtet bei ungünstigsten Umgebungstemperaturen und Nennleistungsbetrieb des Stromrichtersystems die Kühlkörpertemperatur auf einem Niveau zu halten, das einen Betrieb der Halbleiter unterhalb der maximalen Sperrsichttemperatur ermöglicht. Liegt die Umgebungstemperatur unterhalb der Auslegungstemperatur oder muss der Stromrichter den Tag über nur einen Bruchteil der Nennleistung verarbeiten wird die Kühlleistung reduziert um weniger Energie für die Kühlung aufzuwenden. Die Kühlkörpertemperatur erreicht somit selbst an kalten Tagen mit geringer PV-Einstrahlung sehr hohe Werte, was große Temperaturzyklen zur Folge hat.

Es wurde eine Methode vorgeschlagen, den Kühlkörpertemperatursollwert für jeden Tag individuell anzupassen. Abhängig davon ob Prognoseredaten für die zu erwartende PV-Einstrahlung vorliegt wird dabei der Sollwert stufenweise in der ersten Tageshälfte angepasst oder zu Tagesbeginn basierend auf den Prognoseredaten festgelegt.

Die vorgeschlagenen Ansätze zur adaptiven Festlegung der Sollgröße für das KühlSystem wurden in der bereits bestehenden thermischen Simulation des Zentralwechselrichters implementiert. Unter Verwendung der Simulation wurden die Einflüsse der alternativen Regelverfahren des Kühlsystems auf folgende Größen untersucht:

- Die auftretende Temperaturwechselbelastung der Halbleiter
- Die Reduktion der allgemeinen Betriebstemperatur im Leistungsteil
- Den Mehrenergiebedarf für das KühlSystem bei Anwendung der Verfahren

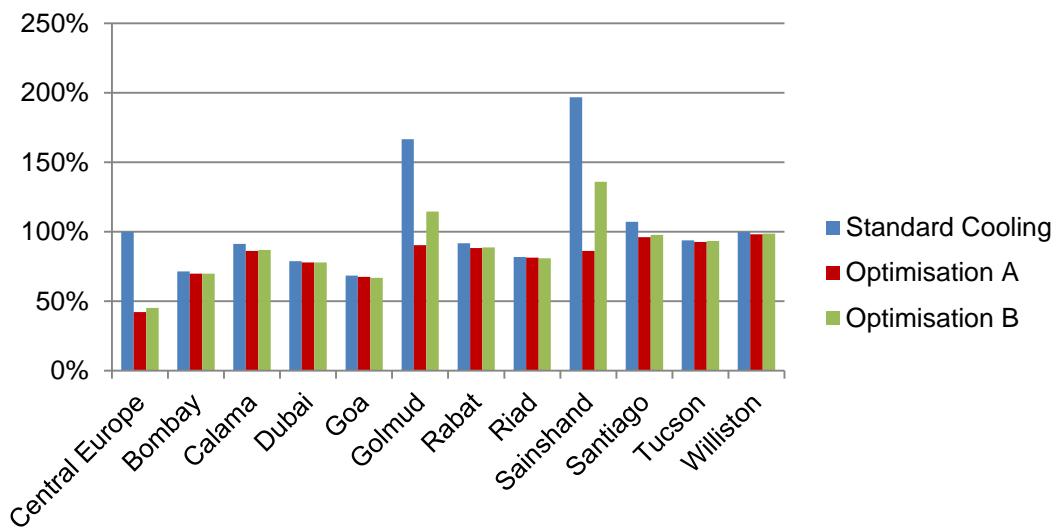


Abbildung 2.13: Auf Referenzstandort und Standard Verfahren normierte Belastung mit verschiedenen Verfahren zur Kühlssystemregelung

Aus Platzgründen wurde die Reduktion der thermischen Zyklenbelastung nur an den untersuchten Standorten des Projekts dargestellt (siehe Abbildung 2.13). Die weiteren Ergebnisse, insbesondere zum Einfluss auf den Energiebezug des Kühlssystems, sind in einem gesonderten Dokument zusammengefasst. Eine Patentanmeldung, welche die vorgeschlagenen Ansätze zur Regelung eines Kühlssystems beinhaltet, wurde im August 2014 in Kooperation mit SMA eingereicht.

## 2.5. Condition Monitoring

Neben der Bewertung der Lebensdauer bzw. Zuverlässigkeit von einzelnen Wechselrichterkomponenten wurde ermittelt welche Komponenten im Wechselrichter mit welcher Methodik überwacht werden können um drohende Ausfälle vorherzusagen und so Stillstandszeiten und Kosten durch ungeplante bzw. ggf. vermeidbare Wartungseinsätze zu vermeiden.

### 2.5.1. Entwicklung eines Verfahrens zur Online-Temperaturmessung von IGBTs im laufenden Betrieb des Wechselrichters

Zur Überwachung der Halbleiter bietet es sich an die Chip-Temperaturen im Betrieb zu messen. Hierzu können nur indirekte Verfahren über temperaturabhängige Parameter der Halbleiter zum Einsatz kommen, da keine Temperatursensoren direkt an den Halbleiterchips verbaut sind.

Es wurde eine Untersuchung zur Ermittlung geeigneter Verfahren zur Online Überwachung der IGBT-Chip-Temperatur durchgeführt. Als Ziel galt es ein Verfahren aufzuzeigen, welches in der Lage sein sollte mit vertretbarem Aufwand die Halbleittertemperatur während des Wechselrichterbetriebs zu messen. Solch eine Messung kann zum einen das Kühlssystem des Wechselrichters (vom Chip bis zur Umgebung) im Betrieb überwachen und mögliche Degradierungen erkennen bevor es zur Überschreitung maximaler Halbleitertemperaturen kommt. Zum anderen können bei Einsatz einer solchen direkten Überwachung der Chip-Temperaturen ggf. auch Sicherheitsmargen im thermischen Design reduziert und die Chipfläche besser ausgenutzt werden.

Basierend auf Recherchen eines im Vorfeld am KDEE durchgeführten Projekts wurden zwei in Frage kommende Messverfahren zur Online-Temperaturmessverfahren unter Nutzung temperatursensitiver Parameter der Halbleiter näher untersucht.

Eine Abschätzung der erreichbaren Toleranz einer Temperaturmessung auf Basis von Messungen der Sättigungsspannung der eingesetzten IGBTs ergab, dass selbst bei einer Messgenauigkeit von +/-0.1% bei der Spannungsmessung und +/-1% beim Strom der Fehler bei der Temperatur bereits bei +/-10% liegt. Eine höhere Messgenauigkeit ist insbesondere beim Strom nicht mit vertretbaren Mitteln erreichbar, da übliche Messwandler bereits eine Toleranz von +/-1% besitzen. Weiterhin ist eher von ungenauereren Stromwerten auszugehen, da durch die Parallelschaltung von Halbleitermodulen nicht gewährleistet werden kann, dass der exakt gleiche Strom durch beide Module fließt. Die Messung der Sättigungsspannung als temperaturabhängige Größe wurde daher verworfen, da nicht abzusehen war, dass der Kollektorstrom durch ein Modul bzw. einen Halbleiter hinreichend genug zu bestimmen ist um eine exakte Temperaturmessung durchzuführen.

Die Messung der Abschaltverzögerung wurde zunächst an einer Simulation untersucht, wobei deutlich wurde, dass neben der Temperatur sowohl der geschaltete Strom als auch die geschaltete Spannung Einfluss auf die Schaltverzögerungszeit haben. Durch Messungen sowohl an einem diskreten IGBT (siehe Abbildung 2.14) als auch an einem großen IGBT Modul haben die bereits von der Simulation prognostizierten Abhängigkeiten zwischen der Ausschaltverzögerung sowie der Temperatur, dem Ausschaltstrom und der Zwischenkreisspannung bestätigt. Damit wurde die Ausschaltverzögerung als grundsätzlich gut geeigneter Parameter für eine indirekte Messung der Chiptemperatur bewertet. Es wurde jedoch eine Schaltung benötigt,

welche im laufenden Wechselrichterbetrieb ein Erkennen des Anfangs und Endes der Ausschaltverzögerung als „Start“ und „Stop“ Signale erkennt, sowie die Zeit zwischen „Start“ und „Stop“ mit hinreichender Auflösung (mind. 1ns) misst. Eine derartige Schaltung wurde im weiteren Verlauf des Projekts am KDEE entwickelt und in Betrieb genommen.

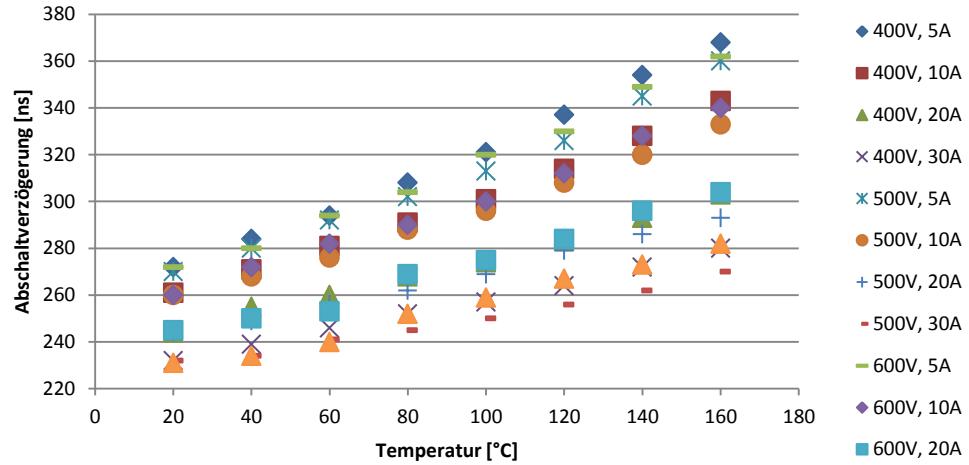


Abbildung 2.14: Abschaltverzögerung eines Infineon IKW40N120H3 IGBTs

In folgender Abbildung ist die entwickelte Schaltung zur Online-Abschaltzeitmessung dargestellt. Neben einem isolierten Gate-Treiber kommt ein zweikanaliger High-Speed-Komparator sowie ein Widerstandsnetz nur Messung der Kollektor-Emitter und Gate-Emitter Spannungen zum Einsatz um die „Start“ und „Stop“ Signale zu erzeugen. Diese werden von einem Time-to-Digital Converter (TDC-GP22 von acam messelectronic) ausgewertet und die Zeitdifferenz über ein isoliertes digitales Interface an den Controller übertragen.

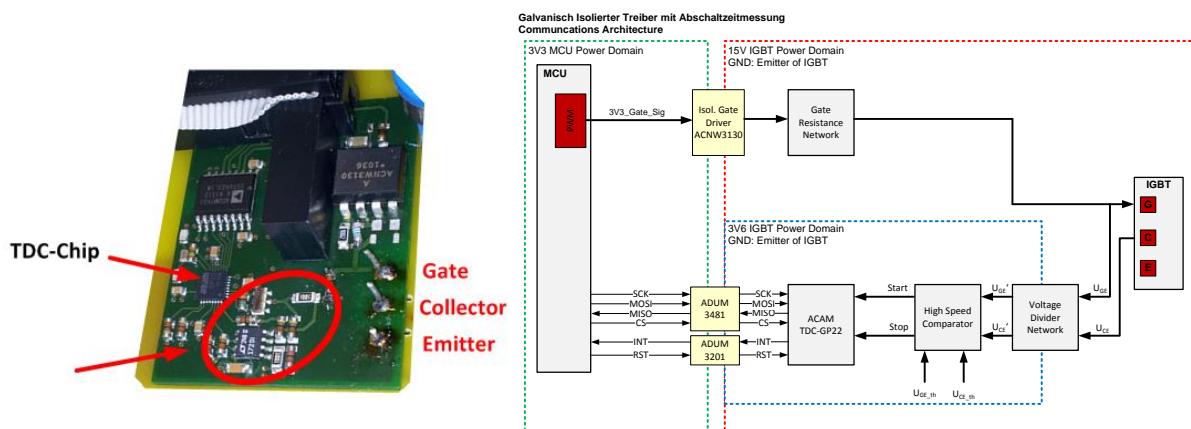


Abbildung 2.15: Blockschaltbild und Foto des aufgebauten IGBT Treibers mit Abschaltverzögerungszeitmessung

Die Funktionsfähigkeit der Treiberschaltung wurde zunächst an einem Testaufbau mit einem diskreten IGBT überprüft. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigten, dass die entwickelte Schaltung in der Lage ist die temperaturabhängige Abschaltverzögerung zu erfassen und auszuwerten. Weiterhin wurde untersucht wie

sich die gemessene Abschaltverzögerungszeit bei Parallelschaltung unterschiedlich temperierter IGBTs verhält. Details hierzu sind in einem gesonderten Bericht dokumentiert.

Zur Demonstration der Online-Tauglichkeit der Temperaturmessung auf Basis der Abschaltverzögerungszeit wurde ein dreiphasiger Wechselrichter mit offenem IGBT Modul aufgebaut. Um sowohl verschiedene Ansteuerverfahren und deren Auswirkung auf die Belastung durch netzfrequente Zyklen (siehe 2.4.1.2) untersuchen als auch die Funktionsfähigkeit der Treiberschaltung zur indirekten Temperaturmessung der Halbleiter demonstrieren zu können wurde die Ansteuerung der Gate-Treiber mittels Raumzeigermodulation sowie die Ansteuerung der Messelektronik (Zeitmessung und ADCs) und Auswertung der gemessenen Signal in einem FPGA realisiert.

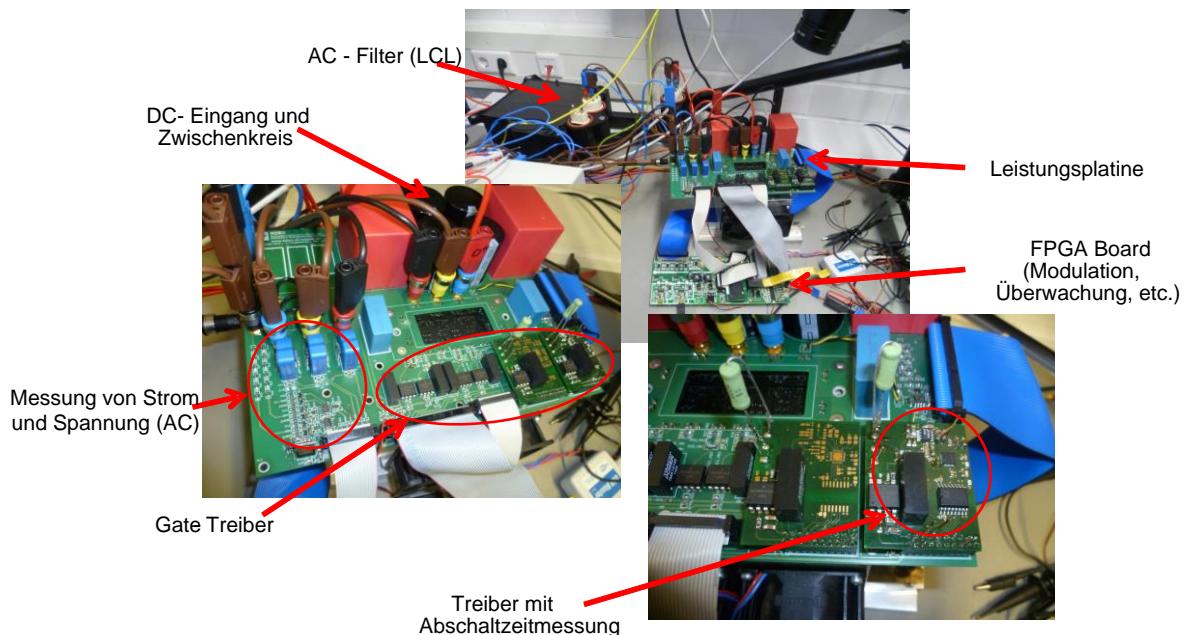


Abbildung 2.16: Laboraufbau eines dreiphasigen Wechselrichters mit offenem IGBT-Modul

In einer Halbbrücke (bzw. am Low-Side Schalter einer Halbbrücke) kommt das im vorigen Abschnitt beschriebene Treibermodul mit integrierter Abschaltzeitmessung zum Einsatz.

Zur Ermittlung der Abhängigkeit von Abschaltverzögerungszeit, Temperatur, DC-Spannung und geschaltetem Strom wurde an verschiedenen Arbeitspunkten die Abschaltverzögerung, die DC-Spannung und der Strom gemessen und vom Regelungssystem auf Basis des FPGAs aufgezeichnet. Parallel hierzu wurde die Chip-Temperatur mittels Infrarot-Thermographie synchronisiert zur Abschaltzeitmessung erfasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.17 dargestellt. Die dargestellten Messausreißer sollten durch geeignete Filterung ausgeschlossen werden können, was jedoch an dieser Stelle nicht näher betrachtet wurde.

Ausgehend von den gemessenen Abhängigkeiten zwischen Ausschaltverzögerungszeit, Temperatur, DC-Spannung und geschaltetem Strom wurde ein einfaches Modell erstellt welches diese Größen in Relation setzt. Durch einen Fitting-Prozess konnten die Parameter des Modells bestimmt und dieses in einem Soft-Mikrocontroller innerhalb des FPGAs implementiert und hinterlegt werden, um eine

Online-Temperaturbestimmung aus den gemessenen Größen  $t_{d(\text{off})}$ ,  $U_{\text{DC}}$ ,  $I_{\text{sw}}$  vornehmen zu können.

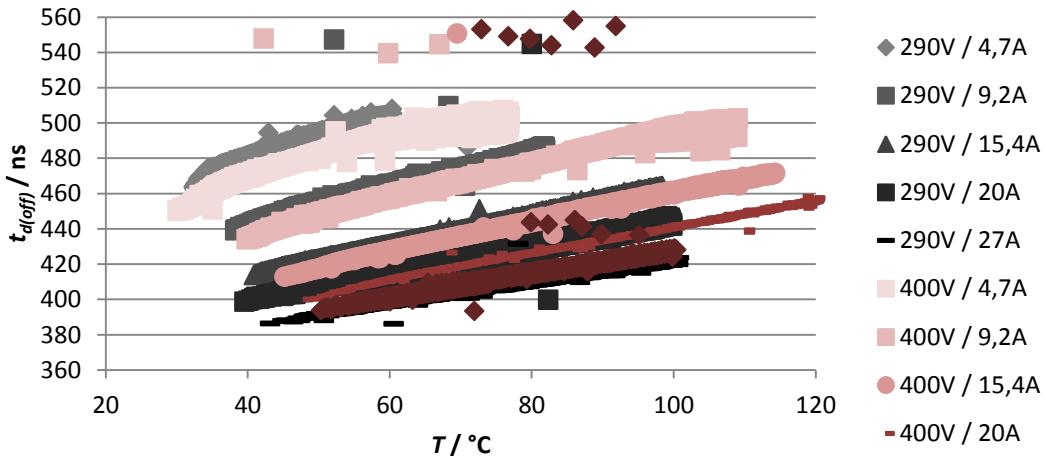


Abbildung 2.17: Messung der Abschaltzeitverzögerung an FS50R12KT4\_B15. Modul im Wechselrichterbetrieb

Ausgehend von den gemessenen Abhängigkeiten zwischen Ausschaltverzögerungszeit, Temperatur, DC-Spannung und geschaltetem Strom wurde ein einfaches Modell erstellt welches diese Größen in Relation setzt. Durch einen Fitting-Prozess konnten die Parameter des Modells bestimmt und dieses in einem Soft-Mikrocontroller innerhalb des FPGAs implementiert und hinterlegt werden, um eine Online-Temperaturbestimmung aus den gemessenen Größen  $t_{d(\text{off})}$ ,  $U_{\text{DC}}$ ,  $I_{\text{sw}}$  vornehmen zu können.

In einem weiteren Versuch wurden die so ermittelten Online-Chip-Temperaturen protokolliert. Erneut wurden zeitlich synchronisiert die Chip-Temperaturen mittels IR-Thermographie aufgezeichnet. Das Ergebnis dieses ersten Versuchs zur Validierung der Messmethodik ist in Abbildung 2.18 dargestellt.

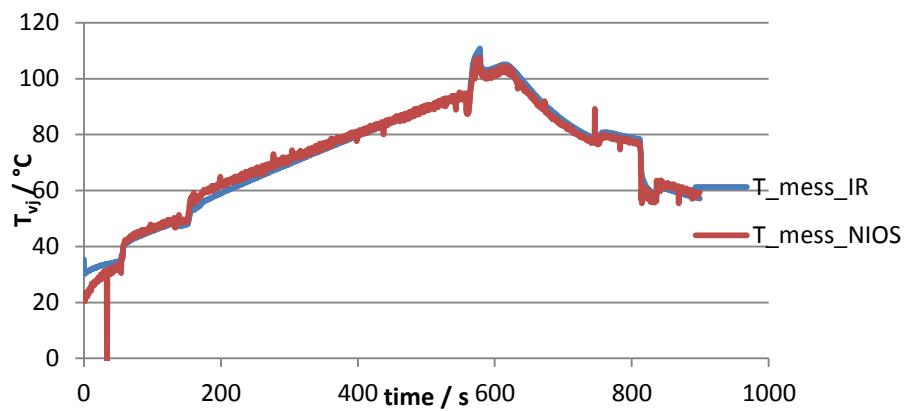


Abbildung 2.18: Vergleich der über die Abschaltverzögerung ermittelten Temperaturen mit den durch IR-Thermographie ermittelten Werte

Im Verlauf des Versuchs wurde sowohl die DC-Spannung als auch der Laststrom variiert, wie aus Abbildung 2.19 zu erkennen ist. Die Messergebnisse zeigen, dass die realisierte Messschaltung zur Online-Bestimmung der Halbleiter temperatu-

ren während des Betriebs der Wechselrichterschaltung über die Abschaltverzöge-  
rungszeit des IGBTs als temperaturabhängige Größe geeignet ist.

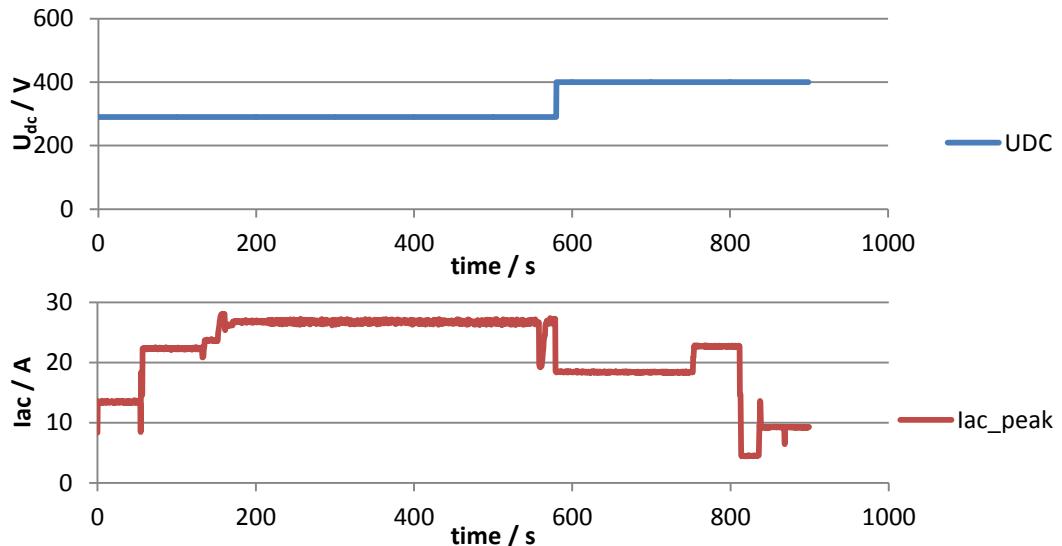


Abbildung 2.19: Verlauf der DC-Spannung sowie des Schalter-Peakstroms während der Messung

### 2.5.1.1. Lüfter

Zur Überwachung der Lüfter kam zum einen eine akustische Überwachung bzw. eine Überwachung der vom Lüfter ausgehenden Vibratoren in Frage sowie zum anderen eine Überwachung der über die Schnittstelle des eingesetzten Lüfters gelieferten Betriebsparameter.

Hierzu wurde am KEEDE sowohl eine akustische Vermessung des Lüfters vor-  
genommen, als auch eine Auswertung der über die Schnittstelle kommunizierten Be-  
triebsdaten bei unterschiedlicher Belastung (u.a. bei erheblicher Sandbelastung)

### 2.5.1.2. AC Leistungsschalter

Zusammen mit SMA wurde ein Lebensdauertest von AC-Leistungsschaltern am KEEDE durchgeführt. Die Schalter wurden stromlos geschaltet um die maximalen mechanischen Schaltspiele zu ermitteln. Hierbei wurden die auftretenden Schaltge-  
räusche aufgenommen, um mögliche Vorankündigungen von Fehlern erkennen zu  
können.



Abbildung 2.20: Messplatz zur akustischen Aufzeichnung



Abbildung 2.21: Schalllabor mit Leistungsschaltern

Die Auswertung der aufgenommenen Schaltgeräusche konnte keine Parameter identifizieren, welche frühzeitig auf einen bevorstehenden Ausfall der Leistungsschalter schließen lassen.

## 2.6. Untersuchungen zur Integration von PV-Großkraftwerken in AC-Übertragungsnetze

In den Arbeitspaketen 1.3 und 3.3 wurden verschiedene Aspekte der Integration von PV-Großkraftwerken in AC-Übertragungsnetze betrachtet, wobei der Fokus hier auf der statischen Spannungshaltung lag. Weitere Aspekte der von regenerativen Großkraftwerken durch die Grid Codes geforderten Eigenschaften (z.B. FRT) wurden daher hier nicht näher untersucht.

Aus der Betrachtung der grundlegenden Zusammenhänge der Spannungshaltung anhand eines vereinfachten Übertragungssystems lassen sich hinsichtlich den mit der Spannungshaltung verbundenen Eigenschaften eines PV-Kraftwerks (hier besonders Blindleistungsfähigkeit der Wechselrichter) für die GigaPV-Standorte keine über den derzeitigen Stand der Technik hinausgehende Anforderungen an die PV-Systemtechnik ableiten. Allerdings wurden hier, da keine konkreten Detail-Informationen über mögliche Netzanschlusspunkte zur Verfügung standen, allgemein Aspekte hinsichtlich schwacher Netze betrachtet. Genaue Aussagen sind natürlich nur mit einer detaillierten Einzelfall-Betrachtung möglich.

Im Rahmen der Projektierung eines PV-Großkraftwerks und dessen Netzanbindung müssen daher die Anforderungen der Netzbetreiber entsprechend auf die Komponenten bzw. Betriebsmittel des Kraftwerks heruntergebrochen werden. Die Ergebnisse einer Recherche bzgl. realisierter Projekte zeigen Beispiele, wie mit aktuell verfügbarer PV-Systemtechnik in Kombination mit bewährten Netzbetriebsmitteln (u.a. Kompensationsanlagen) eine Netzintegration von lastfernen PV-Großkraftwerken realisiert werden kann.

### **3. Zusammenfassung**

Neben der Optimierung von Systemkonzepten, Solarmodulen und Wechselrichtern stand die deutliche Kostenreduktion von PV-Großanlagen im Sonnengürtel der Erde im Fokus des Projekts GigaPV. Gemeinsam mit den Kooperationspartnern steuerte die Universität Kassel zu den jeweiligen Aufgabenstellungen ihre Ergebnisse bei.

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets des Teilverhabens konnten zunächst durch die Recherche- und Forschungsergebnisse des CESRs die Anforderungsprofile an PV-Großkraftwerke im globalen Sonnengürtel formuliert werden. In einem Abschlussbericht zu diesem Arbeitspaket wurden sämtliche Unterlagen, Dokumentationen und Datenanalysen gesammelt aufgeführt und den darauf aufbauenden Arbeitspaketen zur Verfügung gestellt. Neben exemplarischer Standorte konnten Stressfaktoren für PV-Anlagen spezifiziert und Verläufe von kritischen Eigenschaften (u.a. Temperatur, Sand, Wind, extreme Wetterbedingungen, UV-Strahlung, etc.) erarbeitet werden.

Die durch das erste Arbeitspaket zur Verfügung gestellten Standortcharakteristika unterstützten schließlich die Arbeiten am Arbeitspaket 3.5. In diesem wurde unter anderem die Implementierung von Vorhersage- und Simulationsmodellen zur Vorhersage von Halbleiterbelastungen untersucht. Simulationen der auftretenden Halbleiterbelastungen wurden für eine Reihe von Standorten im globalen Sonnengürtel durchgeführt. Basierende auf diesen Simulationen konnten Vorschläge zur Kühl-systemregelung erarbeitet werden um die Belastungen durch Temperaturwechsel weiter zu reduzieren. Ebenso wurden Bauteilbelastungen aufgrund netzfrequenter Temperaturtransienten an IGBT-Modulen betrachtet. In diesem Arbeitspaket wurde weiterhin die Möglichkeit einer umfassenden Fernüberwachung (Condition Monitoring) von PV-Großanlagen untersucht und bewertet. Hierbei wurden verschiedenste Ansätze betrachtet und teilweise praktisch erprobt. Die Implementierung eines Verfahren zur Online-Temperaturmessung in IGBT-Modulen an einem Laboraufbau schloss die Arbeiten des Teilverhabens ab.

Zielsetzung des Arbeitspakets 3.7 war die Untersuchung von Wandlertopologien und deren Einsatz bei erhöhter PV-Systemspannung unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Aspekte. Durch den systematischen Vergleich verschiedenster Topologieformen konnten schließlich begründete Auslegungsempfehlungen für den geplanten Prototyp ermittelt werden. Eine Abschätzung der Kosten auf Basis bekannter IGBT-Halbleiter ermöglichte neben einer technologischen auch eine wirtschaftliche Planung. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse zur Serienschaltung von IGBTs konnte eine entsprechende Schaltung geplant, ausgelegt und aufgebaut werden, so dass der im Feldtest eingesetzte PV-Großwechselrichter vom Projektpartner SMA realisiert werden konnte.