

Schlussbericht



LHUVkraft

Zuwendungsempfänger: Ingenieurbüro Hoffmann GmbH Rudolf-Walther-Str. 4 06188 Landsberg OT Peißen	 INGENIEURBÜRO HOFFMANN	Förderkennzeichen: 03EE2038D
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Leistungshalbleiter- und Umrichter-Innovationen zur verlustoptimierten und leistungsstarken Energieerzeugung mit Windkraft Teilvorhaben: Innovative und leistungsstarke Power Stacks für den Einsatz in Windenergieanwendungen		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 bis 31.03.2025		
Autoren: Dr. Nils Hoffmann, Dr. Kristina Köster		
Datum: 29.09.2025		

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Überblick Gesamtvorhaben	4
1.1 Ziele Gesamtvorhaben	4
1.2 Ergebnisse Gesamtvorhaben	5
2 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Teilvorhabens	7
2.1 Aufgabenstellung.....	7
2.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde und Stand der Technik, an den angeknüpft wurde.....	11
2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	14
2.4 Zusammenarbeit der Partner und mit anderen Stellen.....	16
3 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und des voraussichtlichen Nutzens	17
3.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen und Schnittstellen	17
3.2 Arbeitspaket 3: SiC Power Stack.....	17
3.3 Arbeitspaket 4: SiC Wind-Umrichter	35
3.4 Arbeitspaket 5: Prototyperprobung Windenergieanlage.....	42
3.5 Arbeitspaket 6: Systembetrachtung und Effizienzrechnung	65
3.6 Arbeitspaket 7: Bewertung der Forschungsergebnisse und der energetischen Gesamtbilanz 77	
3.7 Zusammenfassung der Zielerreichung im Teilvorhaben	81
4 Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	83
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	83
6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses	83
7 Liste der Abbildungen	84
8 Liste der Tabellen	86



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem obengenannten Förderkennzeichen und unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich gefördert.

Die Verantwortung für die Inhalte des Abschlussberichts liegt bei den genannten Autoren.

1 Überblick Gesamtvorhaben

1.1 Ziele Gesamtvorhaben

Der Trend zu höheren Leistungen ist bei Windenergieanlagen ungebrochen (Abbildung 1). Dies gilt nicht nur für Offshore- sondern auch für Onshore-Windenergieanlagen. Nur so können bei beschränkt verfügbaren Standorten die Ausbauziele und die erforderliche Senkung der Stromgestehungskosten aus regenerativen Energiequellen erreicht werden. Mit zunehmender Turmhöhe und Leistung führt der konventionelle Anlagenansatz von Onshore-Windenergieanlagen, der den Transformator am Turmfuß positioniert, zu hohen Kabelverlusten. Moderne Anlagenentwürfe sehen daher den Transformator und die gesamte Leistungselektronik in der Gondel vor. Dadurch lassen sich die Kabelverluste um mehrere Prozent der Anlagenleistung reduzieren. Mit zunehmender Anlagenleistung werden dadurch aber die Anforderungen an die Leistungsdichte für die Umrichter immer strenger.

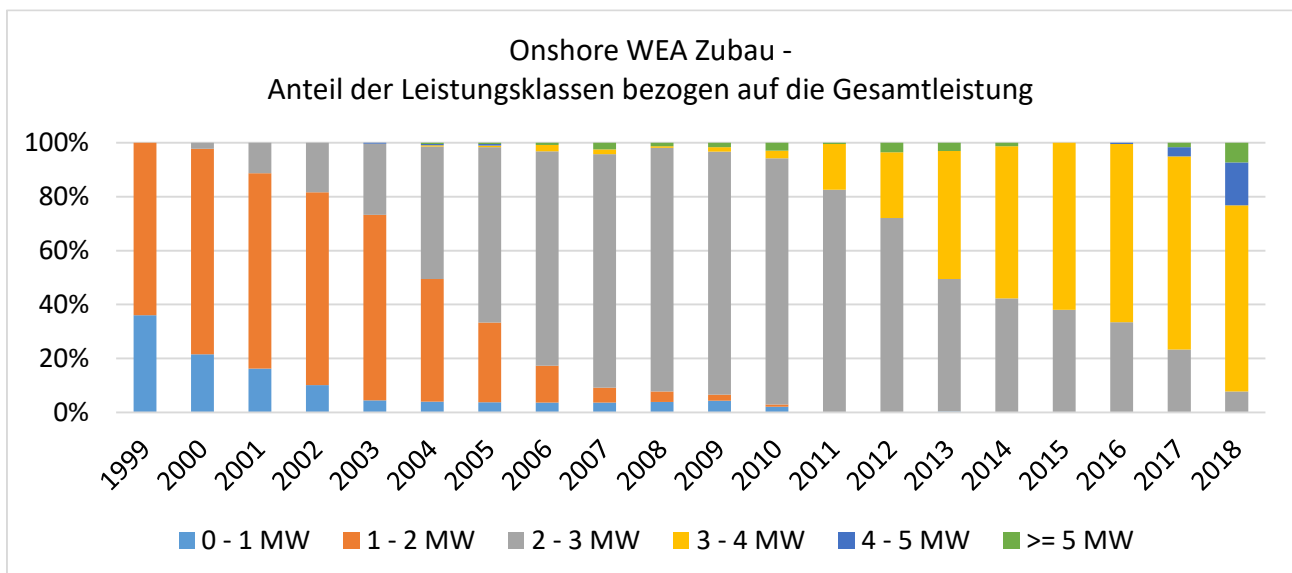


Abbildung 1: Entwicklung der Leistung von Onshore-Windenergieanlagen (www.windmonitor.de 2021)

An dieser Stelle hat dieses Vorhaben angesetzt. Mit neuen Leistungstransistoren kann es gelingen, die Schaltfrequenz des Umrichters signifikant anzuheben. Das wiederum erlaubt eine erhebliche Reduktion von Masse und Volumen der stromtragenden Komponenten wie Netzdrosseln, der platzmäßig dominanten Komponente im Stromrichter, Motordrosseln, Stromschienen und Schaltgeräten.

Um dieses Ziel zu erreichen, waren folgende Schritte erforderlich:

- Erforschung eines 2,3 kV SiC-MOSFET Moduls, das den extrem hohen Anforderungen an Lastwechselfestigkeit und Robustheit unter aggressiven Last- und Umgebungsbedingungen, wie sie für Windenergieanlagen typisch sind, gerecht wird. Diese Arbeiten erfolgten durch den Projektpartner Infineon.



- Erforschung der Schaltungs- und Ansteuertechnik, um diese Hochleistungs-MOSFETs einerseits verlustoptimal zu betreiben, andererseits die durch hohe Strom- und Spannungsgradienten von SiC-Leistungshalbleitern hervorgerufenen Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der Isolationsbeanspruchungen der Wickelgüter zu beherrschen. Diese Arbeiten erfolgten durch den Projektpartner Universität Rostock.
- Umsetzung dieser Erkenntnisse in einem Power Stack mit hoher Schaltfrequenz und hohem Ausgangsstrom mit der für Windenergieanlagen erforderlichen hohen Zuverlässigkeit. Diese Arbeiten erfolgten durch den Projektpartner Ingenieurbüro Hoffmann GmbH.
- Integration des Power Stacks in einen Umrichter hoher Leistungsdichte und des Umrichters in eine Windenergieanlage, um das Verhalten von SiC-Leistungshalbleitern und Umrichtern mit sehr kleinen Filtern in der Windenergieanlage abzusichern und so die Einsetzbarkeit unter den hohen Anforderungen an Power Quality und Netzfrendlichkeit zu gewährleisten. Diese Arbeiten erfolgten durch den Projektpartner Nordex.

Begleitet wurden die Arbeiten durch Simulationen auf Systemebene durch die Universität Rostock, die neben der in diesem Vorhaben zu untersuchenden Onshore-Windenergieanlage mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator auch andere Topologien umfassten und damit eine vergleichende Bewertung des Potentials von SiC-MOSFET in Windenergieanlagen allgemein erlauben.

1.2 Ergebnisse Gesamtvorhaben

Folgende wesentliche Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes erzielt:

- Die Technologie für ein 2,3kV SiC-MOSFET-Modul mit hoher Lastwechselfestigkeit für Wind-Anwendungen wurde auf Modulebene nachgewiesen, so dass darauf aufbauend eine Produktentwicklung gestartet werden kann (AP 2).
- Erste Konzepte zur Integration von Schutzfunktionen in ein SiC-MOSFET-Modul und ihrer Ansteuerung wurden definiert und an einfachen Testmustern untersucht, so dass eine Entscheidung über eine Umsetzung in zukünftigen Forschungsarbeiten getroffen werden kann (AP 2).
- Das Potential hybrider Module mit SiC- und Si-Chips wurde quantifiziert und die Herausforderungen identifiziert. Lösungswege wurden aus akademischer Sicht aufgezeigt (AP 2).
- Ansteuerkonzepte für SiC-MOSFET in Hochleistungsmodulen sind so weit erforscht, dass über ihre Einsetzbarkeit in Serienprodukten entschieden werden kann (AP 3).
- Das Funktionsmuster eines Power Stack hat den vollumfänglichen Reifegrad für die Erprobung in einer Windenergieanlage erreicht (AP 3).



- Die Technologie für einen 1,6 MW DFIG-Si-Umrichter für 5 MW Wind-Anwendungen wurde mit 1,7 kV IGBT Basis-Technologie konzipiert (AP 4) und zwei Funktionsmuster wurden aufgebaut.
- Beide Funktionsmuster wurden unter windturbinennahen Testumgebungen auf Systemebene qualifiziert (AP 5).
- Die Technologie für einen 2,3 MW DFIG-Si-Umrichter für 6 MW Wind-Anwendungen wurde mit 2,3-kV-SiC Basis-Technologie konzipiert (AP 4). Das Funktionsmuster wurde aufgebaut und technisch in Betrieb genommen.
- Ein erstes Funktionsmuster eines Wind-Umrichters mit kleinen Filterdrosseln und SiC-Leistungshalbleitern wurde ausgelegt und technisch bewertet (AP 4).
- Der SiC-Umrichter wurde unter applikationsnahen Bedingungen auf einem qualifizierten Umrichter-Prüfstand erprobt (AP 5).
- Die durch SiC-MOSFET in Windenergieanlagen mögliche Leistungs- und Effizienzsteigerung ist quantifiziert (AP 6).

2 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Teilvorhabens

2.1 Aufgabenstellung

Robustes SiC Wind Modul

Leistungshalbleiter sind Schlüsselbauelemente der Umrichter für Windenergieanlagen. Halbleiterinnovationen sind damit auch der Treiber für Innovationen im Umrichter und damit im gesamten elektrischen System. Wichtige Kriterien für den Einsatz in Windenergieanlagen sind Spannungsklasse, Nennstrom, Verluste (insbesondere Schaltverluste), Lastwechselfestigkeit und Robustheit.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung kamen für Wind-Umrichter sehr hoher Leistung vor allem 1700 V IGBT im PrimePack™ zum Einsatz. Die Einführung der XHP™ Bauform in naher Zukunft wurde prognostiziert (siehe Abbildung 3). Neben Modulen mit konventioneller Aufbautechnik (gelötete Chips und Aluminium Bonddrähte) waren auch die extrem lastwechselfesten Module mit gesinterten Silizium-Chips und Kupfer-Bonddrähten verfügbar. Für die maximale Leistung pro Strom für Niederspannungsumrichter notwendige Leistungsklasse um ca. 2300 V war bei Antragstellung dieses Projektes absehbar nur mit konventioneller Aufbautechnik verfügbar – hier ergab sich aus Sicht der Wind-Umrichter eine Lücke.

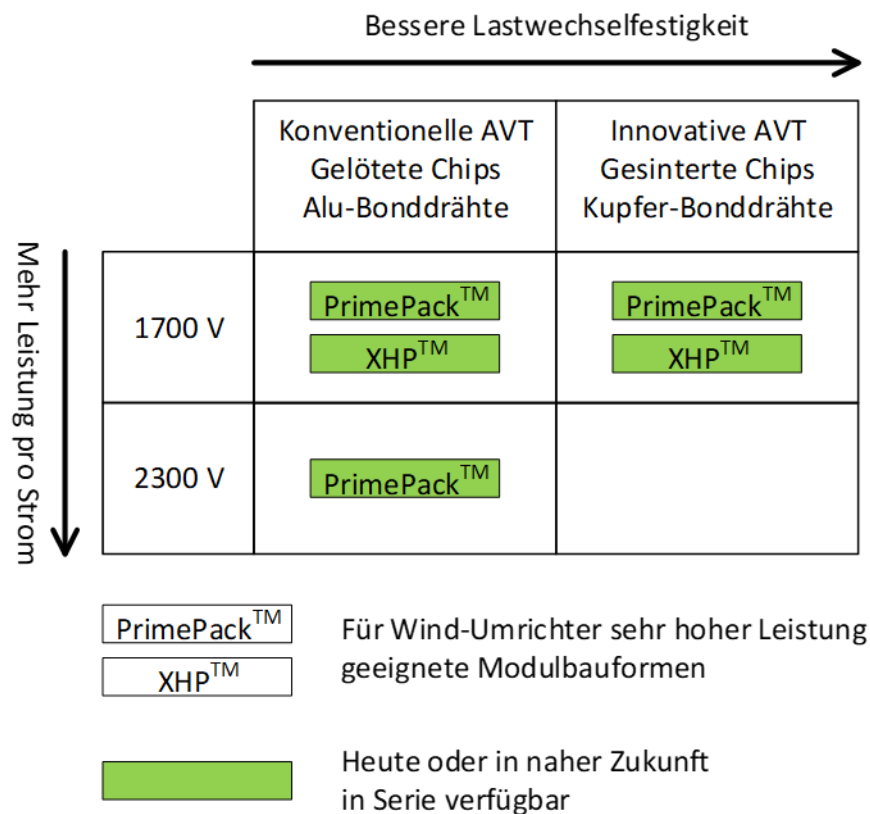


Abbildung 2: Si-IGBT Module für Wind-Umrichter zum Zeitpunkt der Antragstellung im Jahr 2021

Module mit 1700 V Si-IGBT und Si-pin-Dioden haben so hohe Schaltverluste, dass Schaltfrequenzen deutlich über 3 kHz nicht sinnvoll erreichbar sind. Selbst eine starke Reduktion der Stromdichte hat nur einen begrenzten Effekt, weil die Reverse Recovery Ladung der Dioden mit abnehmendem Strom nur unterproportional zurückgeht. Bei Zweipunktumrichtern – die wegen ihres einfachen Leistungsteils und der übersichtlichen Steuerung weiterhin sehr beliebt sind – sind daher große Netzdrosseln erforderlich. Auch durch versetzte Taktung parallelgeschalteter Umrichter lassen sich diese nicht verkleinern, weil die sogenannten Differential-Mode-Ströme begrenzt werden müssen.

An dieser Stelle können SiC-MOSFETs ihre Stärke ausspielen. Sie haben signifikant kleinere Schaltverluste und zudem eine weitgehend lineare Abhängigkeit der Schaltverlustenergie vom Strom. Da zudem die Durchlasscharakteristik ohmsch ist, sind die Verluste bei kleinem Strom sehr klein.

High Power Module müssen, wenn sie mit SiC-MOSFETs ausgestattet werden, einen sehr symmetrischen Aufbau aufweisen, um eine gleichmäßige Stromverteilung zu gewährleisten und nicht Oszillationen zwischen den Chips anzuregen. Das XHP™ Modul ist hierfür eine geeignete Bauform. Diese Zuversicht speiste sich bei Antragsstellung u.a. aus den vielversprechenden Erfahrungen aus dem abgeschlossenen SiCuM Forschungsprojekt (FKZ 16ES0540), in dem für eine Straßenbahn-Anwendung ein 1,7 kV SiC-MOSFET Modulmuster von Infineon in einem XHP™ 2 Gehäuse (Abbildung 3) bis zum Laboraufbau elektrisch erforscht wurde (unten α -Modul genannt), das auch als Ausgangspunkt für dieses Projekt diente. Bei unveränderter Schaltfrequenz von 1 kHz und gleicher Leistung wurde eine Volumenreduktion von 30 % im Umrichter-Aktivteil demonstriert, aber auch großes Verbesserungspotential am Halbleiter, dem inneren Modulaufbau und an der Aufbau- und Verbindungstechnik zur weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit und Robustheit aufgedeckt.

Mit der Entwicklung der XHP™-Plattform hat Infineon eine neue Standardbauform entwickelt. Diese Gehäusebauform wurde von anderen Leistungshalbleiteranbietern übernommen. Sie bedient folgende steigenden Systemerwartungen aus Sicht des Umrichters: höhere Flexibilität, Stromdichte und Effizienz bei gleichzeitiger Steigerung der Robustheit und Zuverlässigkeit sowie Reduzierung der Systemkosten.



Abbildung 3: XHP™ 2 Modul – geeignete Bauform für schnell schaltende Hochvolt SiC MOSFET

Gegenüber dem in SiCuM erreichten Erkenntnisstand musste vor allem das Thema Lastwechselfestigkeit in Angriff genommen werden. Bei voller Ausnutzung der Möglichkeiten der SiC-



Technologie ist, insbesondere wegen der großen Temperaturhübe und des steiferen Elastizitätsmodus der SiC-Halbleiter, eine Reduzierung der Lastwechselfestigkeit gegenüber dem Einsatz von Si Bauelementen mit konventioneller Aufbautechnik zu beobachten. Wegen der hohen Kosten der SiC-Chips ist eine Reduktion des Stroms, und damit der Temperatur sowie der Temperaturhübe, kommerziell nicht attraktiv. Daher wurde im Vorhaben LHUVkraft erforscht, wie eine Aufbau- und Verbindungstechnik mit hoher Lastwechselfestigkeit bei SiC-Chips realisiert werden kann. Wegen der erforderlichen Änderungen der Chipmetallisierung betraf dies nicht nur die Back-End- sondern auch die Front-End-Fertigung.

Ebenfalls SiC-spezifisch ist die eingeschränkte Leitfähigkeit des Inversions-Kanals. Bei 1,7 kV SiC-MOSFET trägt der Kanalwiderstand zu etwa 30% zum gesamten R_{DSon} bei. Es gibt daher eine hohe Motivation, durch eine besonders große Kanalweite den Kanalwiderstand möglichst klein zu halten. Dies führt aber zu einem hohen Sättigungsstrom, so dass der SiC-MOSFET die vom Si-IGBT gewohnte Kurzschlusszeit von 10 μ s bei weitem nicht erreicht. In diesem Vorhaben sollten daher Verfahren erforscht werden, die eine verbesserte Kurzschlussrobustheit des Systems „MOSFET + Treiber“ gewährleisten und dabei einen hohen Sättigungsstrom des MOSFETs selber zulassen. Dabei sollten Verfahren mit einer schnellen Kurzschlusserkennung durch den Treiber erprobt werden.

Sogenannte „Full-SiC“-Module, bei denen die IGBT- und die Dioden-Chipfläche eines konventionellen IGBT-Moduls allein durch SiC-MOSFET ersetzt wird, versprechen – wenn die diversen auch in diesem Vorhaben adressierten Probleme erfolgreich gelöst werden können – die höchste Leistungsfähigkeit. Allerdings sind die Kosten von SiC-Chips bis auf weiteres erheblich höher als die von Si-Chips. Es stellt sich daher die Frage, ob mit einem hybriden Ansatz aus Si- und SiC-Chips ein besseres Verhältnis aus Kosten und Performance erreicht werden kann. Stand der Technik sind Module, in denen Si-IGBT mit SiC-Dioden kombiniert werden. In diesem Vorhaben sollte durch die Universität Rostock erforscht werden, welches Potential sich für Wind-Umrichter ergibt, wenn in einem Modul Si-IGBT und SiC-MOSFET kombiniert werden. Die SiC-Chipfläche steht dann nicht nur im Diodenbetrieb, sondern auch zur Reduktion bei kleinem Strom im Transistorbetrieb und zur Reduktion der IGBT-Ausschaltverluste zur Verfügung.

Erforschung Power Stack

Der Einsatz eines SiC Wind Moduls in der Bauform eines XHP™ 2 Moduls in Wind-Umrichtern erfordert erhebliche Anstrengungen im eigentlichen Leistungsteil des Umrichters, dem Power Stack.

Stand der Technik bei Wind-Umrichtern sind PrimePack™ Module. Diese Module sind jedoch für den Einsatz von Si-Bauelementen optimiert und eignen sich wegen ihres relativ unsymmetrischen Aufbaus nur stark eingeschränkt für SiC-MOSFET. Die SiC-taugliche XHP™ 2 Bauform hat ein deutlich anderes Verhältnis von Länge zu Breite (PrimePack™: 250 mm x 89 mm / XHP™ 2: 144 mm x 100 mm) und eine geringere Fläche der Bodenplatte. Dies erfordert eine ganz neue konstruktive Ausformung der



Zwischenkreisverschiebung, der Kühlplatte und aller anderen mechanischen Komponenten des Power Stacks. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Anforderung an extrem niederinduktive Kommutierungskreise dar. Die Art der Zwischenkreisgestaltung hat dabei auch deutliche Auswirkungen auf die Verkopplung der Phasen untereinander und damit sowohl auf Kommutierungsvorgänge, wenn mehrere Phasen nahezu zeitgleich schalten, als auch auf die Spannungssteilheit am Umrichterausgang.

Das Schaltverhalten von SiC-MOSFETs ist – wie bereits oben erläutert – gut durch die Ansteuerung einstellbar. Dabei muss ein Kompromiss aus Schaltverlusten auf der einen und Überspannungen und Oszillationen auf der anderen Seite gefunden werden. Ausgehend von der robusten Einstellung über Gate-Ladewiderstand und Gate-Entladewiderstand wurden alternative Ansteuerprinzipien mit dem Ziel geringerer Schaltverluste bei Einhaltung des sicheren Arbeitsbereichs des MOSFETs und der Anforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) des Umrichters erforscht.

Die besonders kompakte Ausführung von Wind-Umrichtern ohne die Parallelschaltung von Power Stacks erfordert die direkte Parallelschaltung von SiC-MOSFET Modulen. Die Parallelschaltung von SiC-MOSFETs ist grundsätzlich möglich und erfolgt auch innerhalb des Moduls. Die sehr gute Steuerbarkeit des MOSFETs über das Gate und die hohe intrinsische Dynamik führen allerdings dazu, dass eine oszillationsfähige Anordnung entsteht, die durch kleinste Asymmetrien angeregt wird. Das Verständnis dieser Vorgänge ist daher essentiell für eine erfolgreiche Parallelschaltung von SiC Modulen, wie sie in diesem Vorhaben erforscht und erfolgreich demonstriert wurde.

Bevor der Power Stack im Umrichter integriert und später dann in der Windenergieanlage betrieben werden kann, muss er im Prüffeld im Frequenzbetrieb laufen. Ziel des Vorhabens war es daher, dass alle Komponenten bis hin zum thermisch eingeschwungenen Zustand belastet werden. Damit konnten insbesondere Effekte getriggert werden, die durch die Temperaturabhängigkeit der Verluste auftreten und damit erst bei Eigenerwärmung sichtbar werden.

Erforschung Wind-Umrichter

Die höheren erreichbaren Schaltfrequenzen mit SiC-MOSFET ermöglichen eine Reduktion der Induktivität und damit von Masse und Volumen der Netzdrossel. So kann die geforderte höhere Leistungsdichte der Umrichter erreicht werden. Insbesondere beim sogenannten „fault-ride-through“ (FRT) wird der Umrichter aber auch deutlich sensibler auf Änderungen der Netzspannung reagieren. Daraus ergab sich der umrichterseitige Forschungsbedarf.

Durch die höheren Schaltfrequenzen sind nicht nur kleinere Induktivitäten möglich, es werden sich auch die Eisenverluste der Drosseln und – wegen der Erhöhung des Leitungswiderstands durch den Skin-Effekt – möglicherweise auch die Oberschwingungsinduzierten Kupferverluste erhöhen. Durch geeignete Wahl der Materialien und der Geometrie ist zu gewährleisten, dass die Netzdrossel diesen gegenüber dem Stand der Technik deutlich verschärften Anforderungen genügt.



Die höhere Dynamik des Leistungsteils muss auch durch die Steuerung beherrscht werden. Durch die hohe Schaltfrequenz sind häufigere neue Sollwerte für die Umrichterspannung möglich, die Abtastrate der Regelung kann angehoben werden. Hardware und Software müssen aber auch in der Lage sein, mit den deutlich verkürzten Zykluszeiten arbeiten zu können. Eine Steuerung, die diesen Anforderungen genügt, wurde im Projekt erforscht.

Schließlich musste zur Integration des Power Stacks, der Netzdrosseln, der Schaltelemente und der Steuerung ein Umrichterschrank entwickelt werden.

Prototypenprobung Windenergieanlage

Zur Verifikation des Systemverhaltens muss der Umrichter im elektrischen Gesamtsystem, das auch den Generator und den Transformator umfasst, erprobt werden. Diese Erprobung ist deshalb so wichtig, weil bei einer späteren Verwertung der Ergebnisse dieses Vorhabens ein Stromrichter für die nächste Generation Windenergieanlagen entstehen soll, der bei unverändertem Platzbedarf deutlich mehr Leistung vorhält. Eine Rückfallebene mit konventioneller Si-IGBT Technologie würde in der Gondel nicht mehr einbaubar sein und existiert damit de Facto nicht. Daher muss gewährleistet sein, dass der SiC Wind-Umrichter in der Gesamtanlage tatsächlich voll funktional ist. Das Arbeitspaket umfasste daher eine entsprechende umfangreiche Messkampagne.

Systembetrachtung und Effizienzrechnung

Auf Basis der erreichten Durchlass- und Schaltverluste, des für die Parallelschaltung erforderlichen Deratings und der thermischen Daten des Systems aus Modul und Kühlkörper konnten die erforderlichen Auslegungsrechnungen durchgeführt werden, um so das Leistungsvermögen des SiC Umrichters zu ermitteln.

Dabei wurden sowohl Nordex-spezifische Anlagen gerechnet als auch, zur Verallgemeinerung der Ergebnisse, generische Anlagen mit doppeltgespeisten Asynchrongeneratoren (englisch Double-fed induction generator, kurz DFIG) und Vollumrichter-WEA betrachtet.

2.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde und Stand der Technik, an den angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt der Antragstellung war der Wirkungsgrad der elektrischen Komponenten einer Onshore-Windenergieanlage zunehmend in den Fokus geraten. Bei einem konventionellen Onshore-Anlagendesign befinden sich Transformator und Stromrichter im Turmfuß. Die Kabel zum Generator befinden sich daher auf der Niederspannungsseite, was zu hohen Strömen und Verlusten von mehreren Prozent der Wirkleistung führt.

Inzwischen sind führende WEA-Hersteller dazu übergegangen, den Transformator in die Gondel zu platzieren. Die Turmkabel sind dann auf Mittelspannungsniveau und der Strom im Kabel reduziert sich

auf weniger als 5%, was sowohl Kabelkosten als auch -verluste spart. Neben dem Transformator muss dann auch der gesamte Umrichter in die Gondel verlegt werden. Die Umrichtertopologie wird gegenüber dem Stand der Technik nicht verändert.

Dem Vorteil des geringeren Kabelstroms steht nun allerdings der Nachteil gegenüber, dass der Bauraum in der Gondel viel knapper als im Turmfuß ist. Besonders problematisch wird dies, wenn eine Leistungserhöhung bei unveränderter Gondel erfolgen soll, weil die Gondel aus Transportgründen nicht weiter vergrößert werden kann (Abbildung 4). Hilfsweise könnte die Gondel in zwei Teile geteilt oder der Transformator unter die Gondel gehängt werden – alles Maßnahmen, die den Montageaufwand auf der Baustelle vergrößern, zusätzliche Schnittstellen schaffen, damit die Fehleranfälligkeit erhöhen und zu Kostensprüngen führen. Für alle Komponenten innerhalb der Gondel besteht daher ein großer und mit größer werdender Anlagenleistung zunehmender Druck, die Leistung ohne Volumenanstieg zu erhöhen, d.h. die Leistungsdichte deutlich zu steigern.



Abbildung 4: Transport einer Gondel durch die Rostocker Südstadt

Das Volumen des Umrichters wird maßgeblich durch die Netzdrossel bestimmt (Abbildung 5). Die erforderliche Induktivität der Netzdrossel ergibt sich aus der Schaltfrequenz des Umrichters.

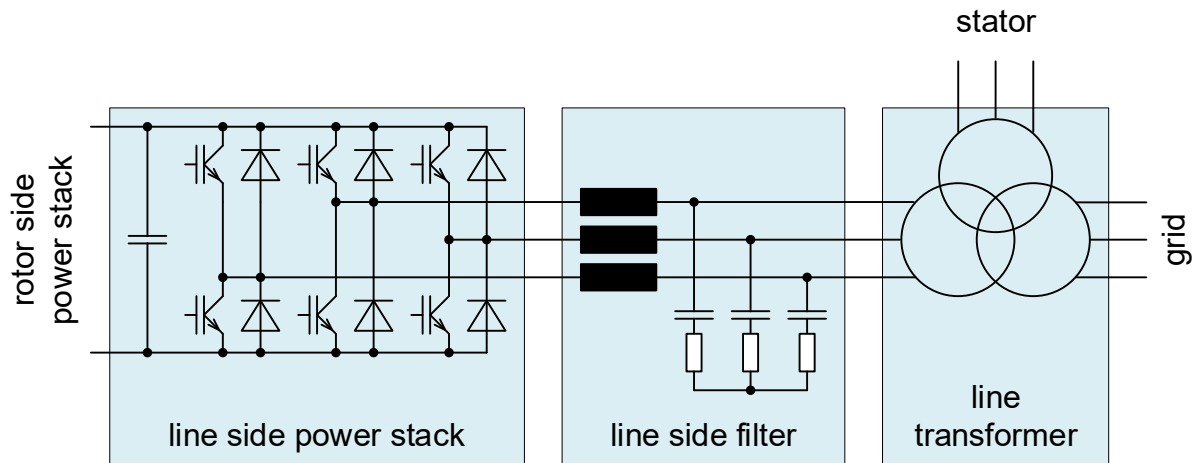


Abbildung 5: Konventioneller netzseitiger Stromrichter einer DFIG WEA

Stand der Technik für Windenergieanlagen sind Umrichter mit 1,7 kV PrimePack™ Modulen. Mit einem PrimePack™ Modul pro Phase lässt sich (je nach IGBT Typ, Auslegung, Blindleistungsanforderung, usw.) eine Umrichterleistung von 500 bis 1.000 kW erreichen. Für die erforderliche Anlagenleistung von 4 MW aufwärts sind also mehrere PrimePack™ Module pro Phase erforderlich, selbst wenn bei einer DFIG nur ein Teil der Leistung über den Umrichter fließt. Für die Umsetzung gab es verschiedene Möglichkeiten, die im Projekt untersucht wurden

- Ein Umrichter mit einem Power Stack:

Innerhalb des Power Stacks werden IGBT-Module parallelgeschaltet (Abbildung 6). Durch die Parallelschaltung innerhalb des Stacks kann das Schalten so präzise erfolgen, dass keine Entkopplungsdrosseln notwendig sind. Die Netzdrossel entspricht der synchron taktenden parallelgeschalteten Stacks. Da auf die Entkopplungsdrosseln verzichtet werden kann, ist der Gesamtaufwand für Drosseln jedoch geringer. Bei mehr als zwei parallelgeschalteten Modulen werden die Stacks allerdings recht groß und schwer.

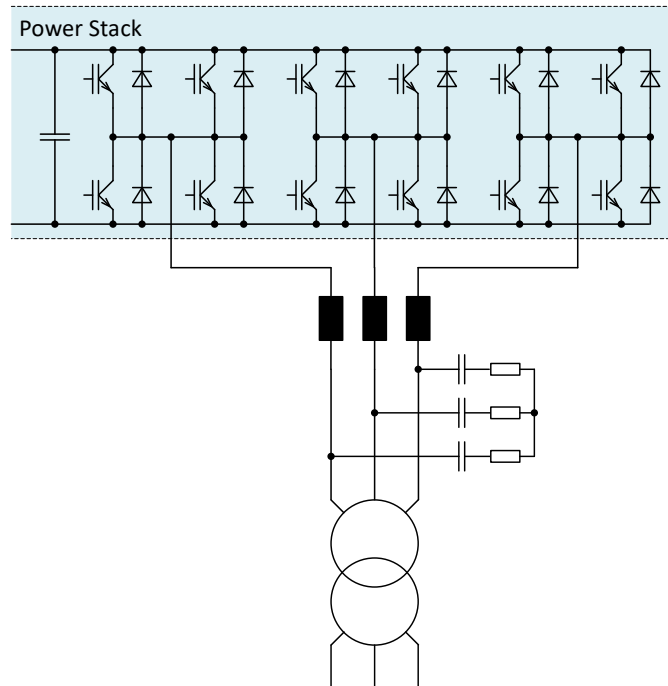


Abbildung 6: Wind-Umrichter (nur Netzseite) – Parallelschaltung von IGBT-Modulen in einem Power Stack

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Schlüssel zum Erfolg eines jeden Projektes ist eine Projektplanung, die die komplexen Aufgaben und Abhängigkeiten zwischen den Partnern effizient strukturiert. Einen Überblick über die dafür gewählte Projektstruktur der verschiedenen Arbeitspakete (AP) zeigt Abbildung 7. Ausgehend von der Analyse der Anforderungen und Schnittstellen in AP 1 wurden die Hauptforschungsthemen in den parallelen AP 2, AP 3, AP 4 vorangetrieben. Das in AP 2 erforschte robuste SiC Wind-Modul fand dabei Verwendung im Power Stack aus AP 3, der wiederum das Kernelement des Umrichters aus AP 4 war. Alle diese Arbeitspakete mündeten in der Prototypenerprobung des gesamten elektrischen Systems einschließlich des Generators. Systembetrachtungen und Effizienzrechnungen zeigten das Potential von SiC Umrichtern in Windenergieanlagen mit unterschiedlichen Konfigurationen auf.

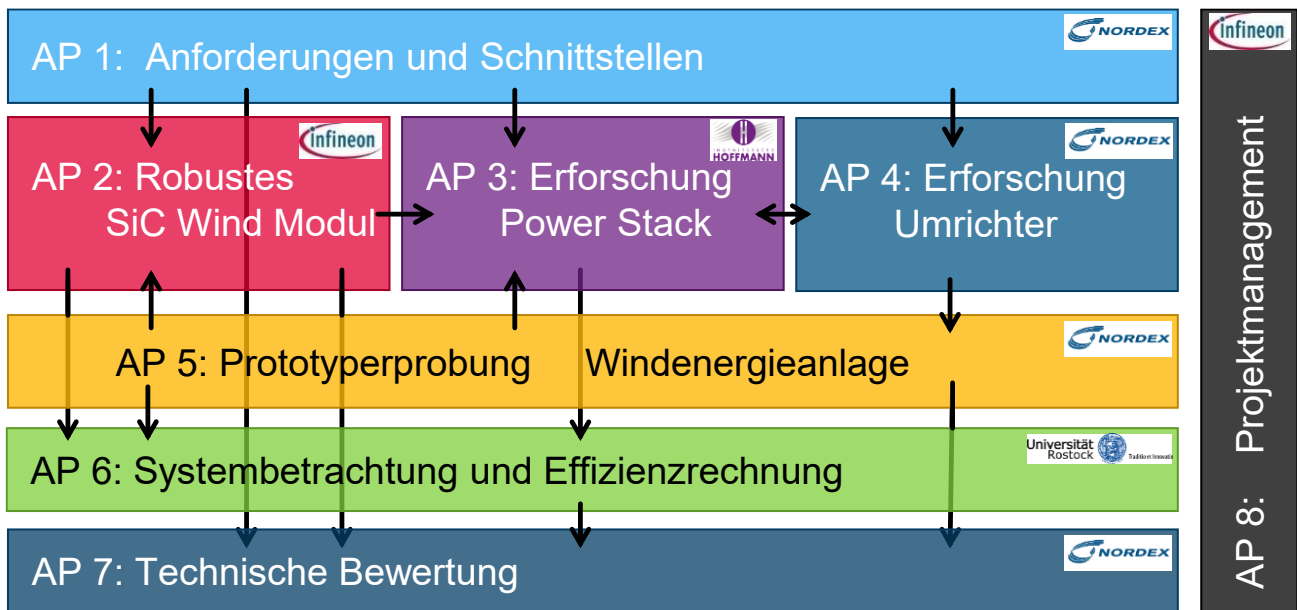


Abbildung 7: Projektstruktur und Leitung der verschiedenen Arbeitspakete

Um die Arbeiten am SiC-Modul, am Power Stack und am Umrichter parallel ausführen zu können, wurde ein stufenweises Vorgehen vorgesehen. Im Rahmen des AP 2 wurden Muster verschiedener Chip-Designstände als diskrete Chips in TO-247 Gehäusen sowie als Leistungsmodule im XHP™ 2 Gehäuse aufgebaut. Die folgende Tabelle zeigt die Übersicht der Varianten, die bei Infineon aufgebaut wurden, sowie die mit den Projektpartner ausgetauschten Versionen. Grün markiert ist die Version, die letztendlich zur Integration in den Power Stack 3.0 und den Umrichter 1.0 genutzt wurde. Das XHP™ 2v1.0 Modul war aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt verfügbar.

Tabelle 1: Nomenklatur der SiC-MOSFET Muster im Projekt

	XHP™ 2 V1.0	XHP™ 2 V2.0	XHP™ 2 V3.0	XHP™ 2 V4.0	TO-247 V1.5	TO-247 V2.0
Nomenklatur	SiCuM	Design A	Design A	Design B	Design C	Design A
IBH	X		X	X		
Uni Rostock	X		X		X	X

Für den Power Stack wurden zwei Stufen umgesetzt:

- Power Stack 1.0 auf Basis von XHP™ 2-IGBT Modulen
- Power Stack 3.0 auf Basis der SiC-MOSFET Module und höherer Schaltfrequenz

Für den Umrichter wurden ebenfalls zwei Evolutionsstufen geplant und realisiert:

- Umrichter 1.0 mit Power Stack 1.0
- Umrichter 1.0 mit Power Stack 3.0



2.4 Zusammenarbeit der Partner und mit anderen Stellen

Die Partner des Verbundprojektes haben sich ideal ergänzt und vertrauensvoll zusammengearbeitet. Dank ihrer spezifischen Kompetenzen wurde gewährleistet, dass die beschriebenen Themenfelder umfassend und effizient erforscht und verifiziert wurden. Die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsvorhabens erforderte eine enge Zusammenarbeit der Konsortialpartner.

3 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und des voraussichtlichen Nutzens

3.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen und Schnittstellen

Im Arbeitspaket 1 wurden die Schnittstellen zwischen den Projektpartnern abgestimmt. Genauer wurde hier die Spezifikation des Power Stacks 1.0 (Si-basierte Technologie) sowie des Power Stacks 3.0 (SiC-basierte Technologie) erstellt, diskutiert und zwischen allen Projektpartnern beschlossen. Ein Screenshot der Titelseite dieser Power Stack Spezifikation ist in Abbildung 8 dargestellt.

Power Stack Specification

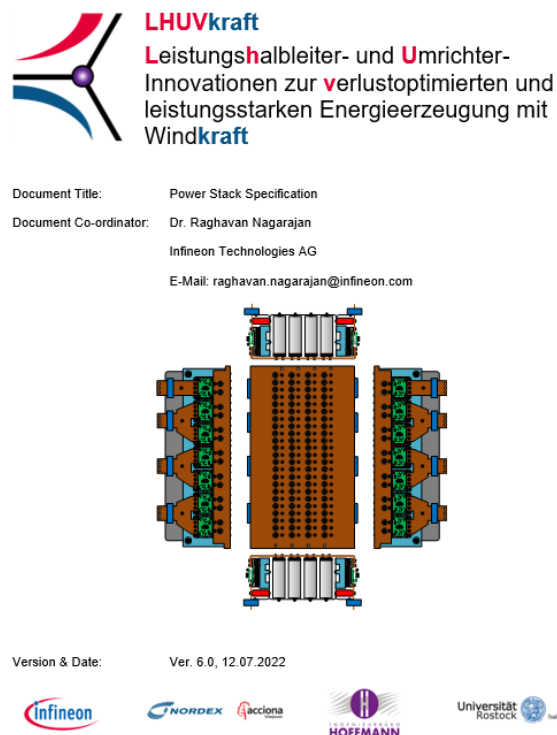


Abbildung 8: Screenshot der Titelseite der unter den Projektpartnern abgestimmten Spezifikation des Power Stacks

Die Spezifikation der verschiedenen Power Stacks bildete die wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Entwicklungen der verschiedenen Arbeitspakete.

3.2 Arbeitspaket 3: SiC Power Stack

Die Ergebnisse der folgenden Unterarbeitspakete aus AP3 werden diesem Abschnitt genauer erläutert. Diese sind:

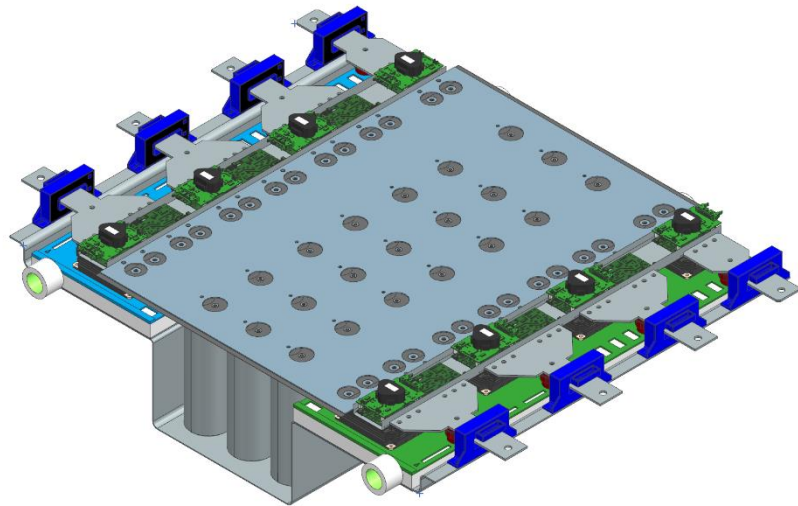
- Realisierung Power Stack 1.0 mit 1700V XHP2 IGBT5 mechanische Muster, thermische Qualifikation der Komponenten



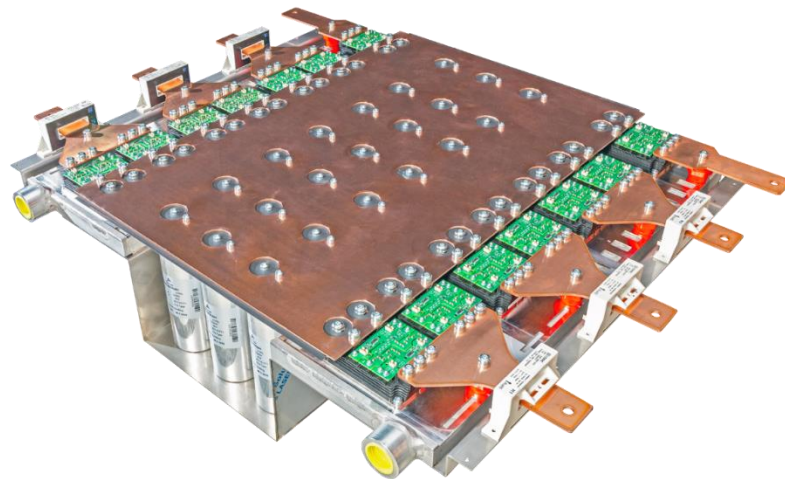
- Realisierung Power Stack 2.0 mit 1700V XHP2 SiC-MOSFET funktional, nicht verlustoptimiert, nicht lastwechselfest Leistungsfähigkeit passend zur Erprobungs-WEA
- Schaltverlustoptimierte MOSFET Ansteuerkonzepte
- Parallelschaltung von SiC-MOSFET Modulen
- Gestaltung eines niederinduktiven Zwischenkreises, Erforschung von Multikommutierungen und Spannungsgradienten
- Realisierung Power Stack 3.0 mit 1700V XHP2 SiC-MOSFET mit extremer Lastwechselfestigkeit verlustoptimiert, lastwechselfest maximale Leistungsfähigkeit
- Vollast Erprobung Power Stack unter Laborbedingungen

Realisierung Power Stack 1.0 mit 1.700V XHP2 IGBT5 mechanische Muster, thermische Qualifikation der Komponenten

Abbildung 9 zeigt sowohl das CAD-Modell des Power Stacks als auch den entsprechenden realisierten Versuchsaufbau. Der Prototyp diente sowohl der thermischen Qualifizierung als auch der Charakterisierung der Leistungsverluste. Wie in der Abbildung ersichtlich, konnte das CAD-Design nahezu unverändert in die praktische Umsetzung überführt werden.



(a)



(b)

Abbildung 9: Prototyp des SiC Power Stacks V2.0: (a) CAD-Modell und (b) Laboraufbau

Im Rahmen der Entwicklung wurde eine hochgradig modulare Architektur des Power Stacks realisiert. Die Variantenbildung zwischen den Versionen 1.0, 2.0 und 3.0 erfolgt ausschließlich durch unterschiedliche Bestückungskonfigurationen auf Basis identischer funktionaler Baugruppen. Auf diese Weise kann eine maximale Wiederverwendbarkeit der Komponenten sichergestellt und der Fertigungs- sowie Entwicklungsaufwand minimiert werden.

Tabelle 2: Komponentenzuordnung der Power Stacks

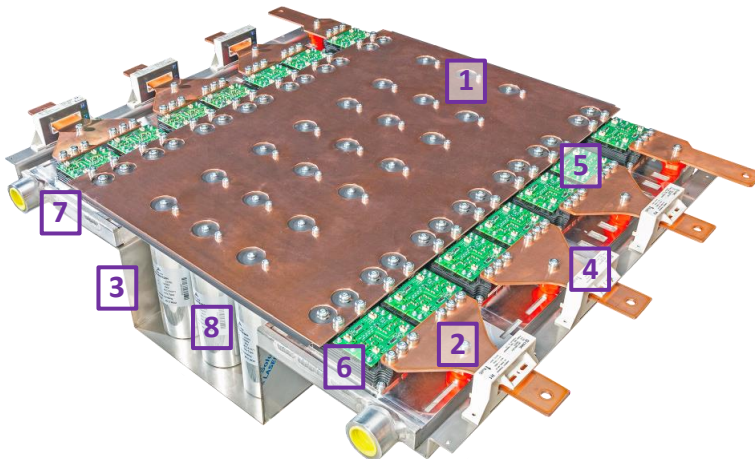


Abbildung 10: Überblick der Power Stack Komponenten (hier am Beispiel des Power Stacks V1.0)

Nummer	Komponente
1:	DC-Link Busbar
2:	AC Busbar
3:	Haltestruktur
4:	Stromsensoren
5:	Gate Treiber
6:	Leistungshalbleiter (XHP2)
7:	Kühlkörper (Flüssigkeitsgekühlt)
8:	DC-link Kondensatoren

Abbildung 10 sowie Tabelle 2 geben eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Komponenten des Power Stacks am Beispiel der Version 1.0. Dabei werden sowohl die funktionalen Baugruppen als auch deren Zuordnung innerhalb des Systems dargestellt. In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Bestückungsvarianten der Power Stack Versionen systematisch zusammengefasst, wodurch ein direkter Vergleich der konfigurierbaren Hardwareoptionen ermöglicht wird. Diese Aufstellung dient als Grundlage für die modulare Anpassung und Weiterentwicklung der Power Stack Architektur.

Tabelle 3: Komponentenzuordnung für die verschiedenen Varianten der Power Stacks

Komponente	Si Power Stack V1.0	SiC Power Stack V2.0	SiC Power Stack V3.0
DC-Link Busbar	Identisch	Nicht umgesetzt	Identisch
AC Busbar	Identisch		Identisch
Haltestruktur	Identisch		Identisch
Stromsensoren	Identisch		Identische
Gate Treiber	Variante		Variante
Leistungshalbleiter (XHP2)	Variante		Variante
Kühlkörper (Flüssigkeitsgekühlt)	Variante		Variante
DC-Link Kondensatoren	Variante		Variante

Im Zuge der Finalisierung des Technologieträgers 1.0 für die Silizium-basierten Leistungshalbleiter wurde eine umfassende thermische Simulation des Power Stacks auf Basis der final definierten elektrischen und thermischen Parameter durchgeführt. Die Simulationsergebnisse, dargestellt in Abbildung 11 und Abbildung 12, geben Aufschluss über die maximal zulässigen Ausgangsströme (RMS-Werte) in Abhängigkeit von kritischen Betriebsparametern wie der Vorlauftemperatur des Kühlmediums, der PWM-Trägerfrequenz sowie den variierenden Ausgangsfrequenzen der Leistungshalbleiter. Abbildung 11 zeigt die Belastungsgrenzen für den generatorseitigen Umrichter (Motor Side Converter, MSC), während Abbildung 12 die entsprechenden Daten für den netzseitigen Umrichter (Line Side Converter, LSC) präsentiert. Diese Analyse erlaubt eine gezielte Bewertung der thermischen Belastbarkeit und die Identifikation von Betriebspunkten, bei denen die thermische Beanspruchung des Power Stacks optimiert werden muss, um die Zuverlässigkeit und Effizienz des Gesamtsystems sicherzustellen.

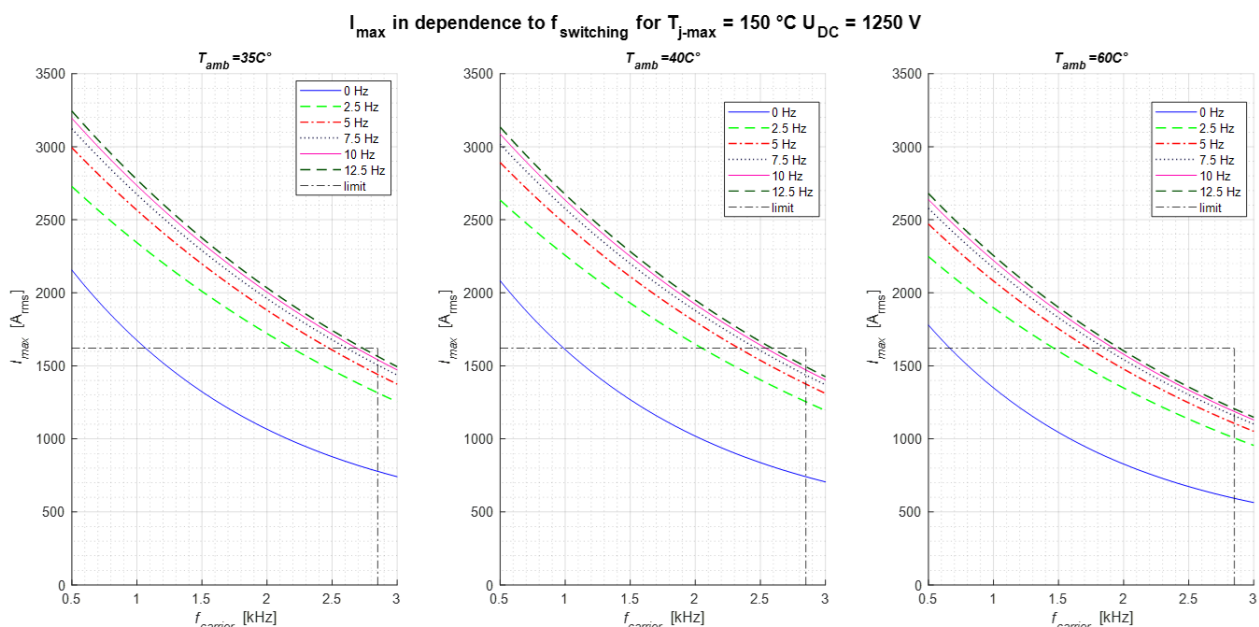


Abbildung 11: Maximaler Ausgangsstrom für den Si-basierten Power Stack (Power Stack 1.0) auf der Generatorseite in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, der Trägerfrequenz sowie der Ausgangsfrequenz

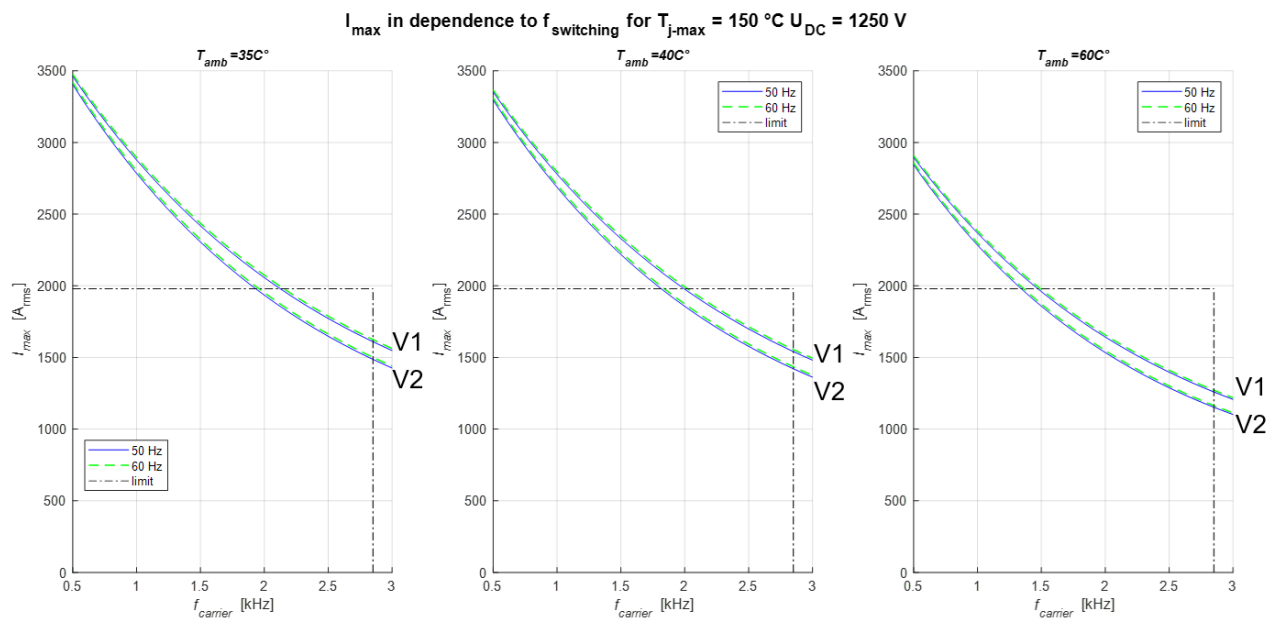


Abbildung 12: Maximaler Ausgangsstrom für den Si-basierten Power Stack (Power Stack 1.0) auf der Netzseite in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, der Trägerfrequenz sowie der Ausgangsfrequenz für zwei unterschiedliche Gate Parameter (V1 und V2)

Die Abbildungen zeigen, dass bei den vorgegebenen Randbedingungen und einer Zielträgerfrequenz von 2,85 kHz die erforderlichen Ausgangsstromwerte nicht erreicht wurden. Um die Leistung zu verbessern, musste entweder die Trägerfrequenz angepasst, das Modulationsverfahren (derzeit Space Vector Modulation, SVM) geändert oder die Vorlauftemperatur des Kühlsystems optimiert werden. Die genaue Bewertung dieser Optionen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Nordex, um die bestmögliche Systemauslegung zu gewährleisten.

Realisierung Power Stack 2.0 mit 2.300V XHP2 SiC-MOSFET funktional, nicht verlustoptimiert, nicht lastwechselfest Leistungsfähigkeit passend zur Erprobungs-WEA

Der Power Stack 2.0 wurde zwar im CAD-Design vollständig entwickelt, jedoch erfolgte keine praktische Umsetzung dieses Stacks. Dies ist auf die hohe Forschungsgeschwindigkeit des Projektpartners Infineon zurückzuführen, welche die Projektplanung beeinflusste. Die Zeitspanne zwischen der Fertigstellung des initialen SiC-MOSFET-Moduls, das noch keine Optimierungen hinsichtlich Verluste und Lastwechsel aufwies, und den darauffolgenden Entwicklungszyklen war zu kurz, um den zusätzlichen Aufwand für Aufbau, Integration und Inbetriebnahme eines Prototyps zu rechtfertigen. Stattdessen wurden erste Voruntersuchungen auf Chip-Ebene durch den Projektpartner Universität Rostock durchgeführt, welche eine fundierte und erfolgreiche Erstbewertung der Technologie ermöglichten. Diese Analysen lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit

der SiC MOSFET Chips, sodass eine Weiterentwicklung des Power Stacks auf Basis dieser Daten effizient vorangetrieben werden konnte.

Schaltverlustoptimierte MOSFET Ansteuerkonzepte

Abbildung 13 zeigt den Prototypen des Gate-Treibers für SiC-Leistungshalbleiter, der im Rahmen einer gemeinsamen Entwicklungsinitiative mit dem Projektpartner Universität Rostock sowie der Firma PowerIntegrations GmbH realisiert wurde. Dieser Gate-Treiber-Prototyp umfasst spezifische Schaltungslösungen zur Ansteuerung von Siliziumkarbid-Halbleitern und ist auf die besonderen Anforderungen hinsichtlich Schaltgeschwindigkeit, Verlustminimierung und elektromagnetischer Verträglichkeit optimiert. Parallel zu dieser Entwicklung wurde bei der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH ein weiterer SiC-Gate-Treiber konzipiert, der sich im frühen Prototypenstadium befindet. Die Inbetriebnahme dieses Gate-Treibers ist für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen, mit dem Ziel, durch alternative Designansätze und erweiterte Funktionalitäten die Performance und Integration in das Gesamtsystem weiter zu verbessern. Beide Entwicklungen verfolgten das Ziel, die Effizienz und Zuverlässigkeit der SiC-basierten Leistungshalbleiteransteuerung im Projektkontext signifikant zu steigern.

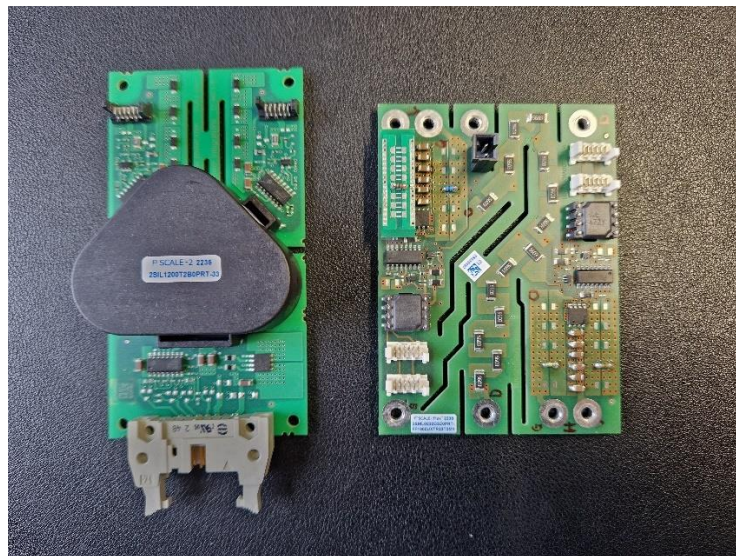


Abbildung 13: Prototypen Gate Treiber für den SiC MOSFET Leistungshalbleiter

Parallelschaltung von SiC-MOSFET Modulen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde insbesondere die Parallelschaltung von SiC-MOSFET-Modulen eingehend analysiert. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Parametervarianzen der Module, insbesondere hinsichtlich der Gate-Source-Schwellenspannung $U_{GS,th}$, des Einschaltwiderstands $R_{DS(on)}$ sowie der Drain-Source-Spannung U_{DS} .

Die Gate-Source-Schwellenspannung $U_{GS,th}$ beeinflusst primär die Schaltgeschwindigkeit der einzelnen Module und wirkt sich damit wesentlich auf die transiente Stromverteilung innerhalb der

Parallelschaltung aus. Die Drain-Source-Spannung U_{DS} hingegen hat einen maßgeblichen Einfluss auf die (quasi-)stationäre Stromaufteilung zwischen den parallel betriebenen Modulen.

Abbildung 14 fasst die zentralen Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen. Es konnte gezeigt werden, dass bei Einhaltung enger Toleranzgrenzen hinsichtlich $U_{GS,th}$ und U_{DS} eine sehr gute Stromsymmetrie zwischen den parallel geschalteten SiC-MOSFET-Modulen erzielt werden kann. Dies wurde in der genannten Veröffentlichung exemplarisch anhand einer Konfiguration mit drei parallel betriebenen Modulen demonstriert.

Die Relevanz dieser Analyse wird durch die ausgezeichnete Stromsymmetrierung im LHUVkraft SiC Power Stack 3.0 bestätigt, der in einer zweifachen Parallelschaltung realisiert wurde (vgl. Abbildung 22 auf Seite 31).

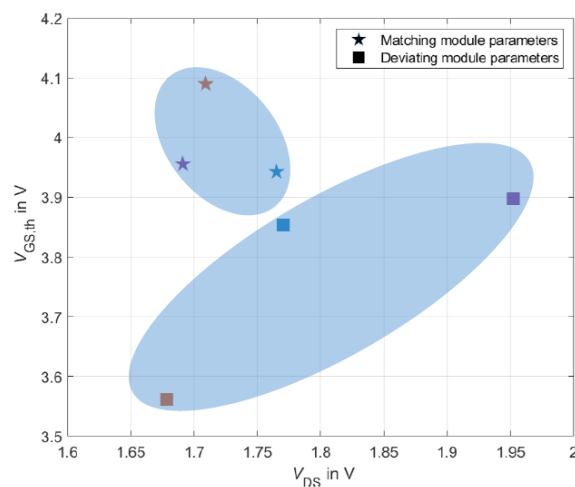


Abbildung 14: Analyse der kritischen SiC MOSFET Parameter für eine Parallelschaltung mehrerer Halbleitermodule nach „Design Aspects of Paralleling 2.3 kV CoolSiC(TM) XHP(TM) 2 Power Modules in Multimegawatt Applications“, M. Morisse, N. Hoffmann, T. Poller, PCIM Conference 2025, doi:10.30420/566541318

Gestaltung eines niederinduktiven Zwischenkreises, Erforschung von Multikommutierungen und Spannungsgradienten

Eine niederinduktive Auslegung des Zwischenkreises stellt eine grundlegende Anforderung im Design von Power Stacks dar, insbesondere bei der Verwendung von SiC-MOSFET-Leistungshalbleitern. Aufgrund ihrer sehr hohen Schaltflankensteilheiten (dV/dt und dI/dt) reagieren SiC-Bauelemente besonders sensitiv auf parasitäre Induktivitäten im Kommutierungspfad. Selbst geringfügige Streuinduktivitäten können zu signifikanten Schaltüberspannungen führen, welche nicht nur die Zuverlässigkeit der Halbleiterbauelemente beeinträchtigen, sondern auch die EMV-Eigenschaften des Gesamtsystems verschlechtern.

Um dieser Problematik konstruktiv entgegenzuwirken, wurde im Design der LHUVkraft Power Stacks ein besonders induktionsoptimierter Zwischenkreis realisiert. Abbildung 9 zeigt das entsprechende



Layout. Es kommt ein vollflächiges, niederinduktives Busbar-Design zum Einsatz, bei dem die Strompfade für Plus- und Minuspotential des Zwischenkreises mit maximaler Flächenüberlappung ausgeführt sind. Durch diese Anordnung wird die geometrisch bedingte Schleifenfläche minimiert und damit die resultierende parasitäre Streuinduktivität signifikant reduziert.

Messungen am Power Stack 3.0 (vgl. Abbildung 21, Seite 31) zeigen eine mittlere Streuinduktivität im gesamten Kommutierungskreis von ca. 15 nH. Dieser äußerst niedrige Wert ermöglicht den Betrieb der SiC-MOSFET-Module mit sehr hohen Schaltgeschwindigkeiten, ohne kritische Überspannungen an den Halbleiterbauelementen zu verursachen. Gleichzeitig kann durch die Reduktion der Überschwingungen der Energieinhalt der Schaltvorgänge minimiert werden, was zu einer deutlichen Verringerung der Schaltverluste führt. Dies trägt unmittelbar zur Effizienzsteigerung des Gesamtschaltverluste bei und verbessert die gesamte Performance der Leistungsmodule.

Realisierung Power Stack 3.0 mit 2.300V XHP2 SiC-MOSFET mit extremer Lastwechselfestigkeit verlustoptimiert, lastwechselfest maximale Leistungsfähigkeit

Im Rahmen des LHUVkraft-Projekts wurde ein modulares und skalierbares Power Stack-Design entwickelt, das eine flexible Anpassung an unterschiedliche Anwendungsanforderungen und Systemspannungen ermöglicht. Ziel war es, eine Plattform zu schaffen, die durch gezielte Modifikationen in der Bestückung auf verschiedene Leistungshalbleitertechnologien (z. B. Si, SiC) sowie auf unterschiedliche DC-Zwischenkreisspannungen skalierbar ist.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, wurde die Variabilität der Power Stack-Versionen – insbesondere im Hinblick auf unterschiedliche Spannungsniveaus und Halbleitertechnologien – über eine anwendungsspezifische Bestückungsstrategie realisiert. Dabei kommt ein einheitliches mechanisches und thermisches Grunddesign zum Einsatz, welches durch den Austausch bzw. die gezielte Auswahl von Leistungshalbleitermodulen, Gate-Treiber-Topologien sowie passiven Komponenten (z. B. Zwischenkreiskondensatoren und Gate Treiber) auf die jeweiligen Anforderungen konfiguriert werden kann.

Volllast Erprobung der SiC Power Stack 3.0 unter Laborbedingungen

Für den SiC-basierten Power Stack (Power Stack 3.0) wurde vom Projektpartner Infineon ein überarbeitetes Leistungsmodul bereitgestellt. Dieses Modul wurde speziell im Hinblick auf eine verbesserte thermische Anbindung des Halbleiterchips an das Kühlkonzept optimiert. Ziel dieser Überarbeitung war es, die Wärmeabfuhr während dynamischer und stationärer Betriebszustände effizienter zu gestalten und dadurch sowohl die Betriebstemperaturen der Halbleiter zu senken als auch die thermomechanische Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen.

Zur quantitativen Bewertung dieser thermischen Optimierungsmaßnahmen wurden umfangreiche Messungen der transienten thermischen Impedanz $Z_{th}(t)$ durchgeführt. Diese Kennwerte ermöglichen eine detaillierte Analyse des Wärmewiderstandsverlaufs über die Zeit und liefern Aufschluss über die

Effizienz der Wärmeübertragung zwischen Halbleiterchip, DCB-Substrat, Baseplate und Kühlkörper. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 15 dargestellt.

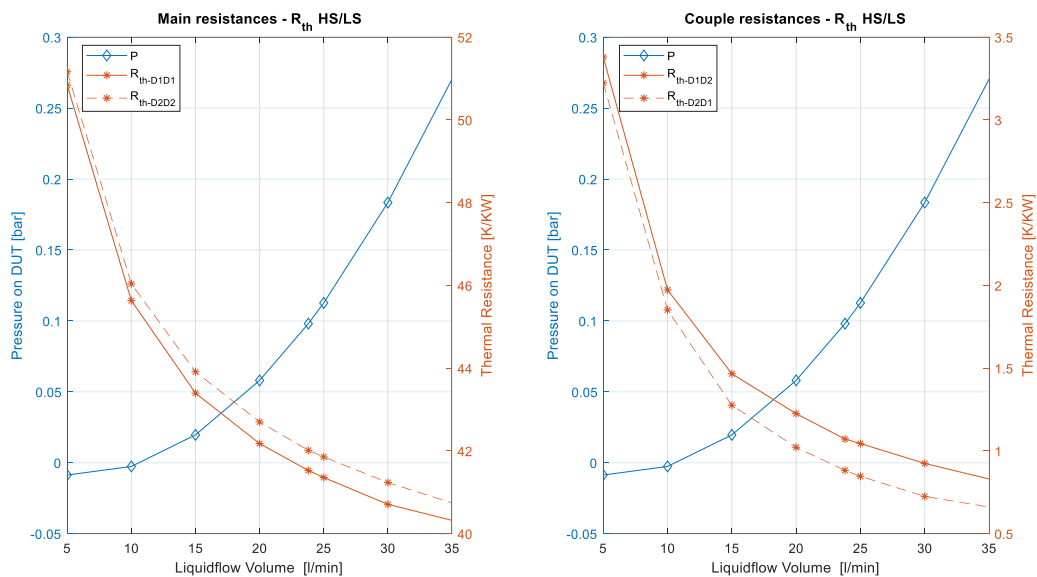


Abbildung 15: Messergebnisse des überarbeiteten SiC Moduls mit verbesserter thermischer Anbindung

Zur Bewertung der Modifikationen am überarbeiteten SiC-Modul wurde ein detaillierter Vergleich mit dem vorherigen SiC-Modul durchgeführt. Als Grundlage für den Vergleich der thermischen Impedanzen wurde die hydraulische Leistung herangezogen, definiert als das Produkt aus Volumenstrom und Druckverlust im Kühlsystem. Diese Kenngröße erlaubt eine realistische Bewertung der thermischen Effizienz unter Berücksichtigung der tatsächlich erzielbaren Kühlleistung.

Die in Abbildung 16 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass durch die Überarbeitung des SiC-Moduls eine durchschnittliche Verbesserung des thermischen Verhaltens um etwa 25 % erreicht wurde. Dies bestätigt messtechnisch die Effektivität der Maßnahmen zur Optimierung der thermischen Anbindung, wodurch eine effizientere Wärmeabfuhr bei vergleichbarem Kühlaufwand ermöglicht wird.

Darüber hinaus wurde ein Vergleich zwischen dem für SiC-Halbleiter optimierten Kühlkörper und dem herkömmlichen Si-Kühlkörper durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass der SiC-optimierte Kühlkörper einen moderaten, jedoch messbaren Vorteil von ca. 5 % hinsichtlich der thermischen Leistung aufweist. Diese Verbesserung ist auf spezifische Anpassungen im Design zurückzuführen, die auf die thermischen Eigenschaften und Betriebsbedingungen von SiC-Leistungshalbleitern abgestimmt sind.

Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Bedeutung einer ganzheitlichen Betrachtung von Modulkonstruktion und Kühlsystem zur Erreichung optimaler thermischer Betriebsbedingungen und einer höheren Zuverlässigkeit der Leistungshalbleiter.

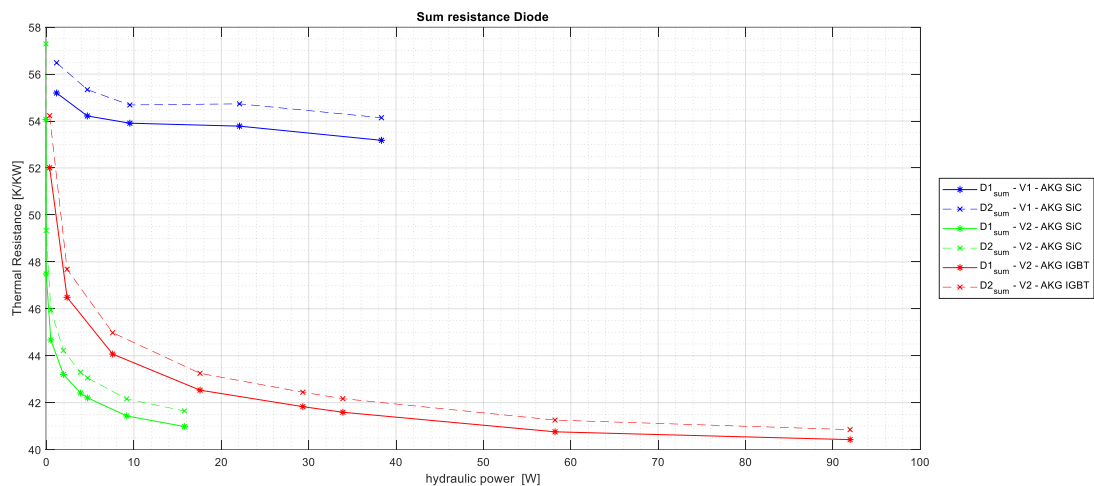


Abbildung 16: Vergleich der Messergebnisse der verschiedenen SiC Module unter Verwendung verschiedener Kühlkörper (blau – altes SiC Module mit speziell für SiC optimierten Kühlkörper, rot – überarbeitetes SiC Module mit speziell für IGBT optimierten Kühlkörper, grün – überarbeitetes SiC Module mit speziell für SiC optimierten Kühlkörper)

Die umfassende Charakterisierung des Schaltverhaltens des SiC Power Stack 3.0 wurde systematisch in zwei wesentliche Teilbereiche untergliedert, um sowohl die elektrische Performance der Leistungsmodule als auch die Gesamtleistung des Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen fundiert zu bewerten:

1. Elektrische Charakterisierung des SiC-Moduls in Parallelschaltung und Optimierung der Gate-Treiber-Parameter:

In diesem ersten Schritt lag der Fokus auf der Analyse des dynamischen Schaltverhaltens der SiC-MOSFET-Module, welche in zweifacher Parallelschaltung betrieben werden. Dabei wurden spezifisch die Auswirkungen unterschiedlicher Gate-Widerstände auf das Schaltverhalten untersucht, um die Gate-Treiber-Parameter hinsichtlich Schaltverluste, Überspannungen und Stromverteilung optimal abzustimmen. Insbesondere wurde das Zusammenspiel von Einschaltwiderstand (R_{gon}) und Ausschaltwiderstand (R_{goff}) betrachtet, da diese direkt die Schaltgeschwindigkeit, die Verlustleistung sowie die elektromagnetische Verträglichkeit beeinflussen.

2. Abschätzung der Systemleistungsfähigkeit unter Variation wesentlicher Betriebsparameter:

Der zweite Teil der Untersuchung fokussierte sich auf die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Power Stacks im Gesamtsystem. Dabei wurden zentrale Einflussgrößen wie Schaltfrequenz und verwendetes Modulationsverfahren analysiert. Zusätzlich wurde der Einfluss des Kühlkonzepts, insbesondere der Einsatz von Flüssigkeitskühlung und die Auswahl des Kühlmittels, auf die

thermische Stabilität und somit auf die maximale Ausgangsleistung untersucht. Auch die Auswirkung der Ausgangsfrequenz der Grundschiwingung wurde in die Betrachtung einbezogen, um realitätsnahe Betriebsbedingungen abzubilden.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser umfassenden Analysen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Die Abbildung 17 - Abbildung 19 illustrieren exemplarisch das Schaltverlustverhalten des SiC-MOSFETs vom Typ V4 in einer zweifachen Parallelschaltungskonfiguration mit Gate-Widerständen von $R_{gon} = 2,0 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$. Die Messergebnisse zeigen insbesondere bei den Reverse-Recovery-Verlusten (vgl. Abbildung 19) erwartungsgemäß sehr niedrige Werte, die typisch für die hervorragende Schaltcharakteristik von SiC-MOSFETs sind. Diese geringen Verluste tragen maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Reduktion thermischer Belastungen bei, wodurch der Power Stack auch unter anspruchsvollen Betriebsbedingungen eine hohe Leistungsdichte und Zuverlässigkeit erreicht.

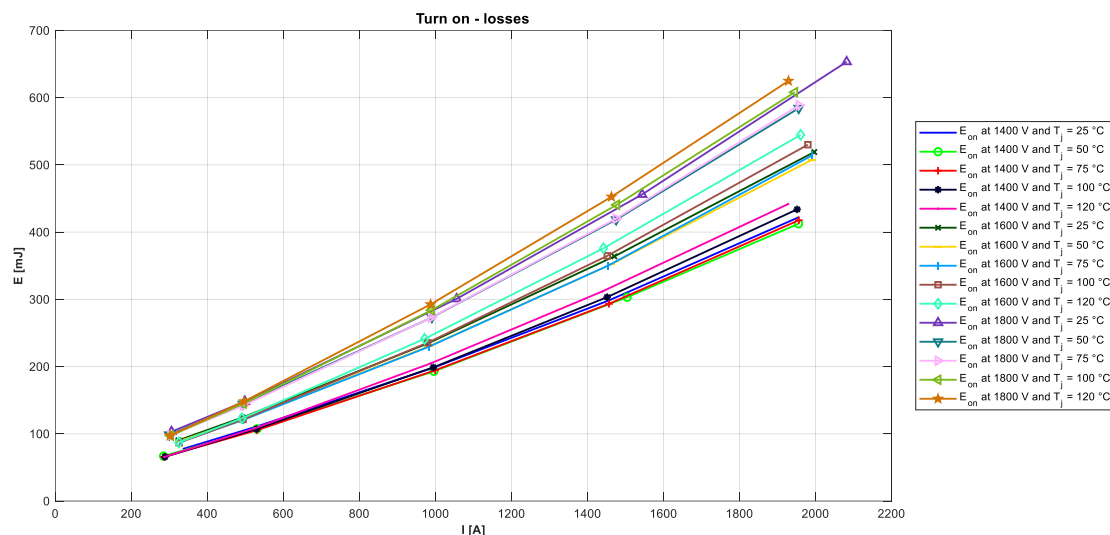


Abbildung 17: Gemessene Einschaltverluste E_{on} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2,0 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$

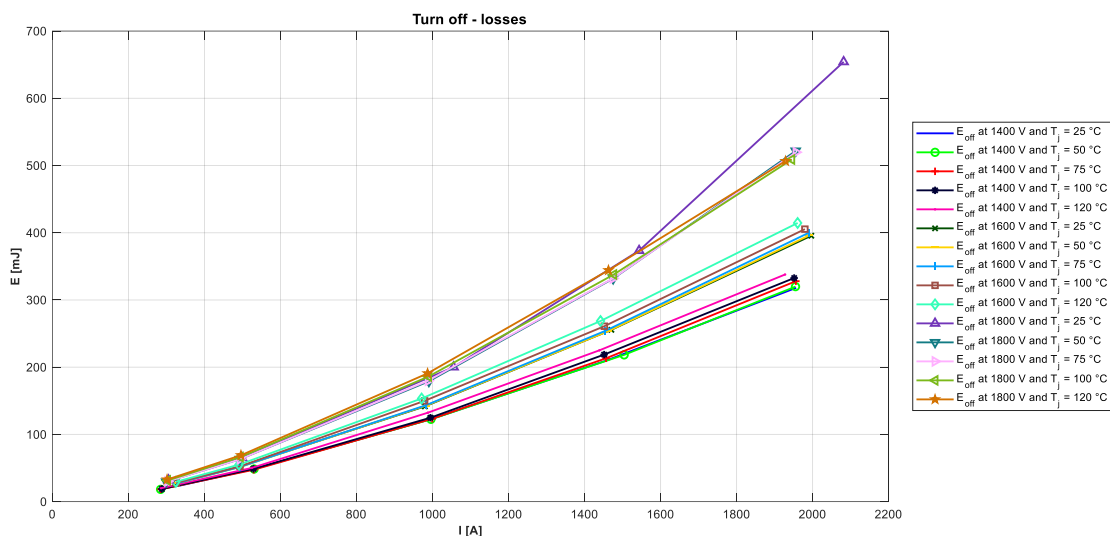


Abbildung 18: Gemessene Ausschaltverluste E_{off} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2,0 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$

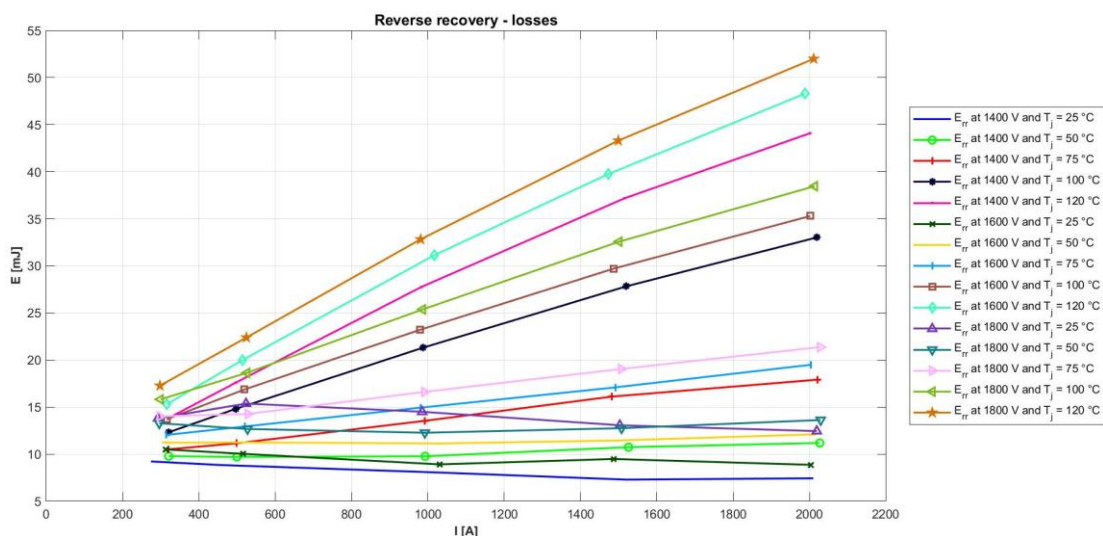


Abbildung 19: Gemessene Reverse-recovery Verluste E_{rr} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$

Abbildung 20 stellt die gemessene maximale Drain-Source Spannung $U_{DS, max}$ des SiC-MOSFETs V4 innerhalb der Power Stack 3.0-Konfiguration dar. Die Messung erfolgte unter realistischen Betriebsbedingungen, wobei die Spannungsverläufe über den gesamten spezifizierten Betriebsbereich analysiert wurden. Dabei bleibt die maximale U_{DS} jederzeit unter der spezifizierten maximal zulässigen Sperrspannung von 2,3 kV.

Die kontinuierliche Einhaltung dieser maximalen Sperrspannung ist ein kritischer Parameter für die Betriebssicherheit und die Vermeidung von Überspannungen, die zu Bauteilschäden oder vorzeitigem Ausfall führen könnten. Die Messdaten zeigen, dass durch das Design der Power Stack 3.0 und die optimierte Ansteuerung des SiC-MOSFETs eine zuverlässige Spannungsfestigkeit sichergestellt wird.

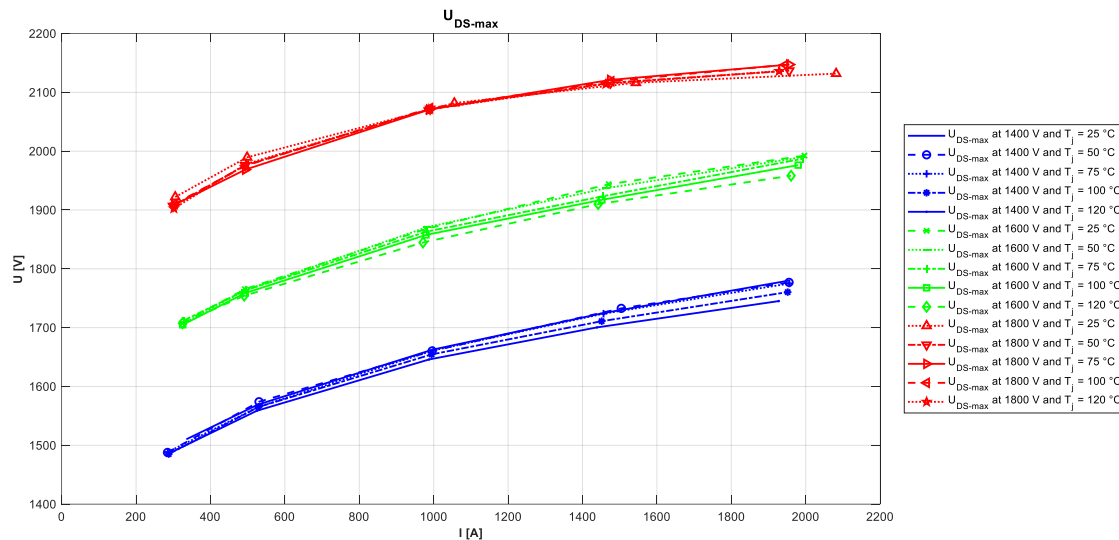


Abbildung 20: Gemessene maximale Drain-source Spannung U_{DS} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$

Abbildung 21 zeigt die gemessene Streuinduktivität L_σ des Power Stack 3.0, welche den gesamten Kommutierungskreis umfasst. Die Messungen ergeben einen Wert von etwa 15 nH. Damit wird das Ziel, eine ultra-niedrige Streuinduktivität zu realisieren, für den Power Stack 3.0 erfolgreich durch experimentelle Daten bestätigt. Diese geringe Streuinduktivität ist entscheidend, um parasitäre Überspannungen zu minimieren und die Schaltperformance der Leistungshalbleitermodule zu optimieren.

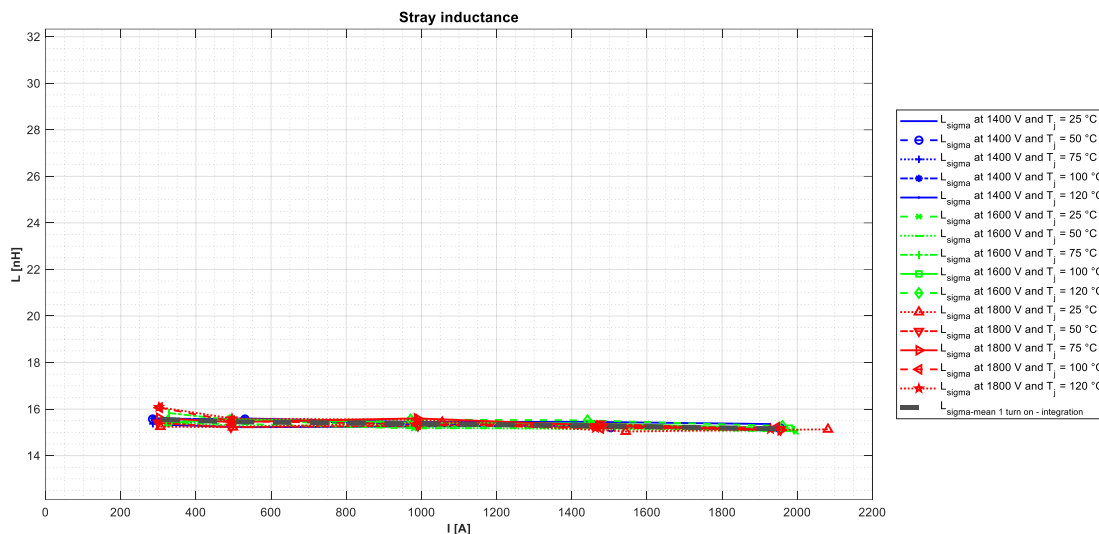


Abbildung 21: Gemessene Streuinduktivität L_σ des Power Stacks V3.0 mit SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung

Abbildung 22 zeigt die Stromverteilung zwischen den beiden parallel geschalteten SiC-MOSFET-Modulen im Power Stack 3.0. Die Darstellung verdeutlicht, dass durch das optimierte mechanische Design des Power Stacks eine nahezu symmetrische Stromaufteilung zwischen den Modulen erreicht wird.

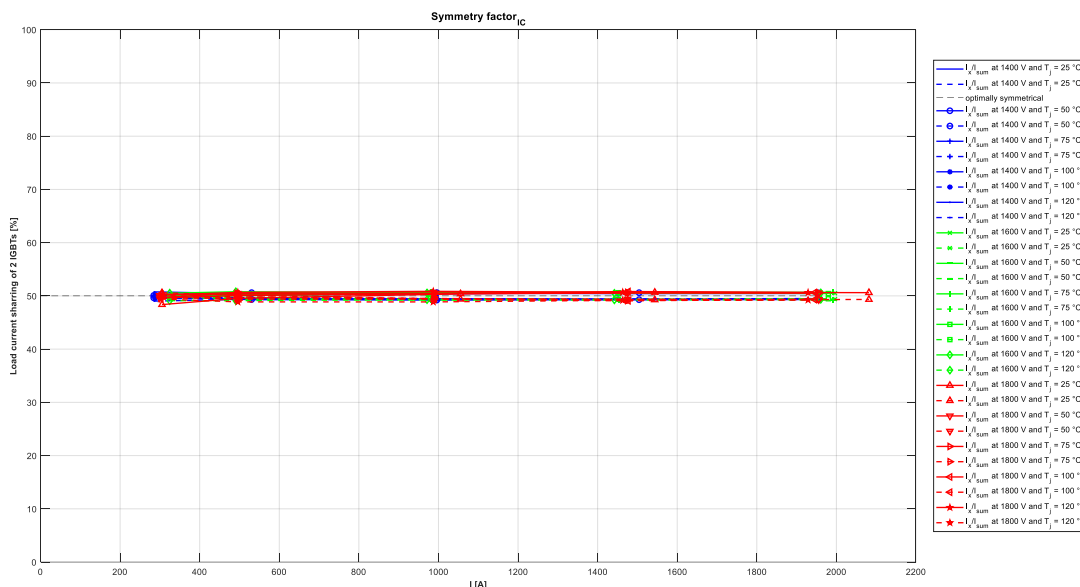
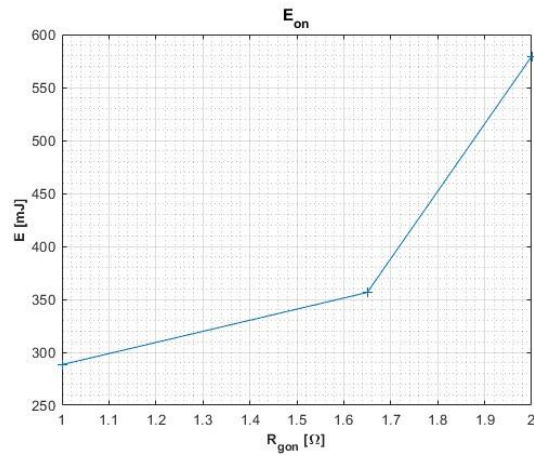
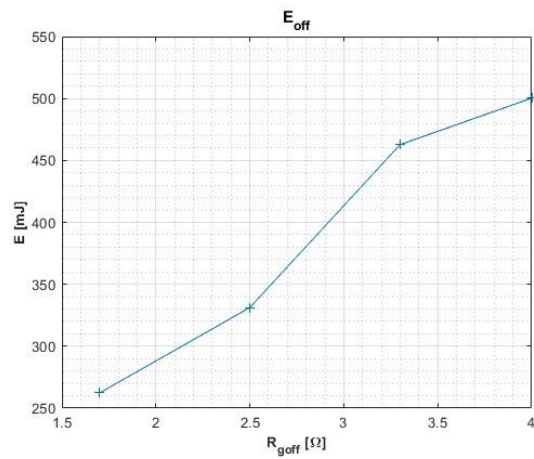


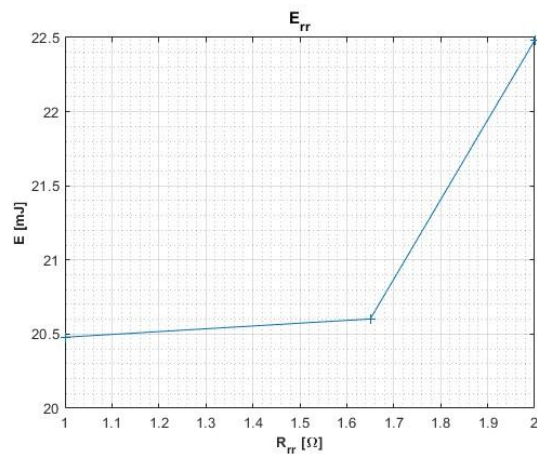
Abbildung 22: Gemessene Stromaufteilung des Power Stacks V3.0 mit SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung



(a)



(b)



(c)

Abbildung 23: Gemessene Schaltverluste des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für variierende Gate Parameter R_{gon} und R_{goff} für den Betriebspunkt $I_c = 2.000 A_{peak}$, $T_j = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ und $U_{dc} = 1.800 \text{ Vdc}$: (a) Einschaltverluste E_{on} , (b) Ausschaltverluste E_{off} und (c) Reverse-recovery Verluste E_{rr}

Im Folgenden werden die Abhängigkeiten der Schaltverluste von Gate-Treibparametern R_{gon} und R_{goff} systematisch untersucht. Abbildung 23 zeigt die gemessenen Schaltverluste des SiC-MOSFETs V4 in einer zweifachen Parallelschaltung bei variierenden Gate-Widerständen R_{gon} und R_{goff} . Die Messungen erfolgen am Betriebspunkt mit einem Spitzenstrom $I_D = 2.000$ A, einer Sperrschichttemperatur $T_j = 120$ °C und einer Zwischenkreisspannung $U_{dc} = 1.800$ V.

Das thermische und elektrische Verhalten des Power Stacks 3.0, das zuvor durch Messungen ermittelt wurde, bildet die Grundlage für die anschließenden thermischen Simulationen. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der thermischen Simulation dargestellt. Sie zeigen den maximal möglichen Ausgangsstrom des Power Stack 3.0 in Kombination mit dem SiC-MOSFET-Modul V4, wie er in der Anwendung des MSC-Umrichters auftritt.

Berücksichtigt man dabei einen minimalen Volumenstrom von 20 l/min sowie einen typischen Betriebspunkt des MSC-Umrichters, lässt sich erkennen, dass bei einer mittleren Schaltfrequenz von etwa 6 kHz der erforderliche Nennstrom bereitgestellt werden kann. Dies schließt auch eine Überlastreserve mit ein. Damit wird deutlich, dass die gemessenen Eigenschaften des Power Stacks eine zuverlässige Grundlage für den praktischen Einsatz im MSC-Umrichter darstellen.

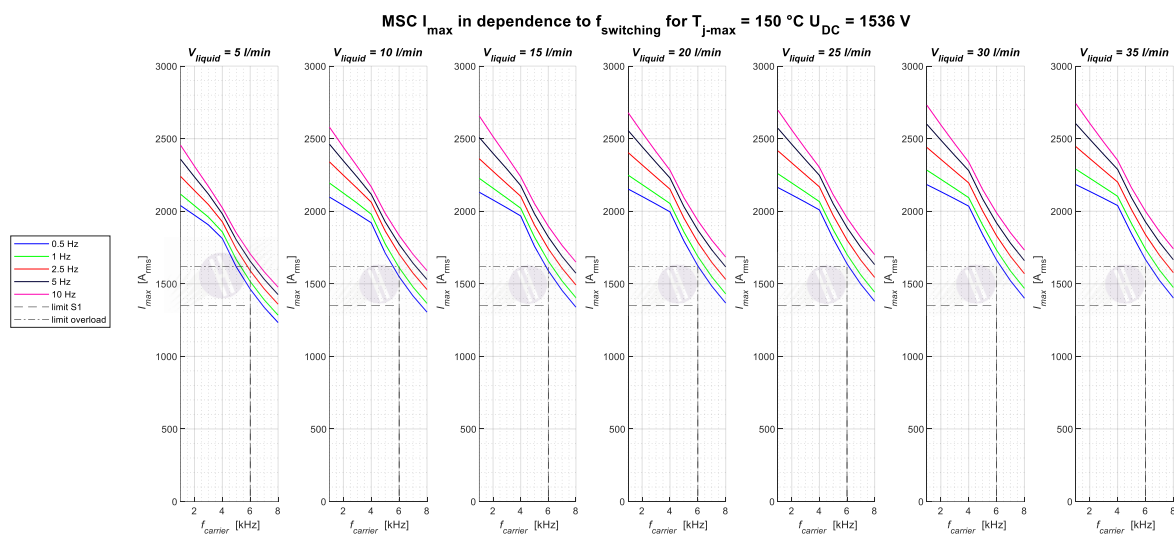


Abbildung 24: Thermische Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET Modul V4 für die Applikation des MSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0$ Ω , $R_{goff} = 1,7$ Ω , $T_{liquid} = 40$ °C, $\cos(\varphi) = -0,658$, Si-Kühlkörper)

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Derating-Simulation für den maximalen Ausgangsstrom des Power Stack 3.0 in Kombination mit dem SiC-MOSFET-Modul V4 dargestellt. Die Simulation bezieht sich dabei auf den Einsatz im MSC-Umrichter und ermöglicht eine genauere Bewertung des thermischen Verhaltens unter realistischen Betriebsbedingungen.

Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass der Power Stack auch bei variabler Drehzahl auf der Generatorseite des Umrichtersystems einen thermisch stabilen Betrieb gewährleistet. Dies ist ein wesentlicher Aspekt, da gerade im drehzahlvariablen Betrieb erhöhte Anforderungen an das thermische Management bestehen. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass die gewählte Kombination aus Power Stack und SiC-Modul zuverlässig arbeitet und eine sichere Leistungsbereitstellung über den gesamten vorgesehenen Betriebsbereich unterstützt.

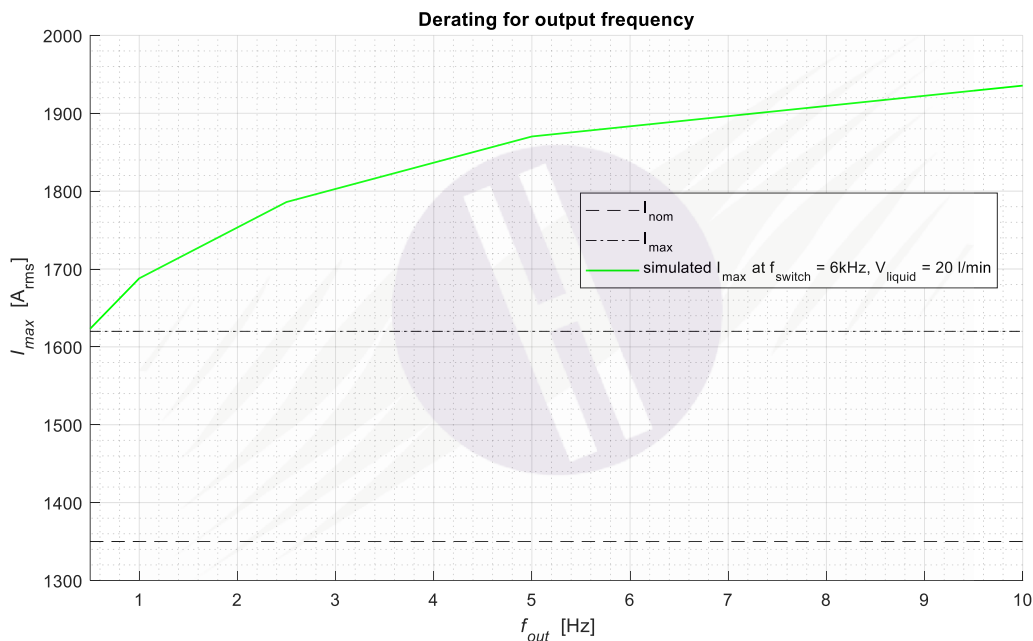


Abbildung 25: Derating Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET-Modul V4 für die Applikation des MSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0 \Omega$, $R_{goff} = 1,7 \Omega$, $T_{liquid} = 40^\circ\text{C}$, $\cos(\varphi) = -0,658$, Si-Kühlkörper)

In Abbildung 26 ist die thermische Simulation des LSC-Umrichters dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Schaltfrequenz von 6 kHz für alle untersuchten Volumenströme eine ausreichend hohe Stromreserve zur Verfügung steht. Diese Stromreserve bietet einen wichtigen Spielraum für den praktischen Betrieb: Sie kann entweder genutzt werden, um den Nennstrom weiter zu erhöhen, oder um die Schaltfrequenz des Umrichters an die jeweiligen Anforderungen anzupassen.

Damit wird deutlich, dass das thermische Design des LSC-Umrichters nicht nur für den vorgesehenen Nennbetrieb ausgelegt ist, sondern auch genügend Reserven für zukünftige Anpassungen und Optimierungen bietet.

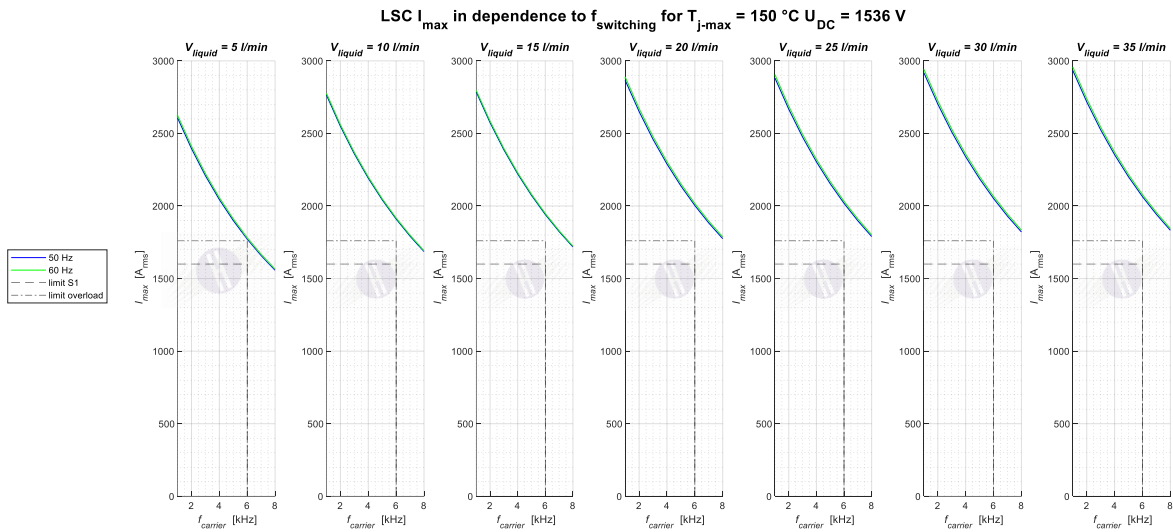


Abbildung 26: Thermische Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET Modul V4 für die Applikation des LSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0\ \Omega$, $R_{goff} = 1,7\ \Omega$, $T_{liquid} = 40\text{ °C}$, $\cos(\varphi) = 0,448$, Si-Kühlkörper)

3.3 Arbeitspaket 4: SiC Wind-Umrichter

In AP4 werden in den folgenden Unterkapiteln sowohl die Auslegung eines Filters für die Anwendung in einer Windenergieanlage mit dem Power Stack 1.0 behandelt als auch mögliche Filtervarianten für einen Si Power Stack in der 2,3-kV-IGBT-Variante (Power Stack 1.1) sowie für einen SiC Power Stack 3.0 vorgestellt.

Netzdrossel - Leistungsfähigkeit passend zur Erprobungs-WEA

Abbildung 27 zeigt das Ersatzschaltbild einer Netzfilters. Für den Einsatz in Windenergieanlagen der betrachteten Anlagenklasse wird eine LCL-Filtertopologie implementiert, bestehend aus einer netzseitigen Drossel $L_{f,grid}$, einer umrichterseitigen Drossel $L_{f,conv}$ sowie einer im Dreieck verschalteten Kapazität C_{delta} . Unter Berücksichtigung der in den einschlägigen Netzanschlussrichtlinien, wie beispielsweise IEEE 519-2022, definierten Grenzwerte für zulässige Stromüberschwingungen kann der zusätzliche Einsatz eines Trap-Filters erforderlich werden.

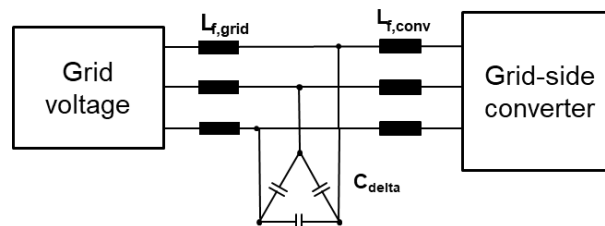


Abbildung 27: Ersatzschaltbild einer Netzfilter: hier LCL-Filtertopologie



Die Tabelle 4 zeigt die Auslegungsparameter eines Netzfilters für den Power Stack 1.0. Es wird ein sogenannter LCL-Filter mit zusätzlichen Trap-Filter vorgeschlagen, um Netzanschlussregeln nach IEEE 519-2022 zu erfüllen.

Tabelle 4: Netzfilterauslegung für den Power Stack 1.0

Komponente	Einheit	Wert
$L_{f,conv}$	μH	95,7
C_{delta}	μF^*	480
$R_{C,delta}$	$\text{m}\Omega$	130
$L_{trap,1}$	μH	31,19
$C_{trap,1}$	μF^*	96

Abbildung 28 veranschaulicht die Dämpfungscharakteristik des ausgelegten Netzfilters über den relevanten Frequenzbereich. Die Analyse zeigt, dass insbesondere im Hinblick auf die von Nordex/Acciona spezifizierten Oberschwingungsgrenzwerte (vgl. letzte Zeile der Abbildung) eine ausreichende Dämpfung der kritischen Frequenzanteile erreicht wird. Damit wird sichergestellt, dass die durch den Umrichter eingespeisten Ströme die zulässigen Oberwellenanteile nicht überschreiten und die Einhaltung der projektspezifischen Netzanschlussanforderungen gewährleistet ist.

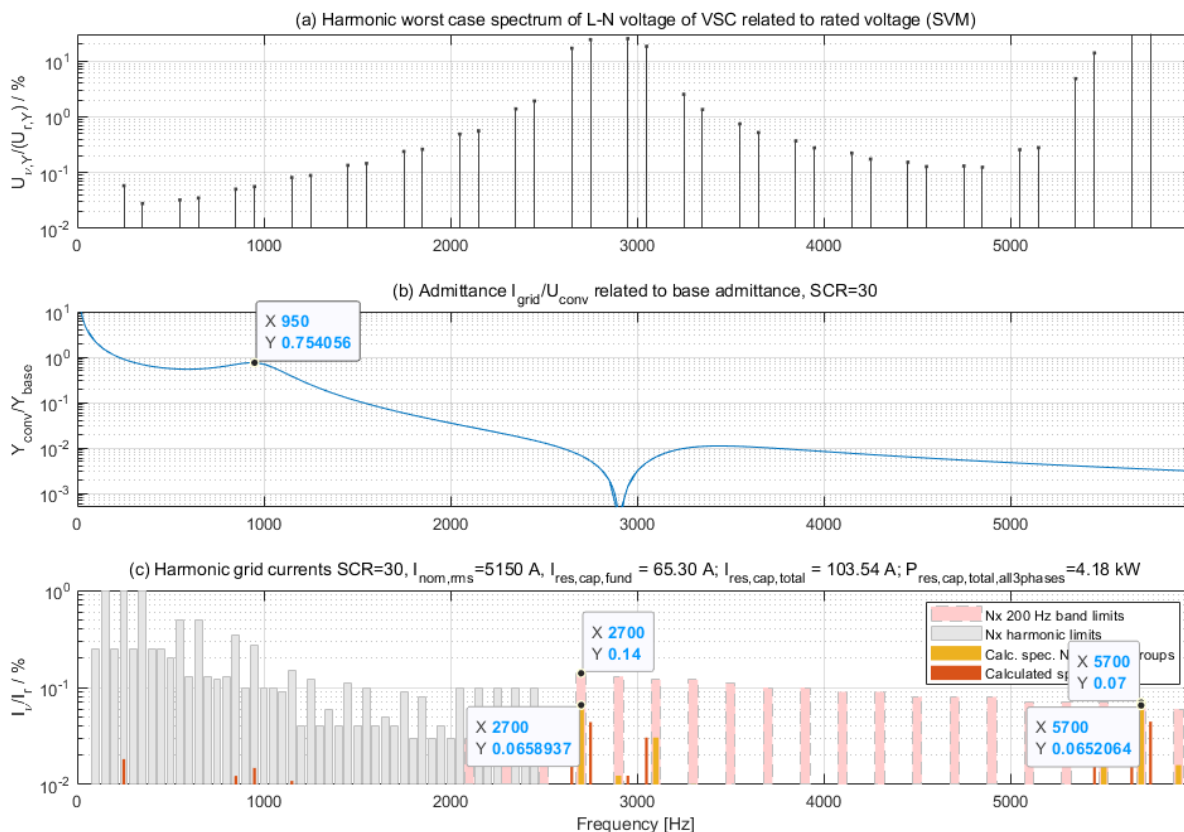


Abbildung 28: Dämpfungscharakteristik des vorgeschlagenen LCL-Filters mit zusätzlichen Trap-Filter für den Power Stack 1.0

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde zudem ein du/dt-Filter ausgelegt. Die entwickelte Auslegung diente darüber hinaus als Grundlage, um mit verschiedenen Drosselherstellern in Kontakt zu treten und die erforderlichen Induktivitäten zu spezifizieren. Abbildung 29 zeigt die erstellten 3D-CAD-Modelle der für den Netzfilter des Power Stacks 1.0 vorgesehenen Induktivitäten.

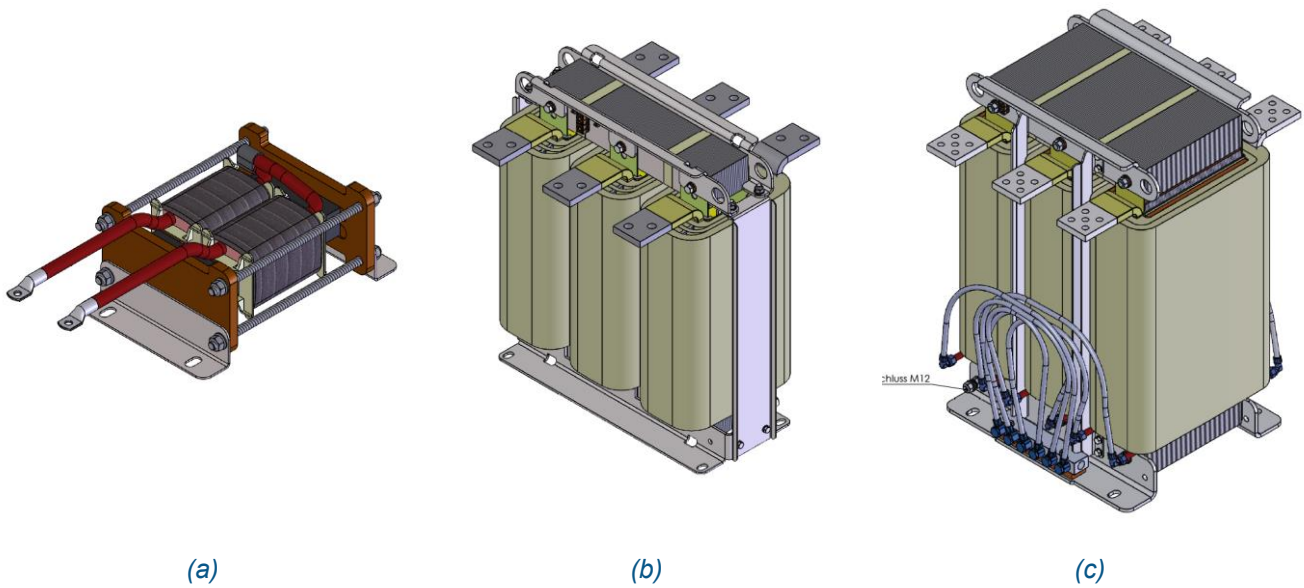


Abbildung 29: Ausgelegte Induktivitäten des LSC-Filters mit Trap-Filter: (a) Trap-Filter Induktivität, (b) du/dt-Filter Induktivität und (c) Induktivität des LCL-Filters

Zur Bewertung der potenziellen Vorteile der SiC-Technologie in Bezug auf die Filterauslegung wird das Filterdesign auf eine weitere Power Stack Variante angewendet. Um eine direkte Vergleichbarkeit innerhalb der 2,3-kV-Modulspannungsklasse zu gewährleisten, wird hierzu die Power Stack Variante 1.1 herangezogen, die ein 2,3-kV-IGBT-Modul verwendet. Durch den Vergleich der Ergebnisse beider Technologien lassen sich Unterschiede in den Anforderungen an die Filterdimensionierung sowie mögliche Effizienz- und Performancevorteile von SiC gegenüber herkömmlichen IGBT-Lösungen quantifizieren. Die für die Auslegung relevanten Annahmen zu Netzparametern, Anschlussrichtlinien und Trägerfrequenzen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Tabelle 5: Zusammenfassung der Daten für eine Filterauslegung

Komponente	Beschreibung	Einheit	Wert
$U_{r,LL}$	Nennspannung (Leiter-Leiter)	V	1.000
I_r	Nennstrom des Netzes	A	1.800
f_r	Nennfrequenz	Hz	50
U_{DC}	Nominelle Zwischenkreisspannung	V	1.600
u_k	Relatives Kurzschlussverhältnis des Transformators	-	8 %
L_{trf}	Transformatorinduktivität bezogen auf die Niederspannungsseite	μH	82
SCR	Netzkurzschlussverhältnis	-	50
$L_{f,grid}$	Netzinduktivität bezogen auf die Niederspannungsseite	μH	20
f_{car}	Trägerfrequenzen	kHz	1,95 (2,3-kV-IGBT Power Stack 1.1) 2,85 (2,3-kV-IGBT Power Stack 1.1) 6,00 (SiC Power Stack 3.0)
-	Grid code for filter design	-	IEEE 519-2022

Es werden zwei Filtervarianten unter Berücksichtigung unterschiedlicher maximal zulässiger Stromrippel analysiert. Tabelle 6 zeigt die Filterauslegung für einen Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) sowie für einen Power Stack 3.0 bei einem maximal zulässigen Stromrippel von 27 %. Für den Power Stack 3.0 ergibt sich aufgrund der höheren Schaltfrequenzen und der geringeren Schaltverluste der SiC-Technologie ein deutlich reduzierter Bedarf an Filterinduktivität und -kapazität. Dies verdeutlicht den technologischen Vorteil von SiC hinsichtlich kompakterer Bauformen, geringerer Verluste und einer insgesamt höheren Effizienz. Für beide Varianten wurden praxisrelevante Auslegungswerte der Filterkomponenten ermittelt. In Zusammenarbeit mit den Drosselherstellern konnten zudem Gewicht und Abmessungen der jeweiligen Drosselvarianten bestimmt werden, wodurch eine Berechnung und Gegenüberstellung der Stromdichte möglich wurde. Der Vergleich zeigt damit unmittelbar das Potenzial von SiC-basierten Power Stacks, die Filtertechnologie für Windenergieanwendungen signifikant hinsichtlich der erreichbaren Leistungsdichte zu verbessern.

Tabelle 6: Vergleichendes Auslegungsbeispiel eines Netzfilters für den Power Stack 1.1 und 3.0: Variante 1 mit 27 % maximal zulässigen Stromrippel

Komponente	Beschreibung	Einheit	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)
M	Gewicht	kg	490	290
D	Dimension	mm	545 x 800 x 490	520 x 720 x 390
f_{car}	Trägerfrequenz	Hz	2.850	6.000
$L_{f,\text{conv}}$	Umrichterseitige Induktivität	μH	137	65
C_{delta}	Filterkapazität	μF	100	25
m_{total}	Filter Gesamtgewicht	kg	505	297
V_{total}	Filter Gesamtvolumen	m^3	0,23	0,15

Abbildung 30 stellt die Stromdichte der verschiedenen Filterdesigns dar, wobei für den Power Stack 3.0 eine Trägerfrequenz von 6 kHz und für den Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) eine Trägerfrequenz von 2,85 kHz zugrunde gelegt wurde. Die höhere Schaltfrequenz des SiC-basierten Power Stack 3.0 ermöglicht eine signifikante Reduktion der Dimensionen und des Gewichts der benötigten Induktivitäten und Kapazitäten. Dadurch kann bei einem maximal zulässigen Stromrippel von 27 % eine um 33 % erhöhte Stromdichte realisiert werden. Dieser Effekt unterstreicht nicht nur die Effizienzvorteile der SiC-Technologie, sondern auch deren Potenzial, kompaktere und leichtere Filtersysteme zu ermöglichen. Für den praktischen Einsatz in Windenergieanlagen bedeutet dies eine Reduktion des Materialeinsatzes, eine vereinfachte Integration in das Gesamtsystem sowie eine Steigerung der Leistungsdichte, wodurch sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile realisiert werden können.

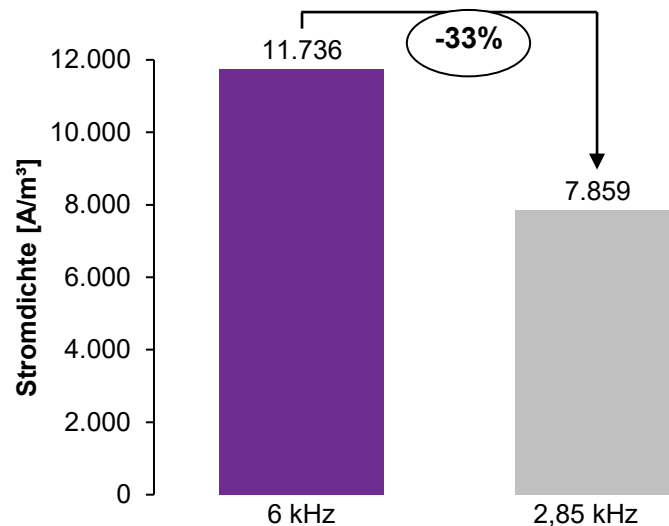


Abbildung 30: Vergleich der Stromdichte für eine Schaltfrequenz von 6 kHz und 2,85 kHz: Variante 1

Tabelle 7 stellt einen Vergleich von drei Power Stack Varianten mit unterschiedlicher Halbleitertechnologie und variierenden Trägerfrequenzen dar. Dabei zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen der gewählten Trägerfrequenz und den Eigenschaften des Filters: Mit abnehmender Trägerfrequenz steigen sowohl das Gewicht als auch die geometrischen Abmessungen der Filterkomponenten, während höhere Trägerfrequenzen eine kompaktere und leichtere Auslegung ermöglichen.

Tabelle 7: Vergleichendes Auslegungsbeispiel eines Netzfilters für den Power Stack 1.1 und 3.0: Variante 2 mit 19% maximal zulässigen Stromrippe

Komponente	Beschreibung	Einheit	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)
M	Gewicht	kg	580	450	310
D	Dimension	mm	750 x 850 x 450	750 x 850 x 400	590 x 800 x 390
f_{car}	Trägerfrequenz	Hz	1.950	2.850	6.000
$L_{\text{f,conv}}$	Umrichterseitige Induktivität	μH	277	189	90
C_{delta}	Filterkapazität	μF	150	75	20
m_{total}	Filter Gesamtgewicht	kg	597	462	315
V_{total}	Filter Gesamtvolumen	m^3	0,31	0,26	0,19

Wird die in Abbildung 31 dargestellte Stromdichte erneut als Vergleichskriterium herangezogen, so zeigt sich, dass durch die Erhöhung der Trägerfrequenz auf 6 kHz bei einem maximal zulässigen Stromrippe

von 19 % eine um 26 % höhere Stromdichte im Vergleich zur Trägerfrequenz von 2,85 kHz erzielt werden kann.

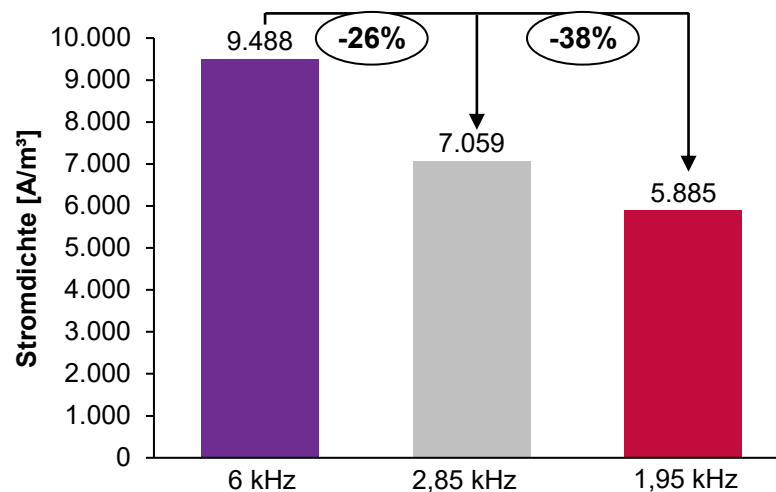


Abbildung 31: Vergleich der Stromdichte für eine Schaltfrequenz von 6 kHz, 2,85 kHz und 1,95 kHz bei 19% Stromripfel: Variante 2

3.4 Arbeitspaket 5: Prototyperprobung Windenergieanlage

Die Erprobung des Umrichterprototyps in einer realen Windenergieanlage konnte im Rahmen dieses Projektes nicht realisiert werden. Um dennoch eine applikationsnahe und wissenschaftlich fundierte Validierung des Konzepts zu gewährleisten, wird der Prototyp an einem 7,5-MVA-Back-to-Back-Teststand der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH untersucht. Ein solcher Prüfaufbau ermöglicht die gezielte Nachbildung netzseitiger Randbedingungen unter kontrollierten und reproduzierbaren Laborbedingungen. Dadurch lassen sich sowohl die elektrische Leistungsfähigkeit als auch das dynamische Verhalten des Umrichters systematisch erfassen, ohne dass externe Einflussfaktoren aus dem Feldbetrieb die Ergebnisse verfälschen. Im folgenden Unterkapitel werden der Aufbau des Teststands sowie die Resultate der durchgeführten Messkampagne im Detail dargestellt.

Messkampagne an einem applikationsnahen Teststand

Abbildung 32 zeigt das Prinzipschaltbild des 7,5-MVA-Back-to-Back-Teststands zur Untersuchung der Power Stacks 1.0 und 3.0. Auf der Niederspannungsseite des Dreiwickeltransformators ist ein Sinamics-S120-Umrichter angeschlossen, mit dem eine U/f-Regelung realisiert wird. Je nach verwendetem Prüfling (Device under Test, DUT) kann der Mittelspannungsabgriff des Transformators auf 700 V, 1000 V oder 1200 V konfiguriert werden. Auf der Hochspannungsseite wird das DUT so angesteuert, dass sich Wirk- und Blindleistung gegenseitig kompensieren. Dadurch müssen lediglich die elektrischen Verluste des Prüfstands sowie des DUTs auf der Niederspannungsseite eingespeist werden.

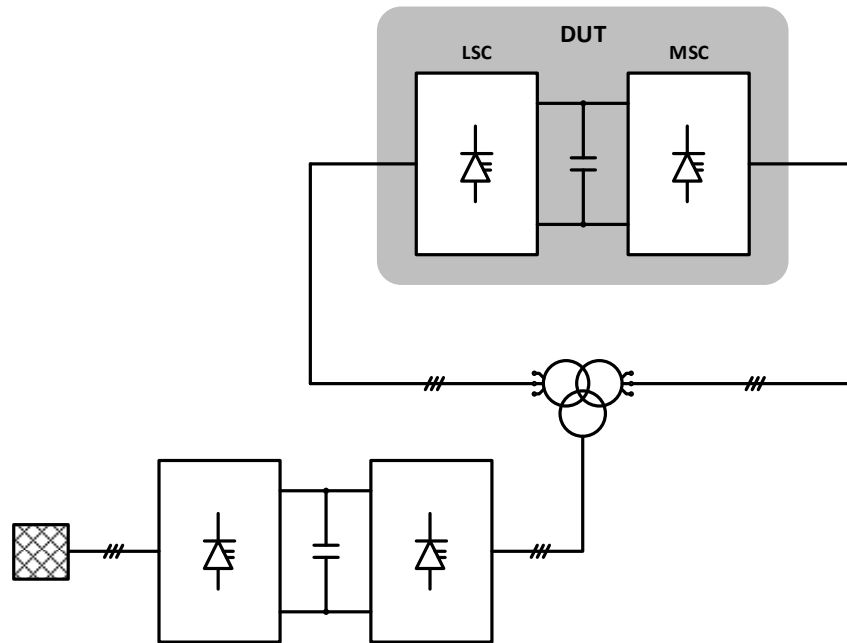


Abbildung 32: Prinzip-Ersatzschaltbild des 7,5 MVA Back-to-Back Teststandes der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH für die Tests der SiC Power Stacks 3.0

Die Kenndaten des 7,5 MVA Teststandes sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. Je nach Prüfling kann die Spannung und auch die Netzfrequenz durch den Einspeisenumrichter variabel eingestellt werden.

Tabelle 8: Kenndaten des 7,5 MVA Back-to-Back Teststandes

Parameter	Wert
Nennstrom	6.500 A _{rms}
Nennspannung	700 / 1.000 / 1.200 V _{rms}
Variable Spannung	[250 V _{rms} 1.500 V _{rms}]
Nennscheinleistung	7,5 MVA
Gesamtnennverluste	650 kW
Leistungsfaktor	[-1 0 1]
Frequenz	[10 Hz 1.800 Hz]

Der Prüfstand ermöglicht eine applikationsnahe Erprobung des Prototyps unter Betriebsbedingungen, wie sie in einer Windenergieanlage auftreten. Mit Ausnahme der mechanischen Komponenten einer Windturbine können die relevanten Leistungen sowohl auf der LSC- als auch auf der MSC-Seite nachgebildet werden. Abbildung 33 zeigt den im Testfeld der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH

installierten Nordex-Umrichter, der auf der Si-Power-Stack-1.0-Technologie basiert und von der Nordex Energy GmbH für die Untersuchungen bereitgestellt wurde.



Abbildung 33: Foto des Nordex Prototypen Umrichters im Testfeld der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH

Eine unvorhergesehene Lieferverzögerung der SiC-Gatetreiber wurde genutzt, um die messtechnische Validierung weiter zu detaillieren. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Infineon Technologies AG wurden hierzu zwei speziell präparierte SiC-MOSFET-Module mit integrierten optischen Temperatursensoren aufgebaut. Diese Module dienen unter anderem im Technologieträger dazu, die Sperrschichttemperaturen der SiC-MOSFETs direkt während des Umrichterbetriebs zu erfassen. Im Verlauf der Messkampagnen wurde der in Abbildung 33 dargestellte Umrichter entsprechend angepasst, um die Erprobung des Power Stacks 3.0 zu ermöglichen.

Die Messergebnisse der durchgeführten Messkampagne für den Power Stack 1.0 und den Power Stack 3.0 sind in den Tabelle 9 bis Tabelle 11 zusammengefasst. Untersucht wurden dabei Betriebsbedingungen mit Schaltfrequenzen von 2,85 kHz und 5,7 kHz unter Variation wesentlicher Parameter wie Netzspannung, Zwischenkreisspannung sowie Wirkleistungs- und Blindleistungseinspeisung. Auf diese Weise konnte eine systematische Analyse des Betriebsverhaltens beider Power Stack Varianten erfolgen. In Abbildung 34 sind ausgewählte Ergebnisse einander gegenübergestellt, um die Unterschiede in Effizienz, Leistungsverhalten und Regelgüte zwischen den beiden Technologien anschaulich darzustellen.

Tabelle 9: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 1.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz

Messnr.	I_{LSC} [A]	I_{MSC} [A]	$P_{LSC,ref}$ [kW]	$Q_{LSC,ref}$ [kVA]	$Q_{MSC,ref}$ [kVA]	$\text{Cos}(\varphi_{LSC})$	$\text{Cos}(\varphi_{MSC})$	$U_{DC,meas}$ [V]	P_{meas} [kW]	$Q_{LSC,meas}$ [kVA]	$Q_{MSC,meas}$ [kVA]	S_{LSC} [kVA]	S_{MSC} [kVA]	U_{Grid} [V]	η [%]
1	45	45	0	0	0	1,00	1,00	1.100	0	0	0	0	0	630	0
2	104	111	100	0	0	1,00	1,00	1.100	120	0	0	120	120	630	92
3	209	300	300	0	0	1,00	1,00	1.100	359	0	0	359	359	825	95
4	480	500	500	0	0	1,00	1,00	1.100	598	0	0	598	598	825	96
5	687	700	700	0	0	1,00	1,00	1.100	837	0	0	837	837	825	97
6	865	900	900	0	0	1,00	1,00	1.100	1.076	0	0	1.076	1.076	825	97
7	1.060	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.100	1.315	0	0	1.315	1.315	825	97
8	1.280	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.100	1.600	0	0	1.600	1.600	825	97
9	45	45	0	0	0	1,00	1,00	1.050	0	0	0	0	0	825	0
10	105	110	100	0	0	1,00	1,00	1.050	120	0	0	120	120	825	93
11	290	305	300	0	0	1,00	1,00	1.050	359	0	0	359	359	690	96
12	560	590	500	0	0	1,00	1,00	1.050	598	0	0	598	598	690	97
13	680	700	700	0	0	1,00	1,00	1.050	837	0	0	837	837	690	97
14	900	900	900	0	0	1,00	1,00	1.050	1.076	0	0	1.076	1.076	690	97
15	1.100	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.050	1.315	0	0	1.315	1.315	690	97
16	1.350	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.050	1.530	0	0	1.530	1.530	650	97



17	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.150	0	0	0	0	0	650	0
18	100	100	100	0	0	1,00	1,00	1.150	120	0	0	120	120	690	91
19	300	300	300	0	0	1,00	1,00	1.150	359	0	0	359	359	690	96
20	500	500	500	0	0	1,00	1,00	1.150	598	0	0	598	598	690	96
21	680	710	700	0	0	1,00	1,00	1.150	837	0	0	837	837	650	96
22	870	930	900	0	0	1,00	1,00	1.150	1.076	0	0	1.076	1.076	630	97
23	1.100	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.150	1.315	0	0	1.315	1.315	690	97
24	1.270	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.150	1.530	0	0	1.530	1.530	690	97
25	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.200	0	0	0	0	0	685	0
26	100	100	100	0	0	1,00	1,00	1.200	120	0	0	120	120	635	91
27	300	300	300	0	0	1,00	1,00	1.200	359	0	0	359	359	640	95
28	500	500	500	0	0	1,00	1,00	1.200	598	0	0	598	598	690	96
29	690	700	700	0	0	1,00	1,00	1.200	837	0	0	837	837	690	96
30	880	920	900	0	0	1,00	1,00	1.200	1.076	0	0	1.076	1.076	650	96
31	1.100	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.200	1.315	0	0	1.315	1.315	615	96
32	1.350	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.200	1.530	0	0	1.530	1.530	690	98
33	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.250	0	0	0	0	0	690	0



34	100	100	100	0	0	1,00	1,00	1.250	120	0	0	120	120	690	91
35	290	310	300	0	0	1,00	1,00	1.250	359	0	0	359	359	690	97
36	480	510	500	0	0	1,00	1,00	1.250	598	0	0	598	598	685	98
37	700	700	700	0	0	1,00	1,00	1.250	837	0	0	837	837	660	98
38	900	900	900	0	0	1,00	1,00	1.250	1.076	0	0	1.076	1.076	645	99
39	1.100	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.250	1.315	0	0	1.315	1.315	690	98
40	1.350	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.250	1.530	0	0	1.530	1.530	690	98
41	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	690	0
42	100	100	100	0	0	1,00	1,00	1.300	120	0	0	120	120	690	90
43	300	300	300	0	0	1,00	1,00	1.300	359	0	0	359	359	650	96
44	500	500	500	0	0	1,00	1,00	1.300	598	0	0	598	598	605	97
45	700	700	700	0	0	1,00	1,00	1.300	837	0	0	837	837	690	97
46	900	900	900	0	0	1,00	1,00	1.300	1.076	0	0	1.076	1.076	690	96
47	1.100	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.315	0	0	1.315	1.315	690	96
48	1.350	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.550	0	0	1.550	1.550	690	96
49	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.100	0	0	0	0	0	630	0
50	100	110	100	0	0	1,00	1,00	1.100	109	0	0	109	109	690	91



51	290	300	300	0	0	1,00	1,00	1.100	327	0	0	327	327	690	96
52	480	500	500	0	0	1,00	1,00	1.100	546	0	0	546	546	690	96
53	670	700	700	0	0	1,00	1,00	1.100	764	0	0	764	764	680	96
54	860	910	900	0	0	1,00	1,00	1.100	982	0	0	982	982	670	97
55	1.050	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.100	1.200	0	0	1.200	1.200	630	97
56	1.260	1.330	1.350	0	0	1,00	1,00	1.100	1.440	0	0	1.440	1.440	630	97
57	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	825	0
58	100	100	100	0	0	1,00	1,00	1.300	143	0	0	143	143	825	91
59	300	300	300	0	0	1,00	1,00	1.300	429	0	0	429	429	825	96
60	485	500	500	0	0	1,00	1,00	1.300	714	0	0	714	714	825	97
61	675	700	700	0	0	1,00	1,00	1.300	1.000	0	0	1.000	1.000	825	97
62	870	900	900	0	0	1,00	1,00	1.300	1.286	0	0	1.286	1.286	825	97
63	1.050	1.100	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.572	0	0	1.572	1.572	825	97
64	1.290	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.910	0	0	1.910	1.910	825	97
65	112	121	100	48	48	0,90	-0,90	1.100	120	58	58	133	133	690	92
66	329	335	300	136	150	0,90	-0,90	1.100	359	162	179	393	401	690	96
67	530	570	500	226	268	0,90	-0,90	1.100	598	270	320	656	678	690	97



68	740	807	700	310	402	0,90	-0,90	1.100	837	370	480	915	965	690	97
69	1.000	1.000	900	436	436	0,90	-0,90	1.100	1.076	521	521	1.195	1.195	690	97
70	940	1.050	1.100	360	510	0,90	-0,90	1.100	1.100	430	610	1.181	1.258	650	97
71	1.050	1.250	1.200	402	594	0,90	-0,90	1.100	1.100	480	710	1.200	1.309	650	97
72	130	140	100	67	75	0,80	-0,80	1.100	120	80	90	144	149	690	92
73	366	390	300	209	234	0,80	-0,80	1.100	359	250	280	437	455	690	96
74	590	652	500	351	418	0,80	-0,80	1.100	598	420	500	730	779	690	96
75	850	970	700	469	607	0,80	-0,80	1.100	820	560	725	993	1.095	650	96
76	910	1.060	900	502	669	0,80	-0,80	1.100	850	600	800	1.040	1.167	630	96
77	145	195	100	105	167	0,70	-0,70	1.100	120	125	200	173	233	690	93
78	400	430	300	284	318	0,70	-0,70	1.100	359	340	380	494	522	690	96
79	666	751	500	469	561	0,70	-0,70	1.100	590	560	670	813	893	685	96
80	850	998	700	552	711	0,70	-0,70	1.100	700	660	850	962	1.101	635	95
81	960	1.170	950	636	837	0,70	-0,70	1.100	820	760	1.000	1.118	1.293	640	95
82	155	175	100	117	134	0,60	-0,60	1.100	120	140	160	184	200	690	92
83	470	520	300	368	418	0,60	-0,60	1.100	359	440	500	568	615	690	95
84	785	950	500	586	753	0,60	-0,60	1.100	580	700	900	909	1.071	650	95



85	1.050	1.330	700	753	1004	0,60	-0,60	1.100	740	900	1.200	1.165	1.410	615	95
86	113	121	100	44	48	-0,90	0,90	1.100	120	52	57	130	132	690	92
87	315	330	300	138	134	-0,90	0,90	1.100	359	165	160	395	393	690	96
88	515	530	500	226	205	-0,90	0,90	1.100	598	270	245	656	646	690	96
89	740	750	700	314	264	-0,90	0,90	1.100	830	375	315	911	888	690	97
90	910	895	900	402	293	-0,90	0,90	1.100	1.000	480	350	1.109	1.059	685	97
91	1.215	1.200	1.100	510	360	-0,90	0,90	1.100	1.300	610	430	1.436	1.369	660	97
92	1.356	1.340	1.200	544	360	-0,90	0,90	1.100	1.430	650	430	1.571	1.493	645	97
93	125	135	100	69	75	-0,80	0,80	1.100	120	82	90	145	149	690	92
94	360	366	300	213	205	-0,80	0,80	1.100	359	255	245	440	434	690	96
95	595	600	500	360	326	-0,80	0,80	1.100	598	430	390	736	714	690	96
96	830	820	700	502	435	-0,80	0,80	1.100	830	600	520	1.024	979	690	96
97	1.060	1.030	900	594	494	-0,80	0,80	1.100	1.000	710	590	1.226	1.161	650	96
98	1.350	1.320	1.050	711	536	-0,60	0,80	1.100	1.200	850	640	1.471	1.360	605	96
99	140	150	100	92	100	-0,70	0,70	1.100	120	110	120	162	169	690	92
100	410	415	300	293	284	-0,70	0,70	1.100	359	350	340	501	494	690	95
101	690	675	500	494	452	-0,70	0,70	1.100	598	590	540	840	805	690	96



102	950	925	700	674	602	-0,70	0,70	1.100	830	805	720	1.156	1.099	690	96
103	1.415	1.350	950	920	753	-0,70	0,70	1.100	1.130	1.100	900	1.577	1.445	630	95
104	160	170	100	121	132	-0,60	0,60	1.100	120	145	158	188	198	690	91
105	477	484	300	385	377	-0,60	0,60	1.100	359	460	450	583	575	690	95
106	795	781	500	636	594	-0,60	0,60	1.100	598	760	710	967	928	690	95
107	1.115	1.060	700	879	774	-0,60	0,60	1.100	830	1.050	925	1.338	1.243	680	95
108	1.219	1.225	800	1.004	879	-0,60	0,60	1.100	960	1.200	1.050	1.537	1.423	670	95

Tabelle 10: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 3.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz und einer Schaltfrequenz von 2,85 kHz

Messnr.	I_{LSC} [A]	I_{MSC} [A]	$P_{LSC,ref}$ [kW]	$Q_{LSC,ref}$ [kVA]	$Q_{MSC,ref}$ [kVA]	$\cos(\varphi_{LSC})$	$\cos(\varphi_{MSC})$	$U_{DC,meas}$ [V]	P_{meas} [kW]	$Q_{LSC,meas}$ [kVA]	$Q_{MSC,meas}$ [kVA]	S_{LSC} [kVA]	S_{MSC} [kVA]	U_{Grid} [V]	η [%]
1	45	45	0	0	0	1,00	1,00	1.100	0	0	0	0	0	680	0
2	100	104	100	0	0	1,00	1,00	1.100	100	0	0	100	100	680	95
3	285	292	300	0	0	1,00	1,00	1.100	300	0	0	300	300	670	99
4	460	480	500	0	0	1,00	1,00	1.100	500	0	0	500	500	667	99
5	696	713	700	0	0	1,00	1,00	1.100	750	0	0	750	750	663	99
6	825	850	900	0	0	1,00	1,00	1.100	900	0	0	900	900	650	99
7	1.030	1.050	1.100	0	0	1,00	1,00	1.100	1.100	0	0	1.100	1.100	650	99



8	1.320	1.360	1.350	0	0	1,00	1,00	1.100	1.400	0	0	1.400	1.400	650	99
9	45	45	0	0	0	1,00	1,00	1.050	0	0	0	0	0	655	0
10	105	110	100	0	0	1,00	1,00	1.050	100	0	0	100	100	650	95
11	308	315	300	0	0	1,00	1,00	1.050	320	0	0	320	320	645	98
12	500	510	500	0	0	1,00	1,00	1.050	520	0	0	520	520	641	99
13	714	730	700	0	0	1,00	1,00	1.050	740	0	0	740	740	630	99
14	878	900	900	0	0	1,00	1,00	1.050	900	0	0	900	900	630	99
15	1.142	1.160	1.100	0	0	1,00	1,00	1.050	1.180	0	0	1.180	1.180	620	99
16	1.300	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.050	1.300	0	0	1.300	1.300	610	99
17	50	50	0	0	0	1,00	1,00	1.150	0	0	0	0	0	680	0
18	110	110	100	0	0	1,00	1,00	1.150	100	0	0	100	100	680	94
19	300	310	300	0	0	1,00	1,00	1.150	330	0	0	330	330	675	98
20	500	515	500	0	0	1,00	1,00	1.150	550	0	0	550	550	672	99
21	730	750	700	0	0	1,00	1,00	1.150	800	0	0	800	800	667	99
22	876	900	900	0	0	1,00	1,00	1.150	950	0	0	950	950	664	99
23	1.166	1.200	1.100	0	0	1,00	1,00	1.150	1.250	0	0	1.250	1.250	650	99
24	1.300	1.340	1.350	0	0	1,00	1,00	1.150	1.380	0	0	1.380	1.380	650	99



25	50	51	0	0	0	1,00	1,00	1.200	0	0	0	0	0	690	0
26	100	105	100	0	0	1,00	1,00	1.200	120	0	0	120	120	690	93
27	297	307	307	0	0	1,00	1,00	1.200	330	0	0	330	330	680	98
28	504	520	500	0	0	1,00	1,00	1.200	560	0	0	560	560	680	99
29	700	715	700	0	0	1,00	1,00	1.200	770	0	0	770	770	678	99
30	880	900	900	0	0	1,00	1,00	1.200	960	0	0	960	960	670	99
31	1.105	1.136	1.100	0	0	1,00	1,00	1.200	1.200	0	0	1.200	1.200	663	99
32	1.300	1.330	1.350	0	0	1,00	1,00	1.200	1.400	0	0	1.400	1.400	660	99
33	50	50	0	0	0	1,00	1,00	1.250	0	0	0	0	0	690	0
34	98	105	100	0	0	1,00	1,00	1.250	100	0	0	100	100	690	93
35	306	317	300	0	0	1,00	1,00	1.250	350	0	0	350	350	690	97
36	496	510	500	0	0	1,00	1,00	1.250	560	0	0	560	560	690	98
37	700	715	700	0	0	1,00	1,00	1.250	780	0	0	780	780	690	99
38	895	920	900	0	0	1,00	1,00	1.250	1.000	0	0	1.000	1.000	690	99
39	1.128	1.161	1.100	0	0	1,00	1,00	1.250	1.250	0	0	1.250	1.250	676	99
40	1.322	1.363	1.350	0	0	1,00	1,00	1.250	1.450	0	0	1.450	1.450	666	99
41	50	55	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	690	0



42	100	105	100	0	0	1,00	1,00	1.300	100	0	0	100	100	690	90
43	300	312	300	0	0	1,00	1,00	1.300	340	0	0	340	340	690	97
44	488	504	500	0	0	1,00	1,00	1.300	550	0	0	550	550	690	98
45	700	717	700	0	0	1,00	1,00	1.300	780	0	0	780	780	685	98
46	900	924	900	0	0	1,00	1,00	1.300	1.000	0	0	1.000	1.000	680	98
47	1.131	1.166	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.250	0	0	1.250	1.250	674	98
48	1.378	1.422	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.500	0	0	1.500	1.500	663	98
49	47	46	0	0	0	1,00	1,00	1.100	0	0	0	0	0	630	0
50	100	110	100	0	0	1,00	1,00	1.100	100	0	0	100	100	630	95
51	290	303	300	0	0	1,00	1,00	1.100	300	0	0	300	300	630	98
52	492	505	500	0	0	1,00	1,00	1.100	500	0	0	500	500	625	99
53	693	712	700	0	0	1,00	1,00	1.100	764	0	0	764	764	620	99
54	880	904	900	0	0	1,00	1,00	1.100	880	0	0	880	880	615	99
55	1.060	1.091	1.100	0	0	1,00	1,00	1.100	1.050	0	0	1.050	1.050	610	99
56	1.327	1.370	1.350	0	0	1,00	1,00	1.100	1.300	0	0	1.300	1.300	600	99
57	56	55	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	740	0
58	95	100	100	0	0	1,00	1,00	1.300	100	0	0	100	100	735	92



59	290	300	300	0	0	1,00	1,00	1.300	350	0	0	350	350	735	98
60	490	500	500	0	0	1,00	1,00	1.300	580	0	0	580	580	730	99
61	690	708	700	0	0	1,00	1,00	1.300	820	0	0	820	1.000	730	99
62	883	907	900	0	0	1,00	1,00	1.300	1.050	0	0	1.050	1.050	730	99
63	1.080	1.109	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.270	0	0	1.270	1.270	720	99
64	1.276	1.313	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.500	0	0	1.500	1.500	720	99
65	110	116	100	41	39	0,90	-0,90	1.100	100	49	47	111	110	650	94
66	318	336	300	118	131	0,90	-0,90	1.100	300	141	156	331	338	650	98
67	548	588	500	192	234	0,90	-0,90	1.100	500	230	280	550	573	650	99
68	726	773	700	276	335	0,90	-0,90	1.100	700	330	400	774	806	650	99
69	780	890	900	289	393	0,90	-0,90	1.100	750	345	470	-	885	650	99
70	906	980	1.100	339	427	0,90	-0,90	1.100	850	405	510	942	991	640	99
71	1.175	1.351	1.200	381	594	0,90	-0,90	1.100	1.000	455	710	1.099	1.226	570	99
72	120	130	100	63	63	0,80	-0,80	1.100	100	75	75	125	125	650	93
73	350	374	300	180	199	0,80	-0,80	1.100	300	215	238	369	383	645	99
74	488	532	500	247	276	0,80	-0,80	1.100	410	295	330	505	526	633	99
75	666	727	700	335	393	0,80	-0,80	1.100	550	400	470	680	723	625	99



76	890	1.000	900	418	536	0,80	-0,80	1.100	700	500	640	860	948	590	99
77	135	144	100	84	84	0,70	-0,70	1.100	100	100	100	141	141	646	95
78	336	359	300	205	218	0,70	-0,70	1.100	250	245	260	350	361	635	98
79	504	555	500	293	335	0,70	-0,70	1.100	360	350	400	502	538	610	99
80	700	790	700	402	485	0,70	-0,70	1.100	500	480	580	693	766	605	99
81	890	1.046	950	485	619	0,70	-0,70	1.100	600	580	740	835	953	573	99
82	156	169	100	109	113	0,60	-0,60	1.100	100	130	135	164	168	644	94
83	311	334	300	213	226	0,60	-0,60	1.100	200	255	270	324	336	635	97
84	455	500	500	310	343	0,60	-0,60	1.100	290	370	410	470	502	635	98
85	684	786	700	439	523	0,60	-0,60	1.100	420	525	625	672	753	603	99
86	110	116	100	33	39	-0,90	0,90	1.100	100	40	47	108	110	650	95
87	318	322	300	115	110	-0,90	0,90	1.100	300	137	132	330	328	643	99
88	550	546	500	196	167	-0,90	0,90	1.100	500	234	200	552	539	622	99
89	690	981	700	251	205	-0,90	0,90	1.100	630	300	245	698	676	622	99
90	875	870	900	301	247	-0,90	0,90	1.100	800	360	295	877	853	617	99
91	1.144	1.110	1.100	385	259	-0,90	0,90	1.100	970	460	310	1.074	1.018	580	99
92	1.240	1.206	1.200	396	259	-0,90	0,90	1.100	1050	473	310	1.152	1.095	570	99



93	121	127	100	53	60	-0,80	0,80	1.100	100	63	72	118	123	650	94
94	357	355	300	180	172	-0,80	0,80	1.100	300	215	205	369	363	640	98
95	507	502	500	255	238	-0,80	0,80	1.100	420	305	285	519	508	640	99
96	758	735	700	368	320	-0,80	0,80	1.100	600	440	382	744	711	610	99
97	920	895	900	431	366	-0,80	0,80	1.100	720	515	438	885	843	600	99
98	1.109	1.050	1.050	494	385	-0,80	0,80	1.100	810	590	460	1.002	932	560	99
99	136	143	100	75	84	-0,70	0,70	1.100	100	90	100	135	141	650	95
100	292	295	300	176	177	-0,70	0,70	1.100	220	210	212	304	306	650	98
101	518	513	500	310	297	-0,70	0,70	1.100	380	370	355	530	520	640	99
102	699	678	700	410	374	-0,70	0,70	1.100	500	490	447	700	671	620	99
103	1.029	970	950	577	489	-0,70	0,70	1.100	700	690	585	983	912	595	99
104	125	134	100	75	88	-0,60	0,60	1.100	80	90	105	120	132	650	93
105	315	319	300	209	213	-0,60	0,60	1.100	200	250	255	320	324	644	97
106	517	512	500	339	331	-0,60	0,60	1.100	320	405	395	516	508	630	98
107	745	722	700	485	452	-0,60	0,60	1.100	460	580	540	740	709	620	98
108	823	796	800	536	494	-0,60	0,60	1.100	500	640	590	812	773	615	98



Table 11: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 3.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz und einer Schaltfrequenz von 5,7 kHz

Messnr.	I_{LSC} [A]	I_{MSC} [A]	$P_{LSC,ref}$ [kW]	$Q_{LSC,ref}$ [kVA]	$Q_{MSC,ref}$ [kVA]	$\text{Cos}(\varphi_{LSC})$	$\text{Cos}(\varphi_{MSC})$	$U_{DC,meas}$ [V]	P_{meas} [kW]	$Q_{LSC,meas}$ [kVA]	$Q_{MSC,meas}$ [kVA]	S_{LSC} [kVA]	S_{MSC} [kVA]	U_{Grid} [V]	η [%]
1	25	23	0	0	0	1,00	1,00	1.100	0	0	0	0	0	580	0
2	105	110	100	0	0	1,00	1,00	1.100	100	0	0	100	100	580	97
3	316	325	300	0	0	1,00	1,00	1.100	300	0	0	300	300	580	99
4	538	553	500	0	0	1,00	1,00	1.100	500	0	0	500	500	567	99
5	720	740	700	0	0	1,00	1,00	1.100	660	0	0	660	660	560	99
6	907	940	900	0	0	1,00	1,00	1.100	830	0	0	830	830	559	99
7	1.092	1.133	1.100	0	0	1,00	1,00	1.100	1.000	0	0	1.000	1.000	554	99
8	1.285	1.330	1.350	0	0	1,00	1,00	1.100	1.150	0	0	1.150	1.150	543	99
9	25	22	0	0	0	1,00	1,00	1.050	0	0	0	0	0	550	0
10	109	116	100	0	0	1,00	1,00	1.050	100	0	0	100	100	552	96
11	332	342	300	0	0	1,00	1,00	1.050	300	0	0	300	300	550	98
12	520	534	500	0	0	1,00	1,00	1.050	460	0	0	460	460	540	99
13	727	750	700	0	0	1,00	1,00	1.050	630	0	0	630	630	527	99
14	866	895	900	0	0	1,00	1,00	1.050	750	0	0	750	750	527	99
15	1.130	1.153	1.100	0	0	1,00	1,00	1.050	955	0	0	955	955	519	99



16	1.298	1.346	1.350	0	0	1,00	1,00	1.050	1.100	0	0	1100	1100	512	98
17	27	25	0	0	0	1,00	1,00	1.150	0	0	0	0	0	603	0
18	101	107	100	0	0	1,00	1,00	1.150	100	0	0	100	100	603	95
19	304	314	300	0	0	1,00	1,00	1.150	300	0	0	300	300	600	98
20	500	514	500	0	0	1,00	1,00	1.150	490	0	0	490	490	598	99
21	710	732	700	0	0	1,00	1,00	1.150	690	0	0	690	690	590	99
22	889	920	900	0	0	1,00	1,00	1.150	850	0	0	850	850	582	99
23	1.094	1.134	1.100	0	0	1,00	1,00	1.150	1.040	0	0	1040	1040	575	99
24	1.300	1.350	1.350	0	0	1,00	1,00	1.150	1.220	0	0	1220	1220	565	98
25	28	25	0	0	0	1,00	1,00	1.200	0	0	0	0	0	624	0
26	99	104	100	0	0	1,00	1,00	1.200	100	0	0	100	100	624	96
27	293	302	300	0	0	1,00	1,00	1.200	300	0	0	300	300	622	99
28	495	508	500	0	0	1,00	1,00	1.200	500	0	0	500	500	615	99
29	712	734	700	0	0	1,00	1,00	1.200	700	0	0	700	700	614	99
30	899	926	900	0	0	1,00	1,00	1.200	900	0	0	900	900	609	99
31	1.090	1.130	1.100	0	0	1,00	1,00	1.200	1.080	0	0	1080	1080	598	98
32	1.304	1.356	1.350	0	0	1,00	1,00	1.200	1.280	0	0	1280	1280	591	98



33	29	27	0	0	0	1,00	1,00	1.250	0	0	0	0	0	650	0
34	95	100	100	0	0	1,00	1,00	1.250	100	0	0	100	100	647	95
35	299	309	300	0	0	1,00	1,00	1.250	320	0	0	320	320	645	98
36	492	506	500	0	0	1,00	1,00	1.250	520	0	0	520	520	641	99
37	713	735	700	0	0	1,00	1,00	1.250	740	0	0	740	740	635	99
38	880	910	900	0	0	1,00	1,00	1.250	920	0	0	920	920	635	99
39	1.095	1.134	1.100	0	0	1,00	1,00	1.250	1.130	0	0	1130	1130	625	98
40	1.310	1.361	1.350	0	0	1,00	1,00	1.250	1.330	0	0	1330	1330	613	98
41	31	28	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	672	0
42	101	107	100	0	0	1,00	1,00	1.300	110	0	0	110	110	672	95
43	299	309	300	0	0	1,00	1,00	1.300	330	0	0	330	330	670	98
44	493	509	500	0	0	1,00	1,00	1.300	540	0	0	540	540	666	98
45	729	750	700	0	0	1,00	1,00	1.300	800	0	0	800	800	663	98
46	890	921	900	0	0	1,00	1,00	1.300	970	0	0	970	970	661	99
47	1.089	1.126	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.180	0	0	1.180	1.180	657	98
48	1.291	1.339	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.380	0	0	1.380	1.380	647	98
65	116	123	100	41	41	0,90	-0,90	1.100	100	48	48	111	111	576	95



66	337	359	300	117	126	0,90	-0,90	1.100	280	140	150	313	318	554	99
67	501	538	500	151	184	0,90	-0,90	1.100	400	180	220	439	457	530	99
68	680	744	700	201	259	0,90	-0,90	1.100	520	240	310	573	605	512	99
69	800	904	900	226	326	0,90	-0,90	1.100	600	270	390	658	716	497	98
70	1.000	1.170	1.100	268	427	0,90	-0,90	1.100	700	320	510	770	866	463	97
71	1.055	1.220	1.200	297	464	0,90	-0,90	1.100	800	355	555	875	974	505	97
72	131	140	100	61	63	0,80	-0,80	1.100	100	73	75	124	125	564	96
73	296	318	300	130	144	0,80	-0,80	1.100	220	155	172	269	279	550	98
74	535	582	500	230	268	0,80	-0,80	1.100	380	275	320	469	497	535	98
75	700	787	700	293	368	0,80	-0,80	1.100	500	350	440	610	666	530	98
76	960	1.152	1.000	385	544	0,80	-0,80	1.100	640	460	650	788	912	500	97
77	138	150	100	74	78	0,70	-0,70	1.100	90	88	93	126	129	542	95
78	306	337	300	159	180	0,70	-0,70	1.100	200	190	215	276	294	547	97
79	551	616	500	284	335	0,70	-0,70	1.100	350	340	400	488	532	540	98
80	712	820	700	552	711	0,70	-0,70	1.100	450	660	850	799	962	536	97
81	843	1.016	950	418	552	0,70	-0,70	1.100	520	500	660	721	840	521	97
82	141	153	100	84	88	0,60	-0,60	1.100	80	100	105	128	132	544	95



83	323	356	300	188	209	0,60	-0,60	1.100	180	225	250	288	308	543	97
84	483	540	500	272	310	0,60	-0,60	1.100	260	325	370	416	452	528	97
85	690	800	700	368	443	0,60	-0,60	1.100	350	440	530	562	635	500	97
86	120	126	100	33	38	-0,90	0,90	1.100	100	40	46	108	110	551	96
87	350	355	300	109	101	-0,90	0,90	1.100	280	130	121	309	305	541	98
88	537	538	500	142	126	-0,90	0,90	1.100	420	170	150	453	446	530	99
89	705	701	700	209	167	-0,90	0,90	1.100	550	250	200	604	585	524	99
90	943	922	900	276	192	-0,90	0,90	1.100	700	330	230	774	737	502	98
91	1.132	1.107	1.100	318	192	-0,90	0,90	1.100	850	380	230	931	881	500	98
92	1.317	1.272	1.200	351	176	-0,90	0,90	1.100	900	420	210	993	924	455	97
93	141	144	100	55	61	-0,80	0,80	1.100	100	66	73	120	124	568	95
94	312	315	300	136	134	-0,80	0,80	1.100	230	162	160	281	280	555	97
95	505	502	500	209	192	-0,80	0,80	1.100	350	250	230	430	419	524	98
96	753	729	700	301	251	-0,80	0,80	1.100	500	360	300	616	583	502	98
97	914	880	900	360	284	-0,80	0,80	1.100	600	430	340	738	690	494	98
98	1.089	1.031	1.050	435	326	-0,60	0,80	1.100	720	520	390	888	819	499	98
99	138	143	100	69	75	-0,70	0,70	1.100	90	83	90	122	127	566	95



100	307	311	300	159	159	-0,70	0,70	1.100	200	190	190	276	276	559	97
101	526	520	500	268	253	-0,70	0,70	1.100	330	320	302	460	447	541	98
102	726	700	700	368	326	-0,70	0,70	1.100	450	440	390	629	595	536	98
103	977	927	950	469	393	-0,70	0,70	1.100	580	560	470	806	747	505	98
104	142	148	100	79	88	-0,60	0,60	1.100	80	95	105	124	132	568	94
105	317	323	300	184	188	-0,60	0,60	1.100	180	220	225	284	288	561	97
106	494	488	500	286	274	-0,60	0,60	1.100	270	342	328	436	425	547	97
107	732	708	700	418	385	-0,60	0,60	1.100	400	500	460	640	610	541	97
108	800	780	800	452	410	-0,60	0,60	1.100	430	540	490	690	652	531	97
109	31	28	0	0	0	1,00	1,00	1.300	0	0	0	0	0	672	0
110	101	107	100	0	0	1,00	1,00	1.300	110	0	0	110	110	672	95
111	299	309	300	0	0	1,00	1,00	1.300	330	0	0	330	330	670	98
112	493	509	500	0	0	1,00	1,00	1.300	540	0	0	540	540	666	98
113	729	750	700	0	0	1,00	1,00	1.300	800	0	0	800	800	663	98
114	890	921	900	0	0	1,00	1,00	1.300	970	0	0	970	970	661	99
115	1.089	1.126	1.100	0	0	1,00	1,00	1.300	1.180	0	0	1.180	1.180	657	98
116	1.291	1.339	1.350	0	0	1,00	1,00	1.300	1.380	0	0	1.380	1.380	647	98

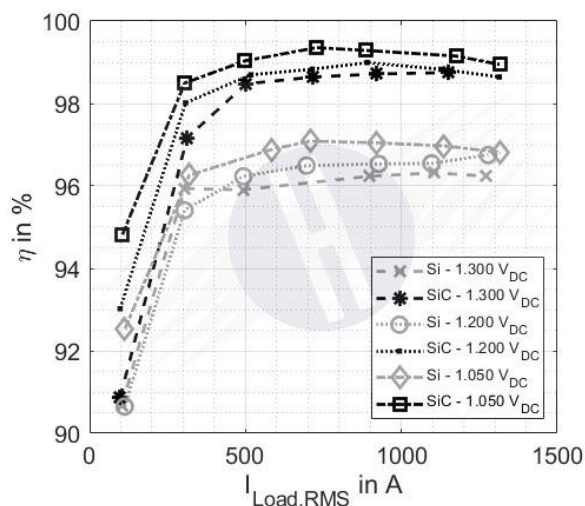
Abbildung 34 stellt für ausgewählte Betriebspunkte aus den Tabelle 9 bis Tabelle 11 einen Vergleich des Wirkungsgrads der Power Stack Varianten 1.0 und 3.0 sowie die Sperrschichttemperatur des Power Stack 3.0 bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen dar.

In Abbildung 34 a) ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad mit steigender Zwischenkreisspannung unabhängig von der verwendeten Power-Stack-Variante abnimmt. Ein direkter Vergleich zeigt jedoch, dass der Power Stack 3.0 über alle betrachteten Zwischenkreisspannungen hinweg höhere Wirkungsgrade erzielt. Mit nahezu 99 % erreicht er ein sehr hohes Effizienzniveau.

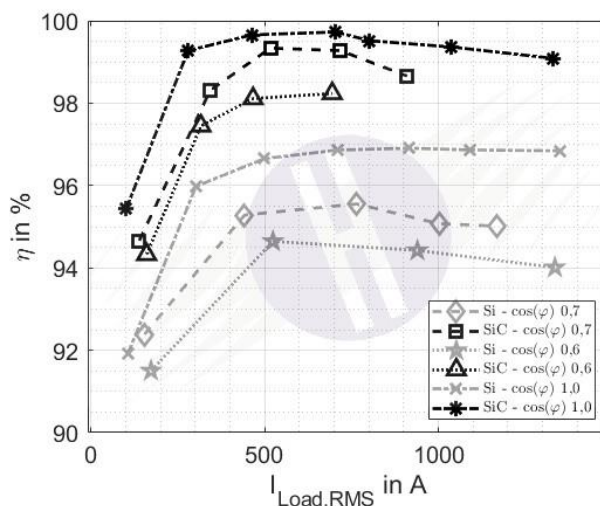
Abbildung 34 b) zeigt den Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$. Auf der LSC-Seite können unterschiedliche Blindleistungseinspeisungen zur Netzstützung zu kleineren $\cos(\varphi)$ -Werten führen, während auf der MSC-Seite aufgrund des Generators ebenfalls Werte kleiner als 1 zu erwarten sind. Wie zu erwarten, sinkt der Wirkungsgrad mit abnehmendem $\cos(\varphi)$. Auch hier weist der Power Stack 3.0 in allen Betriebspunkten höhere Wirkungsgrade auf als der Power Stack 1.0. Der maximale Wirkungsgrad des Power Stack 3.0 beträgt 99,5 % und ist damit als außerordentlich hoch einzustufen.

In Abbildung 34 c) wird der Wirkungsgrad des Power Stack 3.0 für unterschiedliche Schaltfrequenzen und Zwischenkreisspannungen dargestellt. Besonders bei höheren Lastströmen zeigt sich, dass kleinere Schaltfrequenzen erwartungsgemäß zu einem höheren Wirkungsgrad führen.

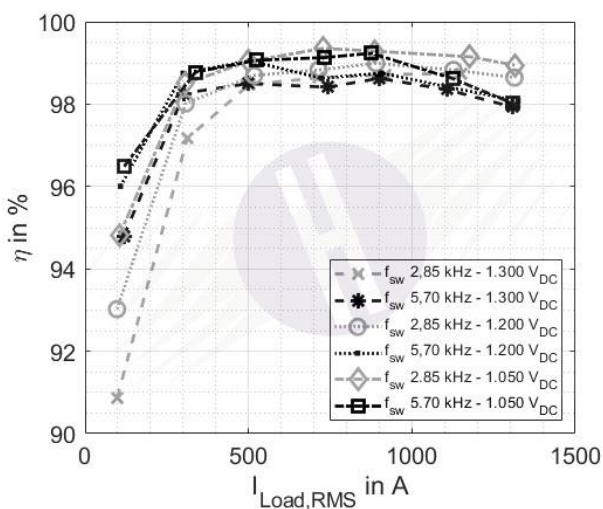
Abbildung 34 d) veranschaulicht die gemessenen Sperrschichttemperaturen des speziell präparierten SiC-Moduls für verschiedene Schaltfrequenzen und Zwischenkreisspannungen. Mit zunehmender Schaltfrequenz und höheren Lastströmen steigt die Sperrschichttemperatur wie erwartet an. Insgesamt bleibt das Modul in allen untersuchten Betriebspunkten jedoch deutlich unterhalb seiner thermischen Belastungsgrenze, sodass sowohl höhere Lastströme als auch größere Zwischenkreisspannungen prinzipiell möglich erscheinen.



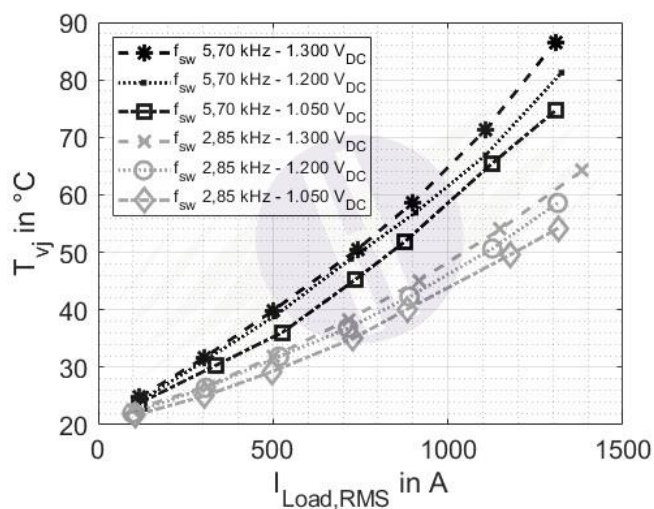
(a) Power Stack 1.0 (Si) und Power Stack 3.0 (SiC) bei unterschiedlichen Zwischenkreisspannung



(b) Power Stack 1.0 (Si) und Power Stack 3.0 (SiC) bei unterschiedlichen $\cos(\varphi)$



(c) Power Stack 3.0 für unterschiedliche Schaltfrequenzen und Zwischenkreisspannungen



(d) Power Stack 3.0 für unterschiedliche Schaltfrequenzen und Zwischenkreisspannungen

Abbildung 34: Wirkungsgrad und Sperrschichttemperaturmessung des Power Stacks 1.0 und 3.0

* T_j Operational point: $T_{inlet} = 20^\circ\text{C}$, $\cos(\varphi) = -1,0$, $f_{grid} = 50 \text{ Hz}$, $f_{sw} = 2,85 \text{ kHz}$ (default, Si)

** T_j measurements only measured for SiC modules

3.5 Arbeitspaket 6: Systembetrachtung und Effizienzrechnung

Die Ergebnisse der folgenden zwei Unterarbeitspakete aus AP6 werden in den kommenden Unterkapiteln genauer erläutert:

- Systemauslegung generischer Vollumrichter- und DFIG-WEA



- Evaluierung der Systemvorteile bei Nutzung höherer Spannungsklassen für DFIG Windenergieanlagen

Systemauslegung generische Vollumrichter- und DFIG WEA

In modernen Windenergieanlagen kommen unterschiedliche Antriebskonzepte zum Einsatz. Zum einen wird der sogenannte Teillastumrichter verwendet, der mit einem DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) gekoppelt ist und lediglich eine Teillast ins Netz einspeist. Zum anderen wird der Vollumrichter eingesetzt, bei dem die gesamte vom Generator erzeugte Energie über den Umrichter ins Netz eingespeist wird.

Für die Systemauslegung eines generischen Voll- und Teillastumrichters wird im Rahmen einer Fallstudie eine technische Bewertung anhand der in Tabelle 12 dargestellten Kriterien durchgeführt. Hierbei werden ein Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT-Variante) sowie ein Power Stack 3.0 (SiC-Variante) gegenübergestellt. Die Unterscheidungsmerkmale betreffen insbesondere den verwendeten Modultyp (IGBT bzw. SiC), der jeweils in einer Voll- oder Teillastumrichterkonfiguration gleicher Leistungsklasse eingesetzt werden kann. Abhängig vom Modultyp und der gewählten Leistungsklasse variiert die Anzahl der Module in LSC, MSC und Chopper. Darüber hinaus können – wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben – die Schaltfrequenzen zwischen Power Stack 1.1 und Power Stack 3.0 unterschiedlich ausgelegt werden. Diese Parameter wirken sich unmittelbar auf die System- und Effizienzbetrachtung aus. Eine vergleichende Bewertung erfolgt mithilfe zentraler Key Performance Indicators (KPI) wie der Lebensdauer der Windenergieanlage, der Mean Time Between Failure (MTBF) gegenüber kosmischer Strahlung sowie der Annual Energy Production (AEP). Dadurch lassen sich die Stärken und Schwächen von IGBT- und SiC-basierten Power Stack Konzepten sowohl in Teil- als auch in Vollumrichteranwendungen systematisch gegenüberstellen.



Tabelle 12: Fallstudie für die technische Bewertung der SiC Technologie

	Teilumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA		Vollumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA	
	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)
Modultyp Basis	FF1800R23IE7	FF1000UXTR23T2M1	FF1800R23IE7	FF1000UXTR23T2M1
Anzahl Umrichter	1	1	4	4
Parallele Module pro Phase LSC	3	2	2	2
Parallele Module pro Phase MSC	3	2	2	2
Parallele Chopper Module pro Umrichter	2	2	2	2
Gesamte Anzahl Halbleiter	$3 \times 3 + 3 \times 3 + 2$ = 20	$3 \times 2 + 3 \times 2 + 2$ = 14	$4 \times (3 \times 2 + 3 \times 2 + 2)$ = 56	$4 \times (3 \times 2 + 3 \times 2 + 2)$ = 56
LSC Schaltfrequenz	1,95 kHz	6,0 kHz	1,95 kHz	6,0 kHz
MSC Schaltfrequenz	1,95 kHz	6,0 kHz	1,95 kHz	6,0 kHz
Grundlage Kurven PCC	IGBT 7	V0.4	IGBT 7	V0.4

Systembetrachtung und Effizienzrechnung

Zur technischen Bewertung der SiC-Technologie in Windenergieanlagen mit unterschiedlichen Umrichterkonzepten werden die Lebensdauer, die Mean Time Between Failure (MTBF) sowie die Annual Energy Production (AEP) als zentrale Kenngrößen herangezogen. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Power Stack Varianten in Voll- und Teillastumrichter Anwendungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst und werden im Folgenden detailliert analysiert.

Lebensdauerberechnung

Für die Lebensdauerabschätzung eines Umrichters wird eine auf dem Mission-Profile-Ansatz basierende Berechnung herangezogen, deren prinzipielles Vorgehen in Abbildung 35 dargestellt ist. Ausgangspunkt bildet dabei ein Leistungs-Drehmoment-Profil der Windenergieanlage, das als Zeitreihe vorliegt. Unter Einbezug der Generatorcharakteristik für die MSC-Seite sowie der netzseitigen Filtertopologie auf der LSC-Seite wird dieses in ein Spannungs-Strom-Profil am Eingang des Power Stacks überführt.

Auf Basis der Schaltenergien (vgl. Abbildung 17 bis Abbildung 19) sowie des eingesetzten Modulationsverfahrens werden die Umrichterverluste ermittelt. Ein thermisches Modell erlaubt daraufhin die Berechnung der Temperaturverläufe für die einzelnen Zeitreihen. Anschließend werden mithilfe des Rainflow-Algorithmus die relevanten Temperaturhübe, deren Dauer (sogenannte t_{on} -Zeit) sowie die

jeweiligen Maximaltemperaturen extrahiert. Da der Algorithmus überlagerte Temperaturhübe und t_{on} -Zeiten erzeugen kann, die physikalisch nicht im Bauteil auftreten, jedoch eine unrealistische Lebensdauerverkürzung suggerieren würden, erfolgt im Postprocessing eine Detektion und Eliminierung solcher Artefakte.

Aus den bereinigten Temperaturhüben und zugehörigen t_{on} -Zeiten wird die Anzahl der bis zum Ausfall zu erwartenden Lastzyklen mithilfe der Power-Cycling-Kurven (PCC) bestimmt. Unter Berücksichtigung der Häufigkeit und Dauer der jeweiligen Zeitreihen lässt sich daraus schließlich die prognostizierte Lebensdauer des Umrichters ableiten.

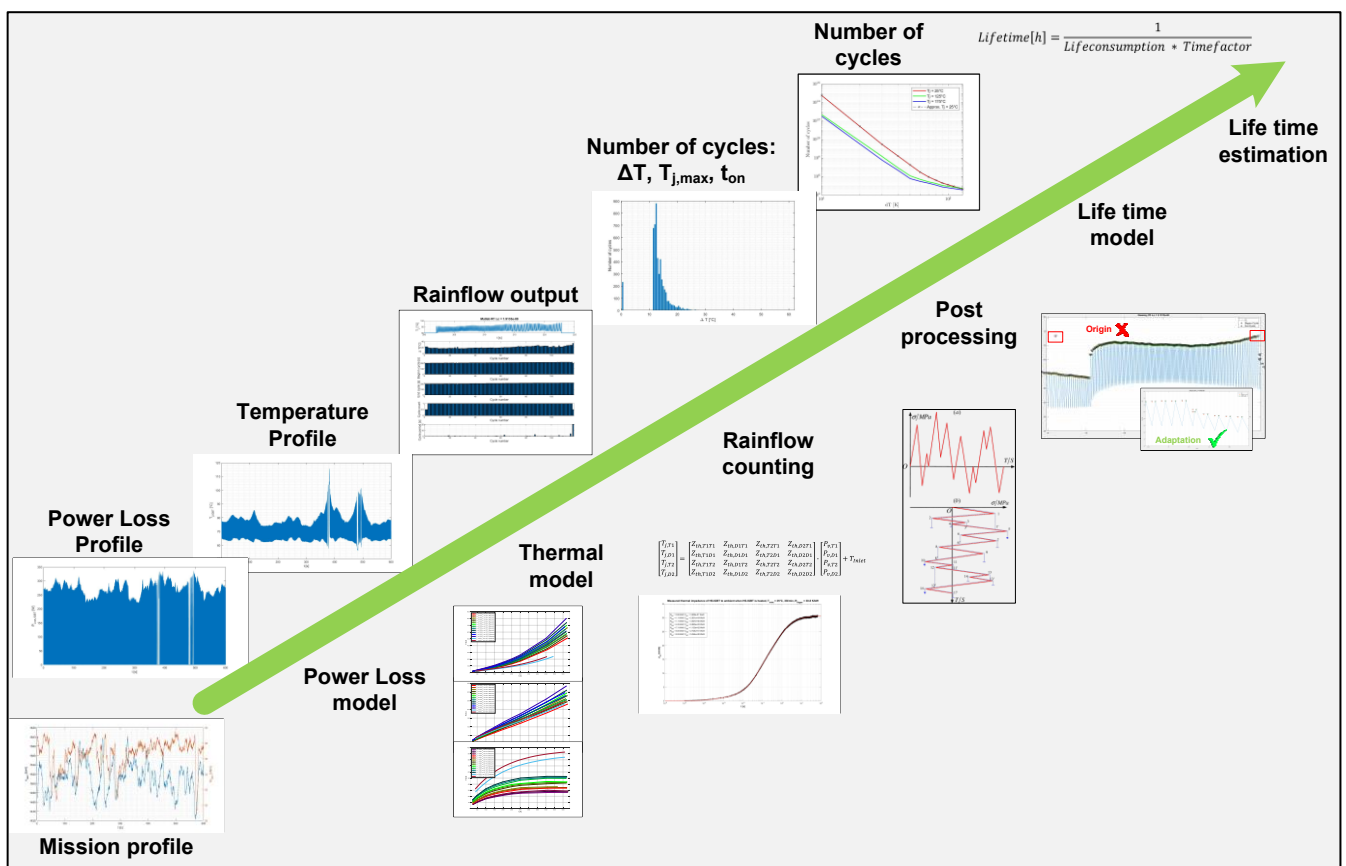


Abbildung 35: Überblick über Mission-profile basierte Lebensdauerberechnung

Für die Lebensdauerberechnung des Teil- und Vollastumrichters werden unterschiedliche Betriebsmodi berücksichtigt, die sich aus mehreren Zeitreihen mit variierender Auftretenshäufigkeit zusammensetzen. Dabei wird zwischen dem Normalbetrieb und dem sogenannten schallreduzierten Betrieb unterschieden, letzterer kommt typischerweise in den Nachtstunden zum Einsatz, um die Geräuschemissionen der Windenergieanlage zu minimieren.

Die Ergebnisse der Lebensdauerberechnung für den Teillastumrichter im Normal- und Schallreduzierten Betrieb sind für die Power Stack Varianten 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0 (SiC) in Tabelle 13 bis Tabelle 16 dargestellt, jeweils getrennt nach LSC- und MSC-Seite. Die Stacks sind gemäß den in Tabelle 12 angegebenen Parametern ausgelegt. Der Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) basiert auf drei



parallelgeschalteten IGBT-Modulen bei einer Schaltfrequenz von 1,95 kHz, während der Power Stack 3.0 (SiC) mit zwei parallelen SiC-MOSFET Modulen bei einer Schaltfrequenz von 6 kHz betrieben wird.

Die Lebensdauerangaben sind normiert auf die gesamte Betriebszeit der Windenergieanlage. Für den schallreduzierten Betrieb wird eine Betriebsdauer von 8 Stunden pro Nacht angenommen, während die restlichen 16 Stunden im Normalbetrieb erfolgen; entsprechend werden die Ergebnisse gewichtet. Erwartungsgemäß weist die MSC-Diode im Teillastumrichter die geringste Lebensdauer auf, mit etwa dem 1,2-fachen der Betriebszeit. Im Vergleich dazu erreicht die LSC-Seite des Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb eine ungewichtete Lebensdauer von etwa dem 4,8-fachen der Betriebszeit, was als ausreichend für den praktischen Einsatz zu bewerten ist.

Deutlich überlegen zeigt sich der Power Stack 3.0 (SiC): Hier liegt die berechnete Lebensdauer bei etwa dem 100-fachen der Betriebszeit und damit unabhängig vom Betriebsmodus in einem Bereich, der weit über den Anforderungen einer Windenergieanlage hinausgeht. Dies verdeutlicht das erhebliche Potenzial der SiC-Technologie zur Steigerung von Zuverlässigkeit und Robustheit in Windumrichteranwendungen.

Tabelle 13: Lebensdauerergebnisse des LSC des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit drei parallelen IGBT Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz für den Teilumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete LSC Lebensdauer normiert				Gewichtete LSC Lebensdauer normiert			
	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2
Normalbetrieb	7,5	4,8	4,9	7,1	-	-	-	-
Schallreduziert	7,0	5,4	5,3	4,7	7,4	5,0	5,0	6,1

Tabelle 14: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit drei parallelen IGBT- Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz und einer Schaltfrequenzumschaltung um den Synchronpunkt für den Teilumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete MSC Lebensdauer normiert				Gewichtete MSC Lebensdauer normiert			
	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2
Normalbetrieb	6,6	1,4	6,3	1,2	-	-	-	-
Schallreduziert	5,9	1,2	4,7	1,1	6,3	1,3	5,7	1,2



Tabelle 15: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6 \text{ kHz}$ für den Teilumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete LSC Lebensdauer normiert		Gewichtete LSC Lebensdauer normiert	
	HS Chip	LS Chip	HS Chip	LS Chip
Normalbetrieb	>100	>100	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100

Tabelle 16: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6 \text{ kHz}$ und einer Schaltfrequenzumschaltung um den Synchronpunkt für den Teilumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete MSC Lebensdauer normiert		Gewichtete MSC Lebensdauer normiert	
	HS Chip	LS Chip	HS Chip	LS Chip
Normalbetrieb	>100	>100	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100

Die Tabelle 17 bis Tabelle 20 fassen die Ergebnisse der Lebensdauerberechnung für ein Vollumrichterkonzept in einer Windenergieanlage zusammen. Aufgrund der hohen Anzahl parallel verschalteter Umrichterzweige sind die Ströme in den einzelnen Power Stacks deutlich geringer als im Teillastumrichter. Dies führt zu einer signifikanten Entlastung der leistungselektronischen Bauelemente. Entsprechend weisen sowohl der Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) als auch der SiC Power Stack 3.0 in allen betrachteten Betriebsmodi eine normierte Lebensdauer auf, die das 100-Fache der gesamten Betriebszeit einer Windenergieanlage überschreitet. Damit erfüllen beide Technologien die Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit mit großem Sicherheitsspielraum, wobei insbesondere die SiC-Variante zusätzliche Potenziale für kompaktere Designs und höhere Effizienz bietet.

Tabelle 17: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen IGBT-Modulen, $f_{sw} = 1,95 \text{ kHz}$ für den Vollumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete LSC Lebensdauer normiert				Gewichtete LSC Lebensdauer normiert			
	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2
Normalbetrieb	>100	>100	>100	>100	-	-	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100



Tabelle 18: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen IGBT-Modulen, $f_{sw} = 1,95 \text{ kHz}$ für den Vollumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete MSC Lebensdauer normiert				Gewichtete MSC Lebensdauer normiert			
	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2	IGBT1	Diode1	IGBT2	Diode2
Normalbetrieb	>100	>100	>100	>100	-	-	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100

Tabelle 19: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6 \text{ kHz}$ für den Vollumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete LSC Lebensdauer normiert		Gewichtete LSC Lebensdauer normiert	
	HS Chip	LS Chip	HS Chip	LS Chip
Normalbetrieb	>100	>100	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100

Tabelle 20: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6 \text{ kHz}$ für den Vollumrichter

Zeitreihe	Ungewichtete MSC Lebensdauer normiert		Gewichtete MSC Lebensdauer normiert	
	HS Chip	LS Chip	HS Chip	LS Chip
Normalbetrieb	>100	>100	-	-
Schallreduziert	>100	>100	>100	>100

MTBF

Für die Berechnung der mittleren Ausfallzeit (Mean Time Between Failures, MTBF) wird die Zuverlässigkeit der Umrichter gegenüber Ausfällen durch kosmische Höhenstrahlung in Abhängigkeit von möglichen Aufstellhöhen einer Windenergieanlage (WEA) analysiert. Die betrachteten Power Stack Varianten setzen sich – wie in Tabelle 12 dargestellt – aus unterschiedlichen Modulanzahlen und Modultypen zusammen. Für jedes eingesetzte Modul wurden herstellerspezifische Ausfallraten unter Höhenstrahlung berücksichtigt. Neben der Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Höhe wurde die Zwischenkreisspannungsverteilung im gesamten Betriebsbereich der WEA ermittelt und in die Berechnung einbezogen.

Die Ergebnisse der MTBF-Berechnungen sind in den Tabelle 21 bis Tabelle 24 zusammengefasst. Sie zeigen die normierte Ausfallwahrscheinlichkeit für die Power Stack Varianten 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0



(SiC) sowohl im Teil- als auch im Vollastumrichterbetrieb. Ein MTBF-Wert kleiner als 1 weist darauf hin, dass ein Ausfall vor Ablauf der geplanten Betriebsdauer der Anlage zu erwarten ist. Grundsätzlich gilt: Mit steigender Modulanzahl nimmt die MTBF ab, da sich die Ausfallwahrscheinlichkeit kumulativ erhöht. Für den Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) liegen die MTBF-Werte bei Installationshöhen oberhalb von 2.000 m im Teil- wie auch im Vollastbetrieb unterhalb von 1. Dies impliziert eine Einschränkung hinsichtlich der maximal zulässigen Aufstellungshöhen solcher Systeme. Im Gegensatz dazu zeigt der Power Stack 3.0 (SiC) im Teillastbetrieb eine deutlich höhere Robustheit: Aufgrund der geringeren Anzahl paralleler Module, die für die Erreichung derselben Leistung erforderlich sind (vgl. Tabelle 12), ergeben sich keine Höhenbeschränkungen. Im Vollastumrichterkonzept unterscheidet sich die Anzahl paralleler Module zwischen den beiden Technologien nicht, sodass für den SiC-Stack lediglich eine moderate Verbesserung der MTBF zu erwarten ist.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wahl der Halbleitertechnologie – insbesondere die Verwendung von SiC – neben Effizienzvorteilen auch direkte Auswirkungen auf die Standortflexibilität und die Zuverlässigkeit von Windenergieanlagen haben kann.

Tabelle 21: MTBF des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) des Teilumrichters mit drei parallelen IGBT-Modulen mit $f_{sw} = 1,95$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit

MSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF MSC [Norm.]	18,5	13,1	9,3	6,5	4,6	3,3	2,3	1,6	1,2
LSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF LSC [Norm]	12,0	8,5	6,0	4,3	3,0	2,1	1,5	1,1	0,8
Chopper									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF Chopper [Norm.]	14,9	10,6	7,5	5,3	3,7	2,6	1,9	1,3	0,9
MTBF converter [Norm.]	4,9	3,5	2,5	1,7	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3

Tabelle 22: MTBF des SiC Power Stacks 3.0 des Teilumrichters mit zwei parallelen SiC-Modulen mit $f_{sw} = 6$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit

MSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000



MTBF MSC [Norm.]	107,91	76,31	53,96	38,15	26,98	19,08	13,49	9,54	6,74
LSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF LSC [Norm.]	97,53	68,96	48,76	34,48	24,38	17,24	12,19	8,62	6,10
Chopper									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF Chopper [Norm.]	131,99	93,33	66,00	46,67	33,00	23,33	16,50	11,67	8,25
MTBF converter [Norm.]	36,91	26,10	18,45	13,05	9,23	6,52	4,61	3,26	2,31

Tabelle 23: MTBF des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) des Vollumrichters mit zwei parallelen IGBT-Modulen mit $f_{sw} = 1,95 \text{ kHz}$, $T_{inlet} = 40^\circ\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit

MSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF MSC [Norm.]	26,92	19,04	13,46	9,52	6,73	4,76	3,37	2,38	1,68
LSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF LSC [Norm.]	28,85	20,40	14,42	10,20	7,21	5,10	3,61	2,55	1,80
Chopper									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF Chopper [Norm.]	30,61	21,65	15,31	10,82	7,65	5,41	3,83	2,71	1,91
MTBF converter [Norm.]	9,57	6,77	4,79	3,38	2,39	1,69	1,20	0,85	0,60



Tabelle 24: MTBF des SiC Power Stacks 3.0 des Vollumrichters mit zwei parallelen SiC-Modulen mit $f_{sw} = 6$ kHz, $T_{inlet} = 40^\circ\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit

MSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF MSC [Norm.]	28,97	20,48	14,48	10,24	7,24	5,12	3,62	2,56	1,81
LSC									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF LSC [Norm.]	29,77	21,05	14,89	10,53	7,44	5,26	3,72	2,63	1,86
Chopper									
Aufstellhöhe [m]	0	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000
MTBF Chopper [Norm.]	40,20	28,42	20,10	14,21	10,05	7,11	5,02	3,55	2,51
MTBF converter [Norm.]	10,75	7,60	5,38	3,80	2,69	1,90	1,34	0,95	0,67

AEP

Für die Bewertung der jährlichen Energieproduktion einer Windenergieanlage wird die Kennzahl der *Annual Energy Production* (AEP) herangezogen. Sie bildet eine zentrale Grundlage für Wirtschaftlichkeitsanalysen und Ertragsprognosen. Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse der AEP-Berechnung für ein Teilumrichterkonzept unter Verwendung des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) sowie des SiC Power Stacks 3.0. Die Werte sind normiert auf die jährliche Energieleistung am Netz (E_{Grid}) des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT).

Durch den Einsatz der SiC-Technologie im Power Stack 3.0 reduzieren sich die Verlustenergien sowohl auf der LSC-Seite ($E_{Loss,LSC}$) als auch auf der MSC-Seite ($E_{Loss,MSC}$), während die eingespeiste Statorenergie (E_{Stator}) unverändert bleibt. Daraus resultiert eine Erhöhung der gesamten jährlichen Einspeiseenergie (E_{Grid}) und somit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Anlage. Der Zugewinn liegt mit 0,28 % zwar im niedrigen Bereich, gewinnt jedoch über die gesamte Lebensdauer der Anlage erhebliche Bedeutung: Bei einer typischen Betriebsdauer von 25 Jahren entspricht dies einer kumulierten Mehrproduktion von rund 7,0 % der Jahresenergie eines Referenzsystems. Bei einer Windenergieanlage mit einer Nennleistung von 6 MW und einem typischen Kapazitätsfaktor von 40 % würde dies einer zusätzlichen Netzeinspeisung von etwa 1,5 GWh über die gesamte Lebensdauer entsprechen.



Damit wird deutlich, dass selbst vergleichsweise geringe Wirkungsgradsteigerungen durch SiC-Technologie einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Windenergieanlagen haben können.

Tabelle 25: AEP-Berechnungen des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0 im Normalbetrieb des Teilumrichterkonzeptes bezogen auf die Netzenergie des Power Stack 1.1 (2.3-kV-IGBT)

Scenario	E_{Stator}	E_{Grid}	E_{LSC}	E_{MSC}	$E_{\text{Loss,LSC}}$	$E_{\text{Loss,MSC}}$	$E_{\text{Loss,Cnv}}$
Power Stack 3.0 (SiC)	76,29%	100,28%	13,97%	24,23%	0,08%	0,16%	0,24%
Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	76,29%	100,00%	13,97%	24,23%	0,21%	0,31%	0,52%

Tabelle 26 zeigt die AEP-Berechnung für den Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) und den Power Stack 3.0 im Vollumrichterkonzept, normiert auf die jährliche Einspeiseenergie am Netz (E_{Grid}) des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT). Der Einsatz des SiC Power Stacks 3.0 führt sowohl im LSC ($E_{\text{Loss,LSC}}$) als auch im MSC ($E_{\text{Loss,MSC}}$) zu einer deutlichen Reduzierung der Verlustenergien bei unveränderter Statorenergie (E_{Stator}). Daraus resultiert eine Steigerung der jährlichen Energieeinspeisung ins Netz (E_{Grid}). Mit 0,5 % fällt dieser Zugewinn zwar auf den ersten Blick moderat aus, ist jedoch im Kontext großer Windenergieanlagen hochrelevant: Für eine 6 MW Windenergieanlage mit einem Kapazitätsfaktor von 40 % ergibt sich über 25 Jahre eine Basisenergieproduktion von rund 525.600 MWh. Durch die Effizienzsteigerung von 0,5 % mit dem Power Stack 3.0 gegenüber der IGBT-Variante ergibt sich ein zusätzlicher Energieertrag von etwa 2,6 GWh über die gesamte Betriebsdauer. Besonders im Vollumrichterkonzept verstärkt die hohe Anzahl paralleler Umrichter die positive Wirkung der verlustoptimierten SiC-Module, sodass deren Effizienzvorteile stärker zum Tragen kommen als beim Teillastumrichter.

Tabelle 26: AEP-Berechnung des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0 im Normalbetrieb des Vollumrichterkonzeptes bezogen auf die Netzenergie des Power Stack 1.1 (2.3 kV IGBT)

Scenario	E_{Grid}	E_{MSC}	$E_{\text{Loss,LSC}}$	$E_{\text{Loss,MSC}}$	$E_{\text{Loss,Cnv}}$
Power Stack 3.0 (SiC)	100,50%	101,07%	0,32%	0,25%	0,57%
Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	100,00%	101,07%	0,58%	0,49%	1,07%

Tabelle 27 fasst die Ergebnisse der Berechnungen für die Teil- und Vollumrichtervarianten mit unterschiedlichen Power-Stack-Technologien zusammen. Dabei zeigt sich, dass durch den Einsatz des Power Stacks 3.0 die Mean Time Between Failures (MTBF) sowohl im Teil- als auch im Vollumrichterbetrieb gesteigert werden kann. Aufgrund der höheren Anzahl parallel eingesetzter Module fällt die Verbesserung im Vollumrichterkonzept jedoch weniger deutlich aus als im Teilumrichterkonzept.



Hinsichtlich der Lebensdauer erweist sich insbesondere die MSC-Seite im Teilumrichterbetrieb unter schallreduzierten Betriebsbedingungen als kritisch. Während mit dem Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) die Lebensdauer begrenzt ist, lässt sich durch den Einsatz des SiC Power Stacks 3.0 eine signifikante Verbesserung erzielen – die Lebensdauer steigt auf mehr als das Zehnfache der gesamten Betriebszeit einer Windenergieanlage. Im Vollumrichterkonzept hingegen weisen alle untersuchten Varianten eine ausreichend hohe Lebensdauer auf, sodass hier keine Einschränkungen zu erwarten sind.

Wird die Annual Energy Production (AEP) als maßgebliches Bewertungskriterium herangezogen, zeigt sich, dass die Reduktion der Umrichterverluste im Vollumrichterkonzept aufgrund der größeren Anzahl eingesetzter Module deutlich stärker zum Tragen kommt als im Teilumrichterkonzept. Der hierdurch erzielte absolute Zugewinn an jährlicher Energieproduktion durch den Einsatz des Power Stacks 3.0 ist als ökonomisch relevant einzustufen, da bereits geringe relative Effizienzsteigerungen über die gesamte Lebensdauer der Anlage kumulativ einen signifikanten Mehrertrag generieren.

Tabelle 27: Vergleich der der Systembetrachtung und Energieeffizienz für die Teil- und Vollumrichterapplikation

KPI	Teilumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA		Vollumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA	
	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)
MTBF 0 m norm.	4,9	36,9	9,6	10,8
MTBF 2.000 m norm.	1,2	9,2	2,4	2,7
Gewichtete Lebensdauer schallreduziert LSC norm	3,7	>10,0	>10,0	>10,0
Gewichtete Lebensdauer schallreduziert MSC norm	0,9	>10,0	>10,0	>10,0
AEP [%]	100	100,28	100	100,50
No. paralleler Module pro Stack	3	2	2	2
No. Module pro Umrichter	20	14	56	56

Evaluierung der Systemvorteile bei Nutzung höherer Spannungsklassen für DFIG Windenergieanlagen

Im europäischen Rechtsrahmen definiert die Niederspannungsrichtlinie (Low Voltage Directive, LVD) die zulässigen Nennspannungsbereiche für elektrische Betriebsmittel. Demnach sind Anlagen als Niederspannungsanlagen einzustufen, sofern die Nennspannung an den Systemgrenzen $1.000 V_{AC}$ bzw. $1.500 V_{DC}$ nicht überschreitet.

Für Frequenzumrichter in Windenergieanwendungen werden die Systemgrenzen typischerweise durch den netzseitigen AC-Anschluss sowie den generatorseitigen AC-Anschluss definiert. Der DC-Zwischenkreis stellt hingegen in der Praxis keine externe Schnittstelle dar. Folglich ist eine Überschreitung von $1.500 V_{DC}$ im Zwischenkreis möglich, ohne die Vorgaben der LVD zu verletzen.



Die elektrische Leistungsdimensionierung von Frequenzumrichtern kann prinzipiell durch Variation des Stroms oder durch Variation der Spannung erfolgen. Während eine strombasierte Skalierung zwangsläufig zu einer Erhöhung der Leiterquerschnitte und damit zu erhöhtem Kupfer- und Materialeinsatz führt, resultiert eine spannungsbasierte Skalierung in einer veränderten Isolationskoordination und stellt erhöhte Anforderungen an die dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Komponenten. Empirisch zeigt sich, dass in Antriebssystemen mit Nennspannungen ≥ 690 V überwiegend Isolationssysteme der 1.000 V-Spannungsklasse, oder auch größer, implementiert werden, wodurch eine Spannungsskalierung gegenüber einer Stromskalierung in technischer Hinsicht als vorteilhaft einzustufen ist.

Insbesondere für Windenergieanlagen mit Teilumrichtern bietet die vollständige Ausnutzung des durch die LVD definierten AC-Nennspannungsbereichs bis 1.000 V erhebliche Vorteile. So erlaubt eine Erhöhung der Nennspannung von 690 V auf 1.000 V eine theoretische Leistungssteigerung von ca. 44 %, ohne dass eine Erhöhung der Leiterquerschnitte erforderlich wird.

Darüber hinaus ermöglicht die fehlende Beschränkung der Zwischenkreisspannung durch die LVD den Betrieb bei quasi-stationären DC-Zwischenspannungen oberhalb von 1.500 V. Dies eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade hinsichtlich der Blindleistungsbereitstellung sowie der dynamischen Systemantwort bei transienten Laständerungen, beispielsweise infolge von Windböen. In der industriellen Praxis haben sich insbesondere kurzzeitige Spannungsniveaus bis 1.800 V_{DC} als zielführend erwiesen, um die Betriebseigenschaften doppelt gespeister Asynchrongeneratoren (DFIG) nachhaltig zu optimieren.

Überträgt man diese Anforderungen auf die Dimensionierung der Sperrspannung von Leistungshalbleitern in zweistufigen Frequenzumrichtern, ergibt sich ein Optimum bei ca. 2.300 V. Dieses Spannungsniveau stellt einen geeigneten Kompromiss dar zwischen den widersprüchlichen Anforderungen einerseits an die Minimierung parasitärer Streuinduktivitäten im Kommutierungspfad und andererseits an die Verlustreduktion in den Halbleitermaterialien.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass die Spannungsskalierung innerhalb des von der LVD vorgegebenen Rahmens eine effektive Strategie zur Leistungserhöhung von Frequenzumrichtern in Windenergieanlagen darstellt, ohne einen proportionalen Anstieg des Materialeinsatzes zu verursachen. Gleichzeitig eröffnet die gezielte Auslegung des Zwischenkreises oberhalb von 1.500 V DC zusätzliche Systemoptimierungspotenziale hinsichtlich Effizienz, Stabilität und Netzinteraktion.

3.6 Arbeitspaket 7: Bewertung der Forschungsergebnisse und der energetischen Gesamtbilanz

Für die ganzheitliche Bewertung der Forschungsergebnisse sowie der energetischen Gesamtbilanz einer Windenergieanlage werden sogenannte *Key Performance Indicators* (KPIs) als zentrale Vergleichsgrößen herangezogen. Sie ermöglichen eine systematische Gegenüberstellung der Teil- und Vollumrichterkonzepte unter Einsatz unterschiedlicher Power Stack Varianten. Die in diesem

Forschungsprojekt verwendeten KPIs wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln eingeführt und werden in diesem Abschnitt explizit zusammengeführt und gegenübergestellt (vgl. Abbildung 36). Dabei handelt es sich um folgende Kenngrößen:

- Stromdichte im Netzfilter, die maßgeblich durch die Wahl der Schaltfrequenz beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 3.3).
- Mean Time Between Failures (MTBF), welche durch die Anzahl eingesetzter Module und die daraus resultierende effektive Chipfläche bestimmt wird (vgl. Abschnitt 3.5 „Systembetrachtung und Effizienzrechnung“).
- Lebensdauer des Umrichters, normiert auf die gesamte Betriebszeit, die Aufschluss über die Lastwechselfähigkeit der eingesetzten Leistungsmodule gibt (vgl. Abschnitt 3.5).
- Annual Energy Production (AEP), die als zentrale energiewirtschaftliche Kenngröße die Verluste der Module abbildet und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage widerspiegelt (vgl. Abschnitt 3.5).
- Anzahl der eingesetzten Module im Umrichter, die applikationsspezifisch variieren kann und direkten Einfluss auf Zuverlässigkeit und Kosten hat.
- Umrichter Ausgangsstrom, der durch ein optimiertes Kühlkörperdesign in Kombination mit einer geeigneten Modulauswahl verbessert werden kann (vgl. Abschnitt 3.2 „Vollasterprobung der SiC Power Stack 3.0 unter Laborbedingungen“).

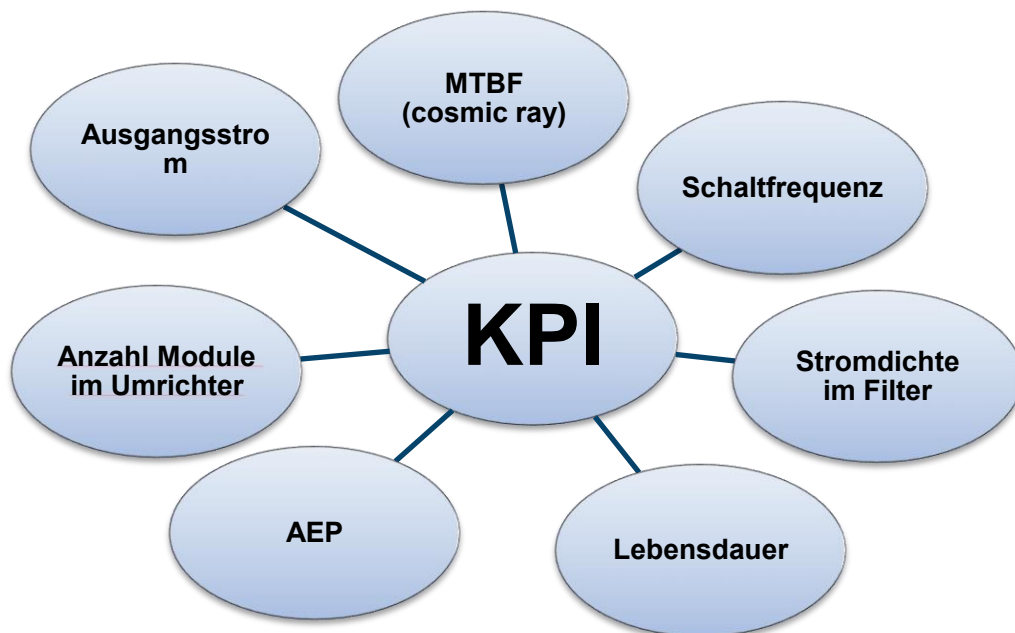


Abbildung 36: Bewertungskriterien – Key Performance Indikatoren für Windenergieanwendungen



Wie in den vorherigen Kapiteln erläutert, wird anstelle des Power Stacks 1.0 mit 1,7-kV-IGBT-Modulen der Power Stack 1.1 mit 2,3-kV-IGBT-Modulen herangezogen, um eine direkte Vergleichbarkeit mit der 2,3-kV-SiC-Variante (Power Stack 3.0) zu gewährleisten. Tabelle 28 fasst die entsprechenden KPIs für Teil- und Vollumrichterkonzepte mit den unterschiedlichen Power Stack Varianten zusammen.

Die Stromdichte des Filters erhöht sich beim Power Stack 3.0 infolge der höheren Schaltfrequenz. Dadurch können die passiven Bauelemente wie Filterinduktivität und -kapazität signifikant verkleinert werden (vgl. Abschnitt 3.3).

Die Modulanzahl unterscheidet sich deutlich zwischen den Konzepten: Beim Teilumrichter mit dem Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) sind drei parallele Module erforderlich, um die Leistungsklasse von 6 MW zu erreichen. Im Vollumrichterkonzept werden vier parallele Umrichter eingesetzt, sodass die Gesamtanzahl an Modulen mit 56 am höchsten liegt. Diese Modulanzahl beeinflusst direkt die MTBF, die Lebensdauer sowie das AEP.

Die MTBF-Betrachtung zeigt, dass insbesondere im Teilumrichter mit dem SiC Power Stack 3.0 deutliche Verbesserungen erzielt werden, nicht zuletzt aufgrund der geringeren Modulanzahlen. Während beim Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) Einschränkungen bei größeren Aufstellhöhen bestehen, entfallen diese beim Power Stack 3.0 vollständig. Im Vollumrichterkonzept sind aufgrund der identischen Modulanzahlen kaum Unterschiede zwischen beiden Varianten erkennbar.

Hinsichtlich der Lebensdauer zeigt sich im Teilumrichterkonzept, dass der MSC im schallreduzierten Betrieb – mit Betriebspunkten nahe dem Synchronpunkt (annähernd Gleichstrom) – beim Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) die ausgelegte Betriebsdauer nicht erreicht. Durch den Einsatz des Power Stacks 3.0 wird hier eine deutliche Verlängerung der Lebensdauer erzielt, insbesondere im schallreduzierten Betrieb. Im Vollumrichter spielt die Lebensdauer aufgrund der geringeren Zyklusbelastung durch parallele Umrichter eine untergeordnete Rolle.

Der Vergleich des AEPs verdeutlicht, dass der Einsatz des Power Stacks 3.0 in beiden Konzepten zu einer Erhöhung der jährlichen Energieproduktion führt. Im Vollumrichterkonzept fällt dieser Effekt stärker aus, da die höhere Anzahl an Umrichtern zu summierten Verlustreduktionen führt.

Beim Ausgangsstromvergleich zeigt sich schließlich, dass bei gleichem Ausgangsstrom die maximal zulässige Schaltfrequenz für die Sperrschichttemperatur beim Power Stack 3.0 mit 6 kHz deutlich über der des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) liegt – unabhängig vom Umrichterkonzept.



Tabelle 28: Überblick KPIs für Teil- und Vollumrichterapplikation für den Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) und den Power Stack 3.0 (SiC)

	Teilumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA		Vollumrichter 6 MW Klasse Onshore WEA	
	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)	Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT)	Power Stack 3.0 (SiC)
Stromdichte [kA/m³]	7,0	9,5	5,9	9,5
MTBF 0 m norm.	4,9	36,9	9,6	10,8
MTBF 2.000 m norm.	1,2	9,2	2,4	2,7
Gewichtete Lebensdauer schallreduziert LSC norm	3,7	>10,0	>10,0	>10,0
Gewichtete Lebensdauer schallreduziert MSC norm	0,9	>10,0	>10,0	>10,0
AEP [%]	100	100,28	100	100,50
No. paralleler Module pro Stack	3	2	2	2
Max. f_{sw} LSC @ max. current for 50 Hz	2,44 kHz @ 1.850 A	6 kHz @ 1.850 A	1,0 kHz @ 1.850 A	6 kHz @ 1.850 A
Max. f_{sw} MSC @ max. current for 10 Hz	2,44 kHz @ 1.600 A	6 kHz @ 1.600 A	1,5 kHz @ 1.600 A	6 kHz @ 1.600 A
No. Module pro Umrichter	20	14	56	56

Die Prototypenerprobung im 7,5-MVA-Back-to-Back-Teststand der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH (vgl. Abschnitt 3.4) hat gezeigt, dass der Einsatz des Power Stacks 3.0 gegenüber dem Power Stack 1.0 eine deutliche Wirkungsgradsteigerung bei unterschiedlichen Zwischenkreisspannungen und $\cos(\varphi)$ -Betriebspunkten ermöglicht (vgl. Abbildung 34).

Auch der Vergleich des Power Stacks 3.0 bei verschiedenen Schaltfrequenzen und Zwischenkreisspannungen verdeutlicht den bekannten Zusammenhang: Mit steigender Schaltfrequenz sinkt der Wirkungsgrad. Dennoch liegt dieser selbst bei einer Verdopplung der Schaltfrequenz weiterhin oberhalb von 98 % und ist somit als hoch einzustufen.

In Abbildung 34 sind zudem die Ergebnisse der Sperrschichttemperaturmessungen eines speziell präparierten SiC-Moduls dargestellt. Erwartungsgemäß steigt die Sperrschichttemperatur mit zunehmender Schaltfrequenz und höheren Lastströmen an. Gleichzeitig zeigen die Messergebnisse, dass das Modul in den untersuchten Betriebspunkten noch nicht ausgelastet ist, sodass sowohl höhere Lastströme als auch höhere Zwischenkreisspannungen technisch möglich erscheinen.

Die erhöhte Spannungssteilheit der SiC-Technologie kann auf der Generatorseite durch den Einsatz eines geeigneten du/dt-Filters wirkungsvoll kompensiert werden.



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Power Stack 3.0 wesentliche Verbesserungen hinsichtlich Filterstromdichte, Wirkungsgrad sowie Lebensdauer im Teillastumrichter ermöglicht. Damit wird deutlich, dass die SiC-Technologie für den Einsatz in Windumrichtern erhebliche Vorteile bietet und einen vielversprechenden Beitrag zur Effizienz- und Zuverlässigkeitssteigerung zukünftiger Anlagen leisten kann.

3.7 Zusammenfassung der Zielerreichung im Teilvorhaben

Für die Zusammenfassung der Zielerreichung im Teilvorhaben werden nachfolgend die in der Teilvorhabensbeschreibung definierten Ziele sowie deren Erfüllungsgrad dargestellt:

- **Realisierung Power Stack 1.0 mit 1700 V XHPTM2 IGBT5:**

Mechanische Muster, thermische und elektrische Qualifikation der Komponenten:

→ Dieses Ziel wurde mit der Vorstellung des CAD-Modells in seiner hochgradig modularen Struktur in Abschnitt 3.2 erfüllt.

- **Realisierung Power Stack 2.0 mit 2300 V XHPTM2 SiC-MOSFET:**

Funktional, nicht verlustoptimiert, nicht lastwechselfest, Leistungsfähigkeit angepasst an die Erprobungs-WEA.

→ Das zweite Ziel wurde mit der Vorstellung des CAD-Modells in Abschnitt 3.2 erfüllt. Der Power Stack ist aufgrund der hohen Entwicklungsgeschwindigkeit der Projektpartner nicht umgesetzt.

- **Realisierung Power Stack 3.0 mit 2300 V XHPTM2 SiC-MOSFET:**

Mit verlustoptimiertem Design, hoher Lastwechselfestigkeit und maximaler Leistungsfähigkeit.

→ Wie in Abschnitt 3.2 vorgestellt wurde der Power Stack 3.0 realisiert, wodurch auch dieses Ziel erreicht worden ist.

- **Volllasterprobung der Power Stacks unter definierten Randbedingungen im Labor:**

→ Dieses Ziel des Teilvorhabens wurde durch die thermischen Vermessungen bei unterschiedlichen Volumenströmen und Kühlkörpervarianten, Doppelpulsversuchen zur Ermittlung der Schaltverlustenergien sowie Bestimmung der maximalen Drain-Source-Spannung (vgl. Abschnitt 3.2) erfüllt.

- **Untersuchung einer Netzdrossel für hohe Schaltfrequenzen:**

→ Wie der Abschnitt 3.3 durch die Analyse für die verschiedenen Power Stack Varianten und Schaltfrequenzuntersuchungen gezeigt, ist auch dieses Ziel erfüllt.

- **Analyse der Systemvorteile in einer höheren Spannungsklasse unter Ausnutzung der normativen Grenzen der Niederspannung:**

→ Die Vorteile des Power Stacks 3.0 im Vergleich zum Power Stack 1.0 bzw. zum virtuellen Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) sind in Abschnitt 3.5 detailliert analysiert worden. Damit gilt dieses Ziel auch als erfüllt.



Neben den Zielen des Teilvorhabens sind darüber hinaus zwei weitere Arbeitspakete von den Projektpartnern übernommen worden.

- **Protypenerprobung Windenergieanlage**

- Wie in Abschnitt 3.4 gezeigt, wurde der Prototyp für verschiedene Power Stack Varianten und einer Windenergieanlage ähnlichen Betriebsbedingungen in einem 7,5MVA-Teststand im Back-To-Back Betrieb erprobt. Dieses Ziel gilt somit auch als erfüllt.

- **Systemauslegung generische Vollumrichter- und DFIG**

- In Abschnitt 3.5 ist durch eine Fallstudie im Hinblick auf die Lebensdauerbewertung, die AEP- und MTBF-Berechnung die Systemauslegung des generischen Teil- und Vollumrichterkonzeptes als erfüllt.

Fazit:

Alle in der Teilvorhabensbeschreibung definierten Ziele wurden erreicht. Darüber hinaus sind in der Kooperation Ziele der Projektpartner übernommen worden, die ebenfalls als erfüllt angesehen werden können.

4 Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Als Ingenieurbüro Hoffmann GmbH konnten Erfahrungen bei der Konstruktion in CAD sowie im elektrischen Design von Power Stacks gesammelt werden. Der in dem Projekt entwickelte Gate-Treiber ist die Basis für eine Weiterentwicklung, der als mögliches Produkt dienen kann. Darüber hinaus kann die SiC Technologie in weiteren Kundenapplikationen eingesetzt werden, wodurch neue Aufträge im Bereich der Konstruktion, Auslegung und Erprobung auf den in diesem Bericht beschriebenen Testständen möglich sind. Durch die Vorstellung des Power Stacks auf der PCIM ist die Sichtbarkeit der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH nach Außen erhöht worden. Neue Projekte und Projektpartner konnten generiert werden.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind während der Projektlaufzeit keine neuen Erkenntnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Auf dem Treffen der Leistungselektronik-Community auf der PCIM Expo 2025 in Nürnberg (16.513 Fachbesucher / insgesamt 685 Ausstellern auf einer Gesamtfläche von 41.500m²) wurde im Mai 2025 ein 2,3 kV SiC Modul erstmals öffentlich auf dem Messestand von Infineon präsentiert, um die internationale Fachwelt auf die zukünftige Verfügbarkeit aufmerksam zu machen. Die Vorstellung traf auf breites Interesse bei den Messebesuchern, auch für Anwendungen über die Windkraft hinaus.

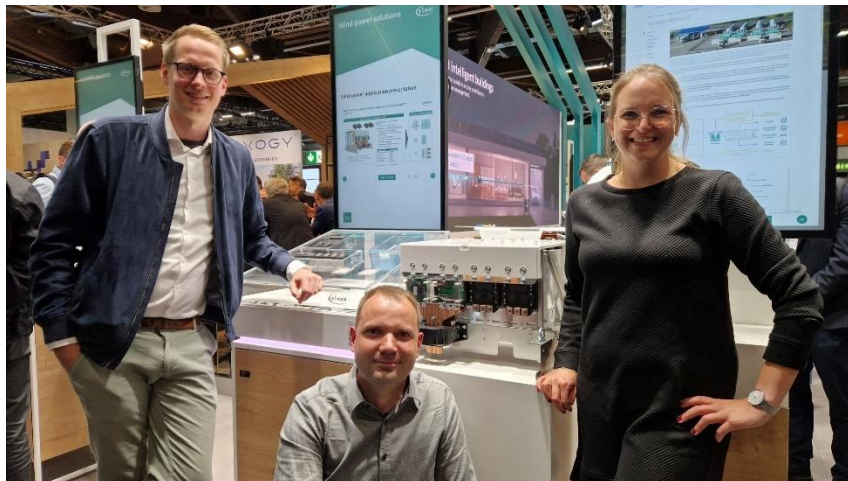


Abbildung 37: Vorstellung des neuen LHUVkraft Moduls auf dem Infineon Messestand auf der PCIM Expo 2025 in Nürnberg

Weiterhin ist eine Veröffentlichung mit dem Kooperationspartner Infineon auf dem VDE-ETG-Kongress 08./09.10.2025 in München mit dem Titel „High Power SiC MOSFET Power Stack Reference Design for Multi-Megawatt Converter Applications“ geplant.

7 Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Entwicklung der Leistung von Onshore-Windenergieanlagen (www.windmonitor.de 2021)	4
Abbildung 2: Si-IGBT Module für Wind-Umrichter zum Zeitpunkt der Antragstellung im Jahr 2021.....	7
Abbildung 3: XHP™ 2 Modul – geeignete Bauform für schnell schaltende Hochvolt SiC MOSFET.....	8
Abbildung 4: Transport einer Gondel durch die Rostocker Südstadt	12
Abbildung 5: Konventioneller netzseitiger Stromrichter einer DFIG WEA.....	13
Abbildung 6: Wind-Umrichter (nur Netzseite) – Parallelschaltung von IGBT-Modulen in einem Power Stack	14
Abbildung 7: Projektstruktur und Leitung der verschiedenen Arbeitspakete.....	15
Abbildung 8: Screenshot der Titelseite der unter den Projektpartnern abgestimmten Spezifikation des Power Stacks.....	17
Abbildung 9: Prototyp des SiC Power Stacks V2.0: (a) CAD-Modell und (b) Laboraufbau.....	19
Abbildung 10: Überblick der Power Stack Komponenten (hier am Beispiel des Power Stacks V1.0).....	20
Abbildung 11: Maximaler Ausgangsstrom für den Si-basierten Power Stack (Power Stack 1.0) auf der Generatorseite in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, der Trägerfrequenz sowie der Ausgangsfrequenz.....	21
Abbildung 12: Maximaler Ausgangsstrom für den Si-basierten Power Stack (Power Stack 1.0) auf der Netzseite in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, der Trägerfrequenz sowie der Ausgangsfrequenz für zwei unterschiedliche Gate Parameter (V1 und V2)	22
Abbildung 13: Prototypen Gate Treiber für den SiC MOSFET Leistungshalbleiter.....	23
Abbildung 14: Analyse der kritischen SiC MOSFET Parameter für eine Parallelschaltung mehrerer Halbleitermodule nach „Design Aspects of Paralleling 2.3 kV CoolSiC(TM) XHP(TM) 2 Power Modules in Multimewatt Applications“, M. Morisse, N. Hoffmann, T. Poller, PCIM Conference 2025, doi:10.30420/566541318.....	24
Abbildung 15: Messergebnisse des überarbeiteten SiC Moduls mit verbesserter thermischer Anbindung	26
Abbildung 16: Vergleich der Messergebnisse der verschiedenen SiC Module unter Verwendung verschiedener Kühlkörper (blau – altes SiC Module mit speziell für SiC optimierten Kühlkörper, rot – überarbeitetes SiC Module mit speziell für IGBT optimierten Kühlkörper, grün – überarbeitetes SiC Module mit speziell für SiC optimierten Kühlkörper).....	27
Abbildung 17: Gemessene Einschaltverluste E_{on} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2,0 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$	28
Abbildung 18: Gemessene Ausschaltverluste E_{off} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2,0 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$	29
Abbildung 19: Gemessene Reverse-recovery Verluste E_{rr} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$	29
Abbildung 20: Gemessene maximale Drain-source Spannung U_{DS} des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für $R_{gon} = 2 \Omega$ und $R_{goff} = 1,7 \Omega$	30

Abbildung 21: Gemessene Streuinduktivität L_{σ} des Power Stacks V3.0 mit SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung.....	31
Abbildung 22: Gemessene Stromaufteilung des Power Stacks V3.0 mit SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung	31
Abbildung 23: Gemessene Schaltverluste des SiC-MOSFETs V4 in zweifach Parallelschaltung für variierende Gate Parameter R_{gon} und R_{goff} für den Betriebspunkt $I_c = 2.000 A_{peak}$, $T_j = 120\text{ °C}$ und $U_{dc} = 1.800\text{ Vdc}$: (a) Einschaltverluste E_{on} , (b) Ausschaltverluste E_{off} und (c) Reverse-recovery Verluste E_{rr}	32
Abbildung 24: Thermische Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET Modul V4 für die Applikation des MSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0\ \Omega$, $R_{goff} = 1,7\ \Omega$, $T_{liquid} = 40\text{ °C}$, $\cos(\varphi) = -0,658$, Si-Kühlkörper).....	33
Abbildung 25: Derating Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET-Modul V4 für die Applikation des MSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0\ \Omega$, $R_{goff} = 1,7\ \Omega$, $T_{liquid} = 40\text{ °C}$, $\cos(\varphi) = -0,658$, Si-Kühlkörper)	34
Abbildung 26: Thermische Simulation des maximalen Ausgangsstroms für den Power Stack 3.0 mit SiC-MOSFET Modul V4 für die Applikation des LSC-Umrichters ($R_{gon} = 2,0\ \Omega$, $R_{goff} = 1,7\ \Omega$, $T_{liquid} = 40\text{ °C}$, $\cos(\varphi) = 0,448$, Si-Kühlkörper).....	35
Abbildung 27: Ersatzschaltbild einer Netzfilter: hier LCL-Filtertopologie	35
Abbildung 28: Dämpfungscharakteristik des vorgeschlagenen LCL-Filters mit zusätzlichen Trap-Filter für den Power Stack 1.0.....	37
Abbildung 29: Ausgelegte Induktivitäten des LSC-Filters mit Trap-Filter: (a) Trap-Filter Induktivität, (b) du/dt-Filter Induktivität und (c) Induktivität des LCL-Filters.....	38
Abbildung 30: Vergleich der Stromdichte für eine Schaltfrequenz von 6 kHz und 2,85 kHz: Variante 1	41
Abbildung 31: Vergleich der Stromdichte für eine Schaltfrequenz von 6 kHz, 2,85 kHz und 1,95 kHz bei 19% Stromrippel: Variante 2	42
Abbildung 32: Prinzip-Ersatzschaltbild des 7,5 MVA Back-to-Back Teststandes der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH für die Tests der SiC Power Stacks 3.0	43
Abbildung 33: Foto des Nordex Prototypen Umrichters im Testfeld der Ingenieurbüro Hoffmann GmbH	44
Abbildung 34: Wirkungsgrad und Sperrschichttemperaturmessung des Power Stacks 1.0 und 3.0 * T_j Operational point: $T_{inlet} = 20\text{ °C}$, $\cos(\varphi) = -1,0$, $f_{grid} = 50\text{ Hz}$, $f_{sw} = 2,85\text{ kHz}$ (default, Si)	65
Abbildung 35: Überblick über Mission-profile basierte Lebensdauerberechnung	68
Abbildung 36: Bewertungskriterien – Key Performance Indikatoren für Windenergieanwendungen	78
Abbildung 37: Vorstellung des neuen LHUVkraft Moduls auf dem Infineon Messestand auf der PCIM Expo 2025 in Nürnberg	83



8 Liste der Tabellen

Tabelle 1: Nomenklatur der SiC-MOSFET Muster im Projekt.....	15
Tabelle 2: Komponentenzuordnung der Power Stacks.....	20
Tabelle 3: Komponentenzuordnung für die verschiedenen Varianten der Power Stacks	20
Tabelle 4: Netzfilterauslegung für den Power Stack 1.0	36
Tabelle 5: Zusammenfassung der Daten für eine Filterauslegung	39
Tabelle 6: Vergleichendes Auslegungsbeispiel eines Netzfilters für den Power Stack 1.1 und 3.0: Variante 1 mit 27 % maximal zulässigen Stromripple	40
Tabelle 7: Vergleichendes Auslegungsbeispiel eines Netzfilters für den Power Stack 1.1 und 3.0: Variante 2 mit 19% maximal zulässigen Stromripple	41
Tabelle 8: Kenndaten des 7,5 MVA Back-to-Back Teststandes	43
Tabelle 9: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 1.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz.....	45
Tabelle 10: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 3.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz und einer Schaltfrequenz von 2,85 kHz.....	51
Tabelle 11: Überblick der Messkampagne und deren Ergebnisse der Prototypenerprobung für den Power Stack 3.0 im 7,5 MVA Back-to-Back Teststand für eine 50 Hz Netzfrequenz und einer Schaltfrequenz von 5,7 kHz.....	58
Tabelle 12: Fallstudie für die technische Bewertung der SiC Technologie	67
Tabelle 13: Lebensdauerergebnisse des LSC des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit drei parallelen IGBT Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz für den Teilumrichter	69
Tabelle 14: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit drei parallelen IGBT- Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz und einer Schaltfrequenzumschaltung um den Synchronpunkt für den Teilumrichter	69
Tabelle 15: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6$ kHz für den Teilumrichter	70
Tabelle 16: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6$ kHz und einer Schaltfrequenzumschaltung um den Synchronpunkt für den Teilumrichter	70
Tabelle 17: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen IGBT-Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz für den Vollumrichter.....	70
Tabelle 18: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen IGBT-Modulen, $f_{sw} = 1,95$ kHz für den Vollumrichter.....	71
Tabelle 19: Lebensdauerergebnisse des LSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6$ kHz für den Vollumrichter.....	71



Tabelle 20: Lebensdauerergebnisse des MSC Power Stacks 3.0 (SiC) im Normalbetrieb und schallreduzierten Betrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit mit zwei parallelen SiC-Modulen, $f_{sw} = 6$ kHz für den Vollumrichter.....	71
Tabelle 21: MTBF des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) des Teilumrichters mit drei parallelen IGBT-Modulen mit $f_{sw} = 1,95$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit.....	72
Tabelle 22: MTBF des SiC Power Stacks 3.0 des Teilumrichters mit zwei parallelen SiC-Modulen mit $f_{sw} = 6$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit.....	72
Tabelle 23: MTBF des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) des Vollumrichters mit zwei parallelen IGBT-Modulen mit $f_{sw} = 1,95$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit.....	73
Tabelle 24: MTBF des SiC Power Stacks 3.0 des Vollumrichters mit zwei parallelen SiC-Modulen mit $f_{sw} = 6$ kHz, $T_{inlet} = 40^{\circ}\text{C}$ für den Normalbetrieb normiert auf die gesamte Betriebszeit.....	74
Tabelle 25: AEP-Berechnungen des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0 im Normalbetrieb des Teilumrichterkonzeptes bezogen auf die Netzenergie des Power Stack 1.1 (2.3-kV-IGBT)	75
Tabelle 26: AEP-Berechnung des Power Stacks 1.1 (2,3-kV-IGBT) und 3.0 im Normalbetrieb des Vollumrichterkonzeptes bezogen auf die Netzenergie des Power Stack 1.1 (2.3 kV IGBT)	75
Tabelle 27: Vergleich der der Systembetrachtung und Energieeffizienz für die Teil- und Vollumrichterapplikation.....	76
Tabelle 28: Überblick KPIs für Teil- und Vollumrichterapplikation für den Power Stack 1.1 (2,3-kV-IGBT) und den Power Stack 3.0 (SiC).....	80