

SiC-Mobil

**SiC-Mobil - SiC-Frequenzumrichter für
Elektromobilität**

19I21024A



Gemeinsamer Schlussbericht per 28.02.2025

ZE:

(individuelles Partnerlogo)

Koordinator:



**Partner: Breuer Motoren, Block,
Freqcon, Universität Bremen (BCM)**

Vorhabenbezeichnung:

SiC-Mobil

SiC-Mobil - SiC-Frequenzumrichter für Elektromobilität

Laufzeit des Vorhabens:

01.09.2021 bis 28.02.2025

Impressum:

© 2025 Dr. Alexander Hoffmann,
IAV GmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Ablauf des Vorhabens	4
3	Arbeitspakete und Ergebnisse	7
3.1	AP-0 Projektmanagement	7
3.2	AP-1 Definition der Leistungsmerkmale, Konzepterstellung und Spezifikation	7
3.3	AP-2 Applikationsentwicklung, Aufbau SiC-Frequenzumrichter	10
3.4	AP-3 Entwicklung kompakter, modularer Aufbau- / Einbaukonzepte	13
3.5	AP-4 Entwicklung und Aufbau einer Belastungsanlage zur Nachbildung der Betriebszustände	15
3.6	AP-5 Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Komponenten und Subsysteme	19
3.7	AP-6 Optimale Betriebsstrategien für SiC-Umrichter in den Anwendungsbereichen.....	22
3.8	AP-7 Charakterisierung des HF-Verhaltens von Motor/Drosseln/Batterie	26
3.9	AP-8 Systemoptimierung für Antriebsstrang und Batterieladesystem	28
4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	33
5	Öffentlichkeitsarbeit (Konferenzen, Messen und Publikationen)	35

1 Einleitung

Ziel des Verbundprojektes SiC-Mobil war es, Traktionsantriebe und Ladesysteme von Elektrofahrzeugen kleiner, leichter und effizienter zu machen. Dazu hatten sich die Projektpartner IAV, Breuer Motoren, Block, Freqcon und Universität Bremen (BCM) zusammengeschlossen. Auf der Leistungselektronik lag dabei das Hauptaugenmerk. Neuartige Leistungshalbleiterbauelemente auf der Basis von Siliziumcarbid (SiC) ermöglichen die Realisierung hoher Umrichterleistungen mit geringerem Bauraum und Gewicht, bei gleichzeitig höherem Wirkungsgrad als mit bis dahin eingesetzten Silizium-basierten Schaltern (IGBT). Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu SiC-Umrichtern für die Elektromobilität waren und sind deshalb nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungen in der gesamten Automobilbranche weltweit. Die Partner gingen davon aus, dass die wirtschaftlich erfolgreiche Nutzung von SiC-Umrichtern in der Elektromobilität sich nur erreichen lässt, wenn im Rahmen eines interdisziplinären Entwicklungsprozesses zusätzlich zur reinen Umrichterfunktionalität auch die parasitären Lebensdauer- und EMV-Effekte in die SiC-Umrichterentwicklung einbezogen werden. Dies wurde in den dreieinhalb Jahren während des Projektverlaufs unternommen. Als Ergebnis wurde ein Pulswechselrichter entwickelt und getestet, welcher als Antriebs-/Traktionsumrichter, als Ladeumrichter (Interleaved DC-DC Wandler) und als Active-Front-End verwendet werden kann.

2 Ablauf des Vorhabens

Das Projekt SiC-Mobil wurde im Zeitraum von 09/2021 bis 02/2025 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland betreut.

Die Umsetzung eines ganzheitlichen und systemübergreifenden Entwicklungsprozesses für den Einsatz von SiC-Umrichtern in der Elektromobilität, den das Projekt SiC-Mobil verfolgte, erforderte eine enge Zusammenarbeit von Fachleuten aus verschiedenen Unternehmen, die sich in diesem Projekt zusammengeschlossen hatten. Das Konsortium vereinte daher Partner mit Expertise aus unterschiedlichen interdisziplinären Bereichen. Die Forschungsgruppen der Universität Bremen stellen dabei eine fundierte wissenschaftliche und technische Grundlage bereit, um innovative Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse und -prüfung leistungselektronischer Bauteile zu entwickeln. Die in Abbildung 1 dargestellten Schwerpunkte der fünf Projektpartner zeigen die idealen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Projektumsetzung.

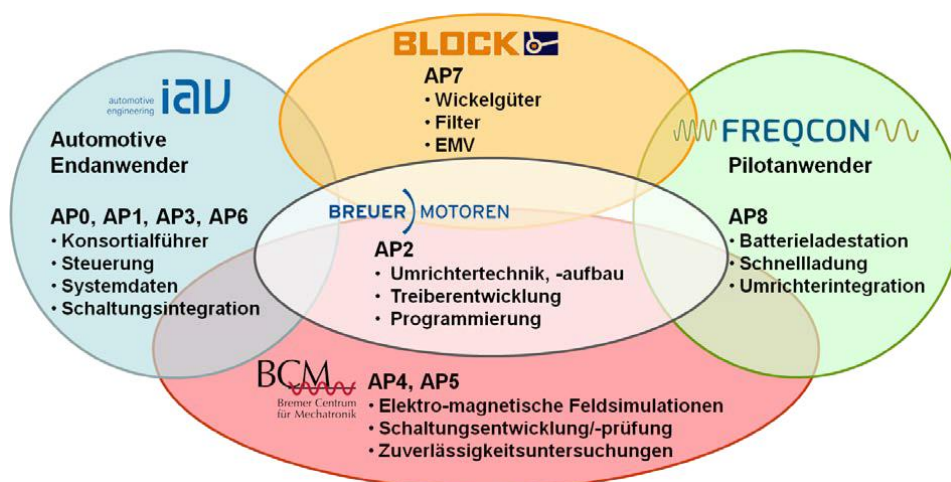


Abbildung 1: Projektschwerpunkte der Partner

Die im SiC-Mobil-Projekt geplanten Projektphasen sind in Abbildung 2 dargestellt. Diese Phasen konnten bis einschließlich AP8 umgesetzt werden, wobei Belastungsprüfung des SiC-Antriebsystems bereits in AP6 im notwendigen Maße erfolgte. Eine Wiederholung in AP8 erfolgte somit nicht (siehe dazu AP 8.1)

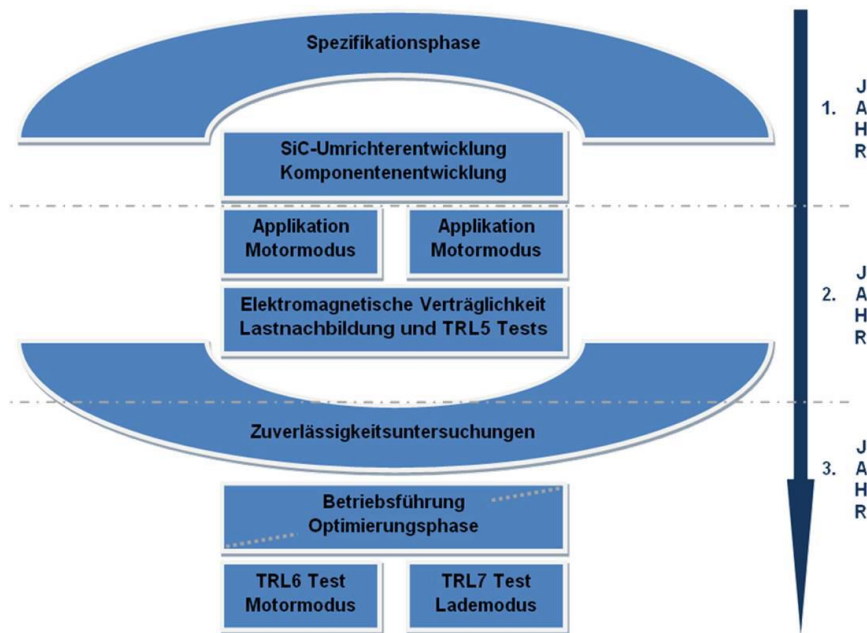


Abbildung 2: Projektphasen

Für die Umsetzung des Gesamtkonzeptes waren acht inhaltliche Arbeitspakete (AP-1 bis AP-8) und ein Arbeitspaket AP-0 Projektmanagement geplant.

Der ursprüngliche Arbeits- und Zeitplan des Projektes SiC-Mobil war darauf ausgelegt das Projektziel in 36 Monaten umzusetzen. Im Verlauf des Projekts kam es jedoch zu mehreren Anpassungen im Zeitplan, sodass schlussendlich eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate beantragt und bewilligt wurde. Wesentliche Gründe hierfür waren Lieferschwierigkeiten und das Insolvenzverfahren eines Projektpartners (das nach einigen Monaten erfolgreich abgewendet werden konnte), was zu einer verspäteten Bereitstellung des Wechselrichterprototypen führte. Der tatsächliche Projektablauf ist im Balken-/Zeitplan in Abbildung 3 dargestellt.

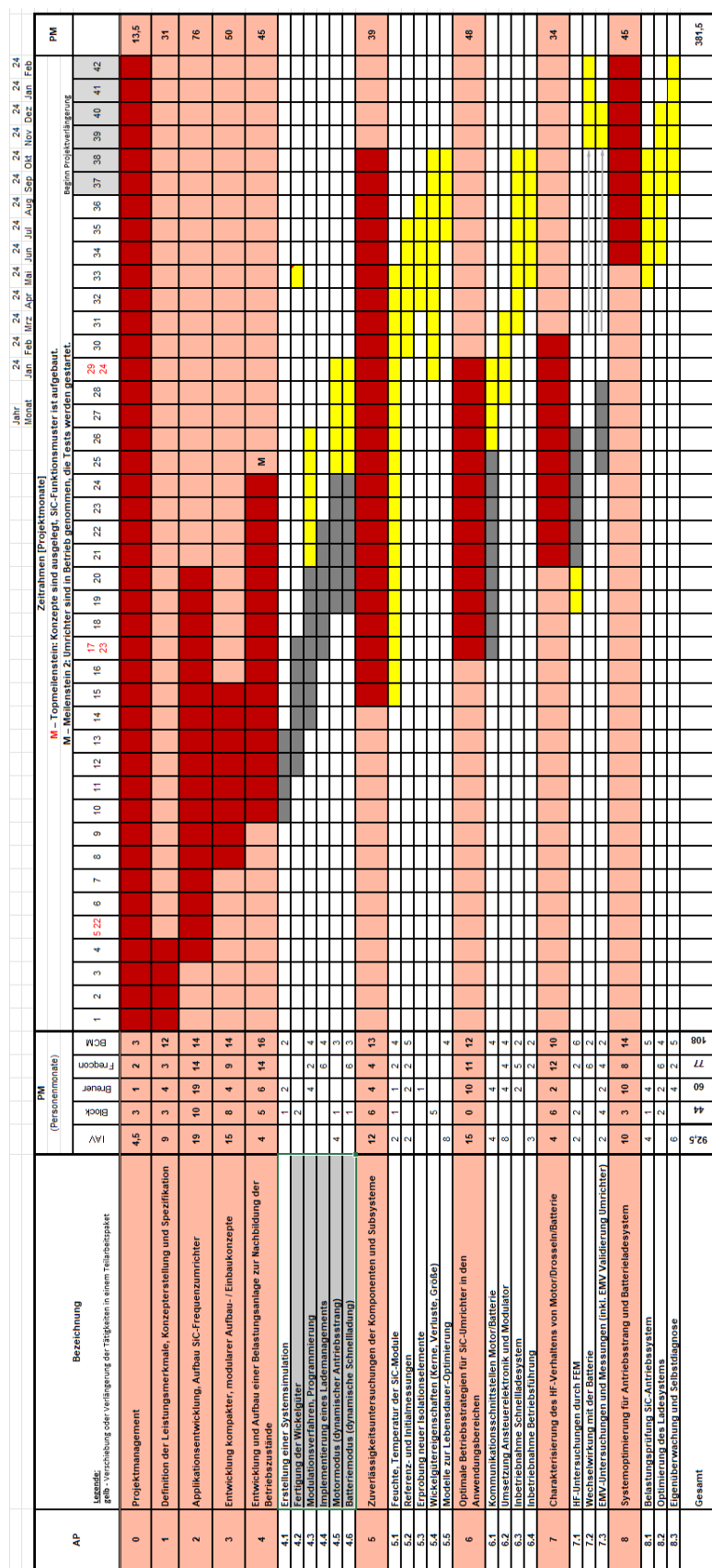


Abbildung 3: Balkenplan des Projekts

Während der dreieinhalbjährigen Projektlaufzeit arbeiteten alle Projektpartner eng und strukturiert zusammen. Die zentrale Koordination erfolgte über 14-tägige Online-Konsortialtreffen, bei denen der Fortschritt der einzelnen Arbeitspakete besprochen und nächste Schritte festgelegt wurden. Innerhalb der Arbeitspakete fanden zusätzlich regelmäßige Abstimmungen der jeweils beteiligten Partner statt, um Inhalte und Zeitpläne eng zu verzahnen. Einmal jährlich traf sich das gesamte Konsortium persönlich bei wechselnden Projektpartnern – jeweils im Beisein des Projektträgers – um den Gesamtfortschritt zu evaluieren und strategische Weichenstellungen vorzunehmen. Bei dringenden Fragestellungen oder unerwarteten Herausforderungen erfolgten ad-hoc Abstimmungen, die eine zeitnahe Lösung ermöglichten. Alle relevanten Projektdokumente wurden gemeinschaftlich über eine für alle zugängliche und strukturierte SharePoint-Ablage verwaltet, was eine transparente und effiziente Zusammenarbeit förderte.

3 Arbeitspakete und Ergebnisse

Im Folgenden werden in tabellarischer Form die Ergebnisse der Arbeitspakete (AP) mit den in der Gesamtvorhabenbeschreibung (GVB) definierten AP verglichen. Diese Übersicht gibt einen Überblick über den Projektabschluss und die erreichten Meilensteine.

3.1 AP-0 Projektmanagement

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
IAV GmbH	Als Ergebnis liegt eine Projektwebseite vor
Erstellung und Betreuung der Projektwebseite: Im Rahmen des Projektmanagements wurde eine umfassende Webseite entwickelt, die alle relevanten Informationen und Ressourcen bereitstellt (sic-mobil – Mit SiC-Mobil (SiC-Frequenzumrichter für Elektromobilität) werden Traktionsantriebe und Schnelladesysteme von Elektrofahrzeugen kleiner, leichter und effizienter gemacht.). Erstellung von Berichten, Visualisierung, Präsentationen und Patentierung: Die Berichterstellung sowie die Visualisierung und Präsentation der Projektergebnisse wurden innerhalb des Konsortiums koordiniert. Zusätzlich erfolgte die Unterstützung bei der Anmeldung relevanter Patente. Organisation und Dokumentation von Arbeitstreffen: Regelmäßige Arbeitstreffen wurden organisiert, um den Fortschritt des Projekts zu überwachen und wichtige Entscheidungen zu dokumentieren. Gesamtkoordination des Projekts: Die übergeordnete Koordination des Projektes wurde sichergestellt, um eine reibungslose Zusammenarbeit und einen erfolgreichen Abschluss zu gewährleisten.	

3.2 AP-1 Definition der Leistungsmerkmale, Konzepterstellung und Spezifikation

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
IAV GmbH	Als Ergebnis liegen elektrische Leistungsdaten für die Entwicklung der SiC-Umrichter vor.

Ergebnis	
Im Rahmen von AP 1 wurden die relevanten technischen Anforderungen für den Antriebswechselrichter und seine Subkomponenten (Leistungsmodul, Gate-Treiber, Control-Board, Sensoren) gemeinsam von den Projektpartnern erarbeitet und sukzessive weiterentwickelt. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Abstimmung der teilweise divergierenden Anforderungen des Ladesystems und des Antriebswechselrichters gelegt, um eine einheitliche, modulare Integration zu ermöglichen. Als Ergebnis dieser Zusammenarbeit entstand eine modulare Systemarchitektur mit den folgenden Hauptkomponenten: • Active Front End (AFE, 250 kW): Wandelt die Wechselspannung in eine Gleichspannung um. Schaltfrequenz: 25 kHz oder 50 kHz. SiC-Halbleiter: 1700V/300A-Module für $U_{DC}=1200V$. • Interleaved DC-DC-Wandler (250 kW, erweiterbar auf 750 kW): Erhöht die Gleichspannung auf 1200 V. Schaltfrequenz: 25 kHz oder 50 kHz. SiC-Halbleiter: 1700V/300A-Module für $U_{DC}=1200V$. • Antriebsumrichter (250 kW): Wandelt die erzeugte Gleichspannung in eine variable Dreiphasenwechselspannung für den elektrischen Antrieb um. Schaltfrequenz: 20 kHz. SiC-Halbleiter: 1200V/600A-Module für $U_{DC}=800V$. In allen drei Komponenten wird dieselbe Umrichterplattform auf Basis von SiC-Technologie verwendet, wobei die Halbleitermodule anwendungsspezifisch angepasst sind. Dies erhöht die Systemkonsistenz sowie die Effizienz in Wartung und Entwicklung. Abbildung 4 zeigt die Subkomponenten inklusive ihrer Funktionen und Schnittstellen. Die Inhalte der Architektur sind mit den erarbeiteten Anforderungen verknüpft und dienen auch als Grundlage für die Abstimmung zwischen den Partnern in den regelmäßigen Status-Meetings. Für die Konzeptentwicklung der Zustandsüberwachung analysierten die Projektpartner relevante Normen und führten eine umfassende Literaturrecherche zu physikalischen Alterungseffekten von SiC-MOSFETs durch. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden sogenannte "Lifetime Sensitive Parameters" (LSPs) wie Durchlassspannung, Ausschaltverzögerungszeit und Threshold-Spannung identifiziert und hinsichtlich ihrer Eignung für eine Echtzeit-Zustandsüberwachung bewertet. Ebenso wurden die normativen Rahmenbedingungen für Lebensdauerprüfungen untersucht. Dabei wurde insbesondere auf die Unterschiede zwischen EMV-Normen für den Industrie- und den Automobilbereich eingegangen, um die Anforderungen für die beiden Anwendungsbereiche – Ladesystem und Antriebswechselrichter – klar zu definieren.	

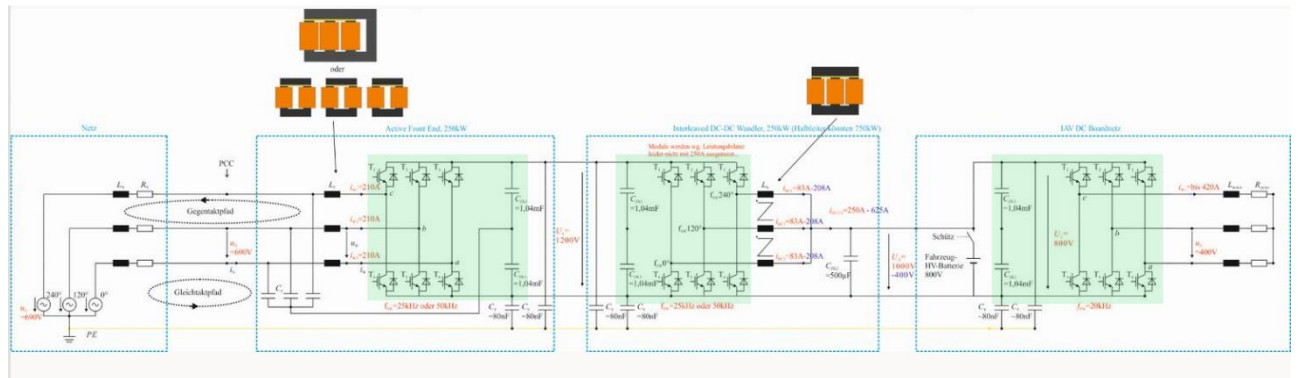


Abbildung 4: Modulare Systemarchitektur mit Active Front End, DC-DC Wandler und Antriebsumrichter

Auf Basis einer detaillierten Analyse marktüblicher EMV-Validierungsverfahren sowie relevanter ISO-, IEC- und CISPR-Normen wurde ein EMV-Anforderungsmodul entwickelt. Dieses Modul dient künftig als technische Basisanforderung für HV-Traktionskomponenten. Im Rahmen der Projektzusammenarbeit mehrerer Partner wurde zur Untersuchung der Störaussendung eine übersichtliche Darstellung der EMV-Anforderungen erstellt. Dabei wurden die relevanten und häufig angewendeten Normen aus den Bereichen Netzanbindung, Ladeinfrastruktur und Fahrzeugtechnik systematisch berücksichtigt und in das System integriert.

Darüber hinaus wurde die Marktzugangsregelung UN ECE R10-06 in technische Anforderungen überführt. Insbesondere wurde eine Umrechnung der Grenzwerte für gestrahlte Emissionen unterhalb von 108 MHz auf eine äquivalente geleitete Störemission der HV-Versorgungsleitungen vorgenommen. Dies erlaubt eine gezielte Bewertung der Marktkonformität der Hochvolt-Leistungsstrangkomponenten, ohne zusätzliche Einflüsse durch Niedervolt-Komponenten berücksichtigen zu müssen. Diese umgerechneten Anforderungen wurden für die abschließende Bewertung der Messungen und Simulationen herangezogen, jedoch nicht in den Anforderungskatalog aufgenommen, da sie nicht als standardtaugliche Lastenheftanforderungen gelten.

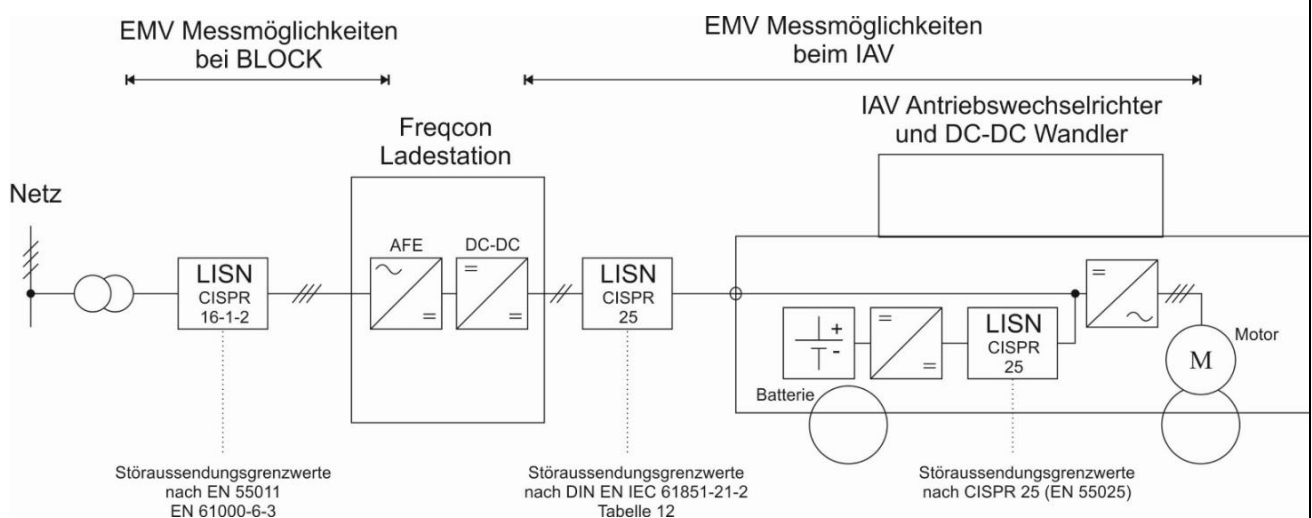


Abbildung 5: EMV-Anforderungen auf Systemebene

Im Rahmen der Konzeptentwicklung wurde in gemeinsamer Abstimmung ein Testkonzept für die funktionalen Prüfungen der Komponenten erstellt. Die Testaufgaben wurden zwischen den Partnern aufgeteilt. Grundlage hierfür war eine frühzeitige Normenrecherche, durch die sichergestellt wurde, dass jeweils relevante Normen in die Testplanung integriert werden konnten. Ziel des modularen Konzepts war es, eine flexible und skalierbare Testumgebung zu schaffen, die den unterschiedlichen Anforderungen der Projektpartner gerecht wird. Die Modularität ermöglichte die gezielte Entwicklung spezifischer Testmodule für verschiedene Funktionalitäten und Systemkomponenten. Die enge Zusammenarbeit im Konsortium war essenziell, um sicherzustellen, dass alle relevanten technischen und normativen Aspekte in das Gesamtsystem einfließen.

3.3 AP-2 Applikationsentwicklung, Aufbau SiC-Frequenzumrichter

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
Breuer-Motoren	Meilenstein 1 „Bereitstellung des validierten Gesamtkonzeptes“ Auslegung des Umrichtersystems, Design und Entwicklung der Leistungsstufe, Treiber und Netzteil. Optimale Platzierung der Halbleitermodule. Auswahl Prozessorsysteme und Schnittstellendefinitionen. Festlegung von Belegungen von Treiber-, Fehlersignalen und Istwerten, Kommunikationsschnittstellen/-systeme. Drehgebern wird konfiguriert. Mechanische Konstruktion, Dimensionierung von Ventilatoren, Pumpen und Wärmetauschern und die Auslegung von Entstörfiltern, Kondensatoren und Drosseln.
Ergebnis	Entwicklung und Konstruktion von zwei SiC-WR-Endstufen. Geplant ist Aufbau als Versuchsträger, mit guter Zugänglichkeit zu einzelnen Baugruppen. WR1: 1200V/600A-Module für $U_{DC}=800V$ Einsatz als Fahrumrichter. WR2: 1700V/300A-Module für $U_{DC}=1200V$ Einsatz als AFE und als DC/DC-Steller. Zwischenkreiskondensator wird durch Verschaltung von einzelnen Rechteck-Kondensatoren aufgebaut (Materialverfügbarkeit Folienkondensatoren). Einsatz der Breuer-Controllerkarte (TI-Concerto DSP). Adaptierbarkeit für die IAV-Steuerung und die Freqcon-Steuerung.

Unter der Leitung von Breuer-Motoren wurden in intensivem Austausch mit den Projektpartnern IAV GmbH, BCM und Freqcon die Schnittstellen für die geplanten Ansteuermöglichkeiten abgestimmt. Für IAV und Freqcon wird eine Adapterkarte entwickelt, die es ermöglicht, die Steuerungen von IAV und Freqcon direkt mit dem SiC-Wechselrichter zu verbinden. Die erforderlichen Überwachungs-

und Schutzfunktionen bleiben im Basisumfang der SiC-Wechselrichter erhalten und müssen von der übergeordneten Steuerung ausgewertet werden.

Außerdem wurde die Ankopplung von speziellen Messschaltungen mit IAV abgestimmt, die zur Lebensdauerabschätzung eingesetzt werden sollen.

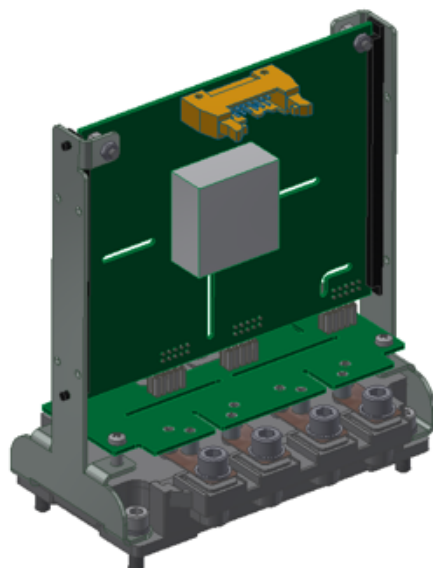
Mit dem BCM wurde der Einsatz der Breuer-Concerto-DSP-Steuerung abgestimmt. Mit dieser Steuerung erarbeitet Breuer die erforderlichen Features, um die SiC-Wechselrichter im geplanten Umfeld betreiben und testen zu können. Diese Steuerung, mit der entsprechenden Software, wird dann auch dem BCM zur Entwicklung der Regelungs-Software für den Ladeumrichter zur Verfügung gestellt.

In Zusammenarbeit mit IAV wurde auch ein Entstörfilter für den DC-Eingang der SiC-Wechselrichter ausgelegt und aufgebaut.

Mit den so abgestimmten Maßnahmen sind alle erforderlichen Prozessschnittstellen nach außen, wie Geber, Kommunikation sofort nutzbar.

Die Auswertung von allen erforderlichen Zustandsgrößen kann über die implementierte Messtechnik zur Verfügung gestellt werden.

Treiber

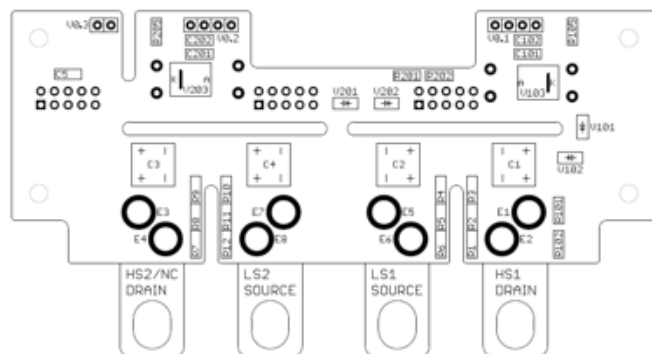


- Treiberkarten und Grundkarten befinden sich aktuell in der Produktion.

- Lieferung geplant in KW47.

Muster sind derzeit beim BCM zu ersten Tests

Grundkarte der Ansteuerung mit Cera-Link-Kondensatoren C1-C4



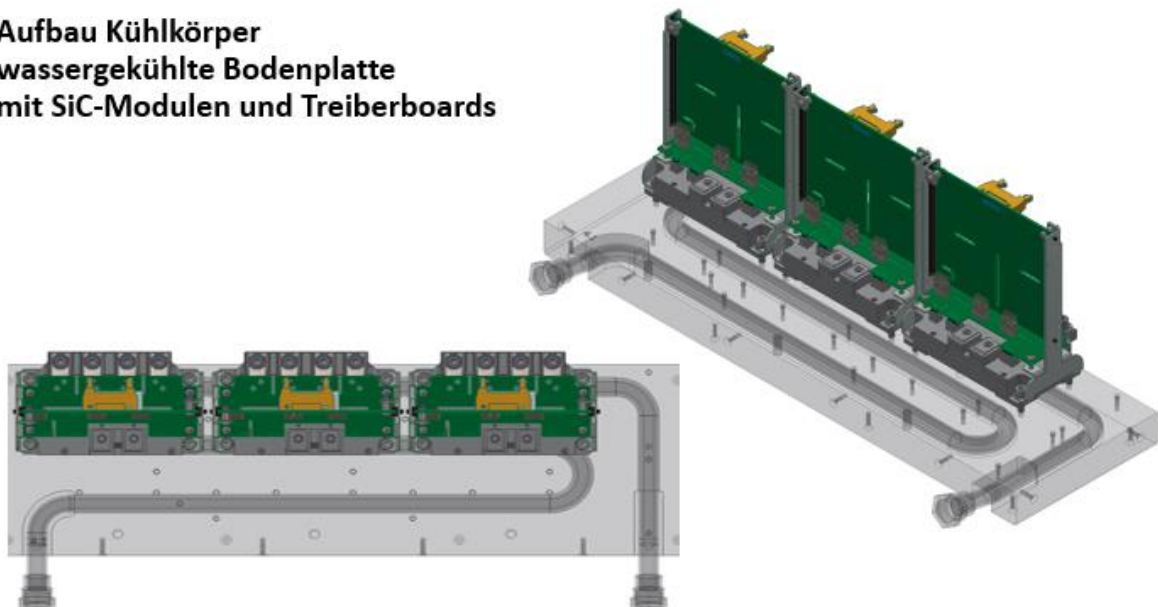
BSICTG01
801-03-01-01-1034274-14-00

Breuer-SiC-MOS-Treiber Grundkarte 01
13.07.2022 12:37

SiCMobil

Abbildung 6: Treiberkarte für SiC-Module

Aufbau Kühlkörper wassergekühlte Bodenplatte mit SiC-Modulen und Treiberboards

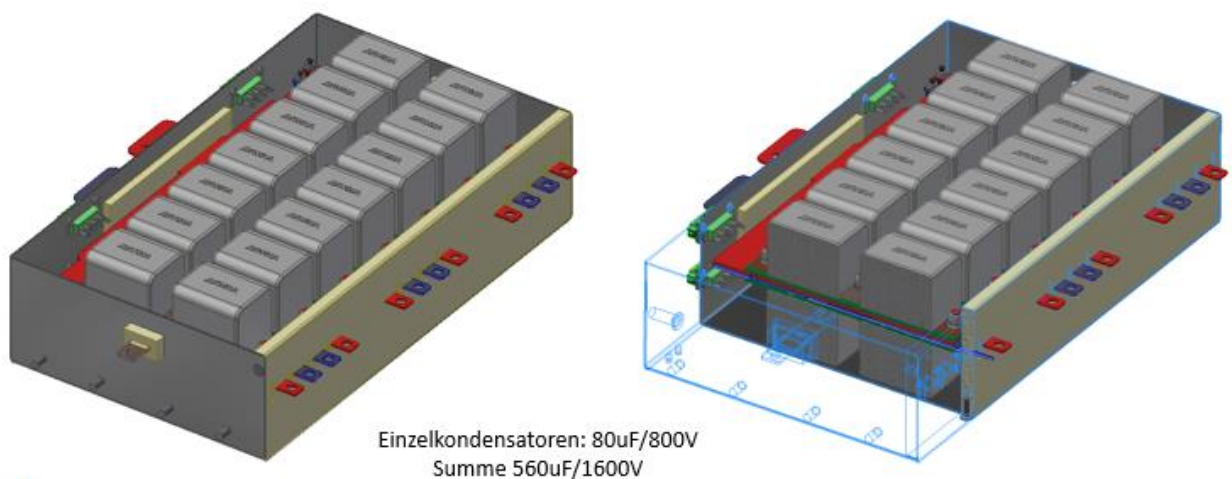


SiC Mobil

11

Abbildung 7: Aufbau der Bodenplatte / Anordnung Module und Treiber

Aufbau Kondensator mit Mittelpunktanschluss und induktivitätsarmer Anbindung an die SiC-Module

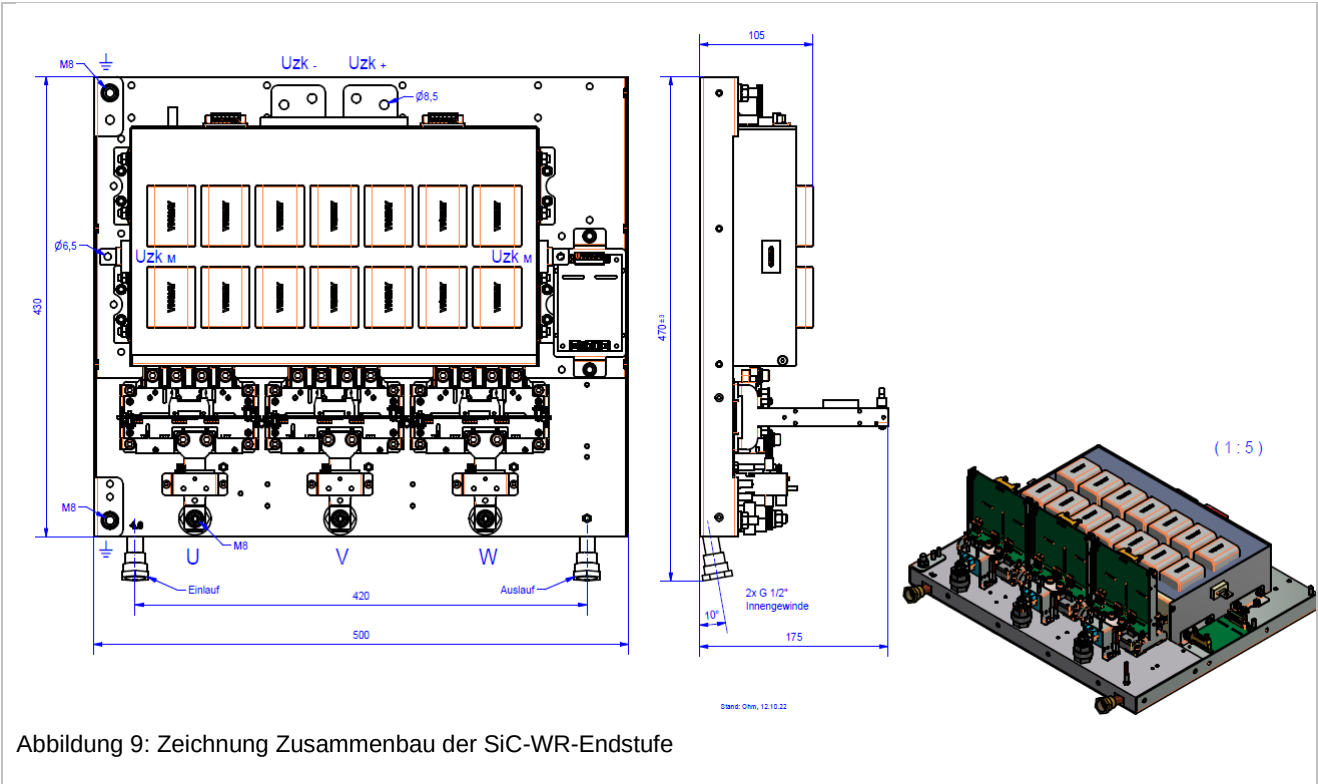


Einzelkondensatoren: 80uF/800V
Summe 560uF/1600V

SiC Mobil

13

Abbildung 8: Aufbau des ZK-Kondensators



3.4 AP-3 Entwicklung kompakter, modularer Aufbau- / Einbaukonzepte

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
IAV GmbH	Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes sind quantifizierte Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften und der Nutzbarkeit der Materialien zur Realisierung hochkompakter SiC-Umrichtersysteme.
Ergebnis	Im Rahmen des Arbeitspakets 3 zur Entwicklung kompakter, modularer Aufbau- und Einbaukonzepte wurden mehrere wesentliche Ergebnisse erzielt. In AP 3.1 lag der Fokus auf der Modellierung, wobei Schaltungssimulationen in LTSpice durchgeführt wurden, um die Robustheit der Schaltung gegen Produktions- und Bauteiltoleranzen zu bewerten. Dies war entscheidend, um den hohen Anforderungen an die Robustheit von Diagnosen im Automobilbereich gerecht zu werden. Zudem wurden Modelle für verschiedene Sensoren erstellt und parametrisiert, darunter der Rotorlagesensor, der Zwischenkreisspannungssensor und die Stromsensoren. In AP 3.2 wurden Maßnahmen zur Ansteuerung und Kommunikation entwickelt, um die Systemauswirkungen von HF-Störungen zu verringern. Hierbei wurden EMV-Filter entwickelt, um negative Auswirkungen zu vermeiden. Die Softwaremodule EmSt und EmDiag wurden angepasst, um fehlerhafte Sensorfunktionen zu erkennen und entsprechende Fehlerreaktionen auszulösen. Die Optimierung der Schaltzellen in AP 3.3 konzentrierte sich auf die Treiberpfade, da ein vollständiges 3D-Modell aufgrund fehlender Informationen nicht erstellt werden konnte. Eine signifikante Verbesserung wurde durch das Entfernen der Cera-Link-Kondensatoren erreicht, die sich bei realen Messungen selbst entlöteten und parasitäre Eigenschaften aufwiesen.

AP 3.5 befasste sich mit der leitungsgeführten Störaussendung. Aufgrund von Verzögerungen im Projektzeitplan wurde die EMV-Vermessung in eine geschirmte Umgebung verschoben, um umfassendere Messungen bei verschiedenen Lastpunkten durchzuführen und eine tiefere Analyse des elektrischen und thermischen Verhaltens von Ringbandkernen zu ermöglichen.

Die EMV-Filterentwicklung in AP 3.6 war ein iterativer Prozess, bei dem mehrere Filter-Designs simuliert und hinsichtlich ihrer Einfügedämpfung verglichen wurden. Das resultierende Filterdesign in T-Form dämpft den Common-Mode-Anteil bei hohen DC-Strömen und berücksichtigt die Dispersion des permeablen Kernmaterials.

In AP 3.7 wurde ein Gesamtmodell des Inverters aufgebaut, das alle Submodelle in Form eines SPICE-Modells umfasst. Dies ermöglichte eine effiziente Verschaltung und Validierung des Modells. Zudem wurden digitale Zwillinge für Ringbandkerne erstellt, um Dispersion und Sättigungseffekte abzubilden.

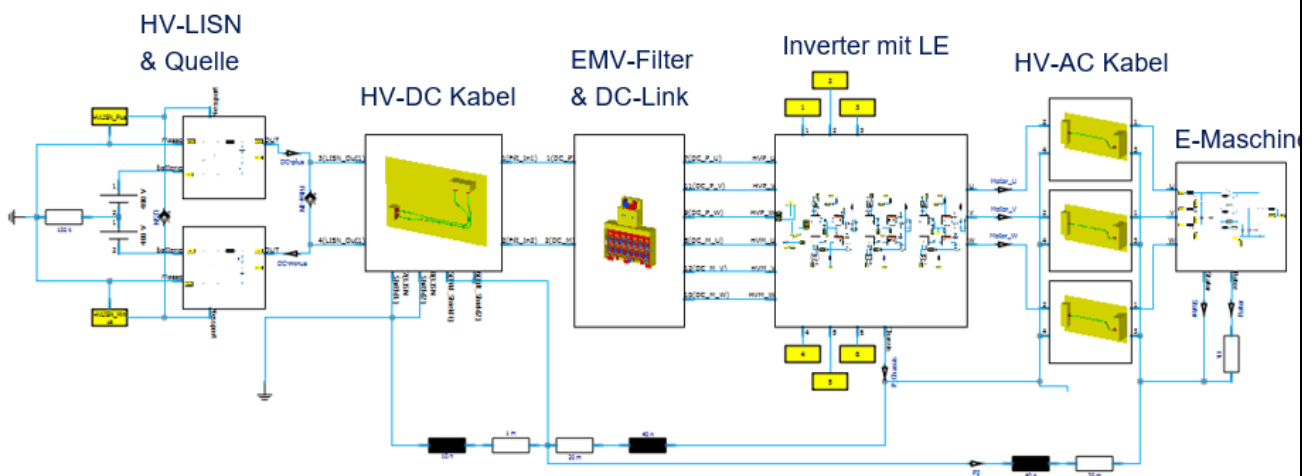


Abbildung 10: Verbessertes Simulationsmodell in CST-Studio

Abschließend wurden in AP 3.8 Schirmungsmaßnahmen für den Inverter und den E-Motor umgesetzt, um belastbare EMV-Messungen zu ermöglichen. Die Schirmung der Schnittstellen des Inverters und der HV-AC Kabel zum E-Motor war entscheidend für die Sicherstellung eines definierten Rückstrompfads für Gleichtaktströme.



Abbildung 11: Schirmung Inverterfront (links) und -rückseite mitsamt HVAC-Kabeln und E-Motor-Blende (rechts)

3.5 AP-4 Entwicklung und Aufbau einer Belastungsanlage zur Nachbildung der Betriebszustände

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
BCM	Meilenstein 2 „TRL 5 Funktionstest für den SiC Umrichter wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Belastungsanlagen sind vollständig aufgebaut, die Funktionalität ist verifiziert und Gesamtsystem ist kalibriert und getestet.
Ergebnis	

Um den Ladevorgang einer Batterie als Systemsimulation durchzuführen, musste zunächst eine Batterie-Nachbildung modelliert werden. Das Model basiert auf einer gesteuerten Spannungsquelle, dessen Wert zwischen der minimalen und maximalen Spannung eines Batteriepakets liegt sowie einem Innenwiderstand, der die Impedanz nachbildet. Die angenommenen Randbedingungen wurden mittels der in AP-1 definierten Spezifikationen bestimmt und sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Parameter der Batterie und der Batterie Pakets

Parameter	Einheit	Batterie	Batterie-Paket
Impedanz	mΩ	0,25	62,5
Entladeschlussspannung	V	2,5	625
Ladeschlussspannung	V	3,65	912,5
Maximaler Ladestrom	A	280	280

Der Ladevorgang des Batteriepakets als Systemsimulation des Gesamtsystems ist in der in der folgenden Abbildung 12 dargestellt. Die Simulation findet unter MATLAB/Simulink-PLECS statt. Es wird zunächst mit einem konstanten Strom und danach mit einer konstanten Spannung geladen. Dieses typische Ladeprofil wird in der Literatur als „CC-CV“ als Abkürzung für „constant current – constant voltage“ bezeichnet wird.

Bis zum Zeitpunkt t_1 wird der Stromsollwert rampenförmig bis auf einen reduzierten Auslegungswert erhöht. Zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 wird die Batterie mit einem konstanten Strom von 140 A geladen. Ab dem t_2 Zeitpunkt wird der Stromsollwert auf seinen Maximalwert von 280 A erhöht. Zum Zeitpunkt t_3 findet der Wechsel vom Laden mit konstantem Strom auf das Laden mit konstanter Spannung statt. Im Zeitpunkt t_4 erreicht die Spannung des Batterie-Pakets die Ladeschlussspannung, der Ladevorgang ist beendet. Das Gesamtsystem konnte somit als Systemsimulation nachgebildet werden. Mit Hilfe des Systemsimulationsmodells kann der Einfluss der Regelung, insbesondere der Einfluss des verbleibenden Stromrippels hinsichtlich des Tiefsetzstellers auf den Gesamtwirkungsgrad untersucht werden. Damit können insbesondere beim Drosseldesign diese Einflüsse systemspezifisch vorhersagt werden.

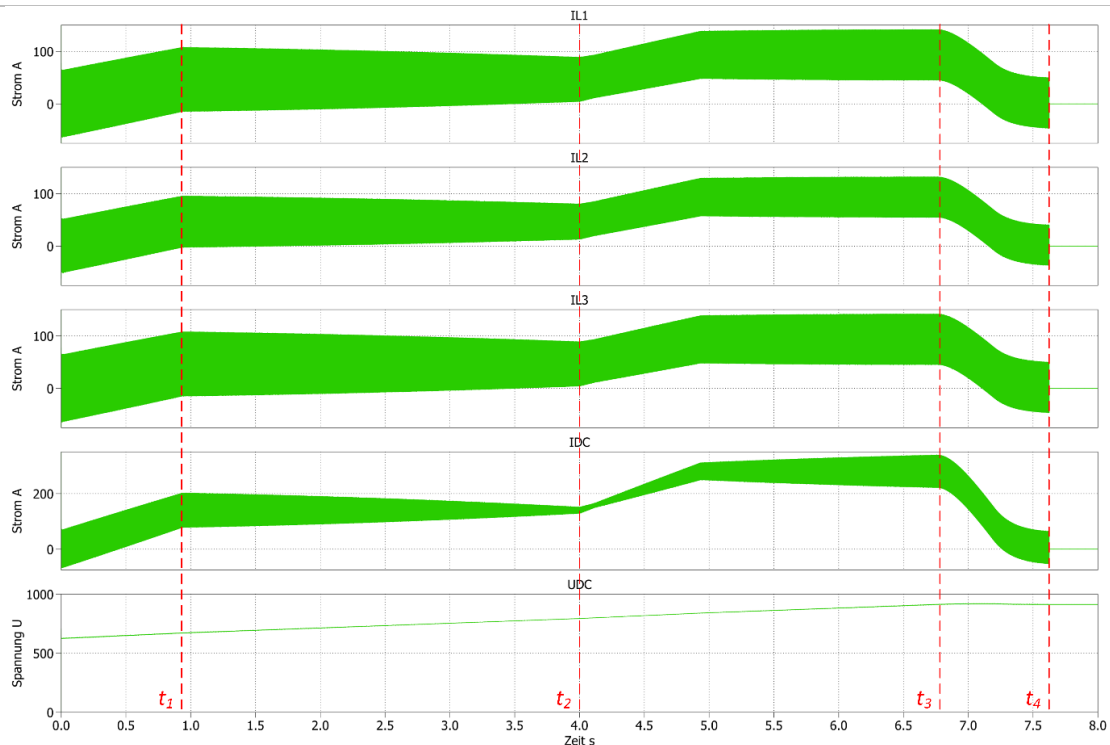


Abbildung 12: Ladevorgang der Batterie, Ströme und Ausgangsspannung des Tiefsetzstellers

Basierend auf den Systemsimulationen zur Implementierung eines Lademanagements konnten die notwendigen Hardware-Voraussetzungen bereits frühzeitig identifiziert und die Anforderungen an die Signalverarbeitung bezüglich der Spezifikation von Messgenauigkeiten und der notwendigen Rechnerhardware festgelegt werden. Für den Betriebsmodus der Ladesäule sind zwei Lademodi definiert und zur Programmierung vorbereitet worden, die sich in dem Ladestrom unterscheiden. Bei dem ersten Modus wird die Batterie mit einem maximalen Strom von 140 A geladen. In dem zweiten Modus (Schnellladen) wird der Strom auf 280 A erhöht.

Das Modell des entworfenen Interleaved-Tiefsetzstellers ist in der folgenden Abbildung 13 gezeigt und wurde im Rahmen des Projekts ausführlich untersucht. Es wird das Konzept auf Basis von PI-Strukturen dabei verfolgt, da der symmetrische Versatz zwischen den Zweigen hierbei präziser geregelt werden kann.

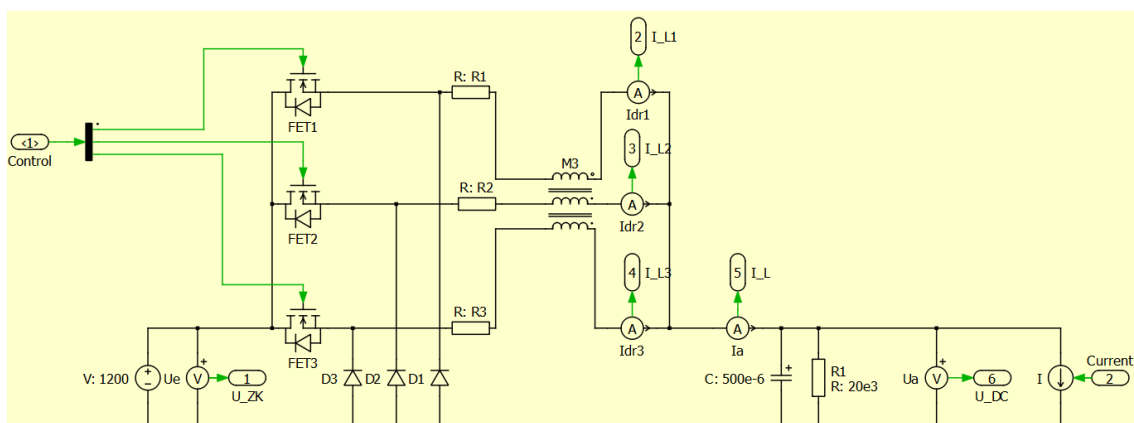


Abbildung 13: Simulationsmodell (Simulink-PLECS-Modell) des Interleaved-Tiefsetzstellers

Basierend auf den umfassenden Simulationen der Regelungsstruktur des Tiefsetzstellers wurde im Anschluss mit der Programmierung der Modulationsverfahren bzw. Regelungsstrukturen fortgefahren. Dabei wurde zunächst damit begonnen die Regelung des Interleaved-Tiefsetzstellers auf der C2000 Architektur umzusetzen. Der c28 Kern übernimmt die Ausführung des Regelungsalgorithmus und die Modulation. Das Modulationsverfahren unterscheidet sich deutlich von einem typischen Modulationsverfahren eines Netz- bzw. Motorwechselrichters. Bei dreiphasigen Umrichtern werden in der Sinus-Dreieck-Modulation drei um 120° verschobene Sinussignale mit einem Trägersignal verglichen und somit das Pulsmuster für die elektronischen Schalter generiert. Obwohl der Tiefsetzsteller auch ein dreiphasiger Stromrichter ist, wird für die Erzeugung von den Ansteuersignalen nur ein Sollwert (DC-DC Wandler) aber drei Trägersignale, die exakt um ein Drittel der Periode verschoben sind, verwendet. Ein Problem bestand dabei in der Synchronisierung der Trägersignale und die Ansteuerung der EPWM-Ausgänge des Concerto Prozessors für die Ausgabe des Pulsmusters.

Nach erfolgreicher Ausgabe des Pulsmusters wurde ein Teststand für das Labormuster des Umrichters, wie in der folgenden Abbildung 14 gezeigt. Der Aufbau umfasst einen Transformator, einen Brückengleichrichter, den Testumrichter, die von BLOCK für den Interleaved-Betrieb ausgelegte Drossel, einen Ausgangskondensator und einen Widerstand, der als Last dient. Für die erste Inbetriebnahme des Umrichters wurde aus Sicherheitsgründen eine reduzierte Spannung verwendet. Die angelegte Wechselspannung erzeugt im Zwischenkreis des Umrichters eine Gleichspannung von 60 V. Die Schaltfrequenz in dem Aufbau ist mit 16 kHz festgelegt.

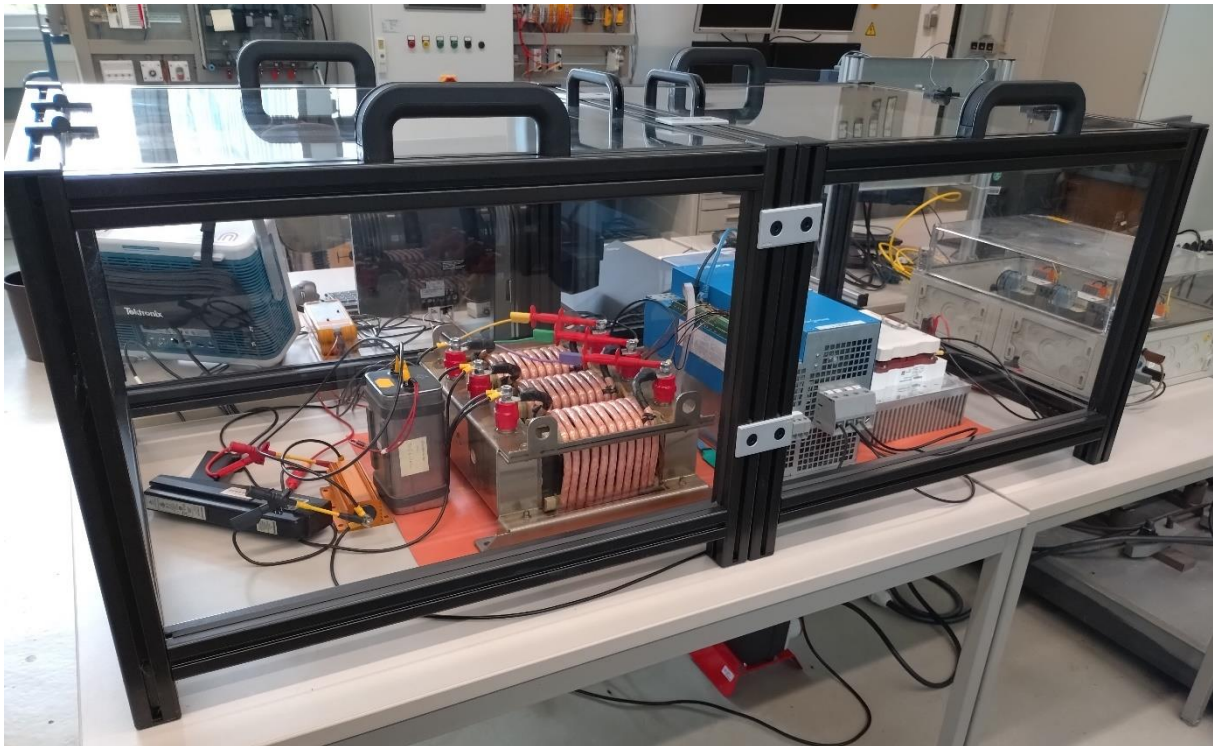


Abbildung 14: Teststand mit dem Umrichter als Labormuster

Nachdem die Inbetriebnahme des Labormuster-Funktionstests erfolgreich durchgeführt wurde, war das Ziel, den Interleaved-Umrichter im universitären HiPE-LAB (High Power Electronics Laboratory) für das beabsichtigte Schnellladesystem zusammen mit der Betriebsführung des Schnellladesystems inbetriebzunehmen. Die Anbindung des Umrichters an die Wasserkühlung des HiPE-LABs konnte durchgeführt werden.

Damit der seitens BREUER gelieferte TRL7-Umrichter für die Ladestation als DC-DC-Steller mit der Interleaved-Ansteuerung an der Belastungsanlage des HiPE-LABs getestet werden konnte, musste ein Ausgangsfilter aufgebaut werden. Das Ausgangsfilter besteht aus der eigens dafür seitens des Projektpartners BLOCK hergestellten magnetisch-gekoppelten Interleaved-Drossel und einer Kondensatorbank, die am BCM aufgebaut wurde. Alle Komponenten wurden dafür in einem Schaltschrank verbaut und wurden einerseits mit dem Umrichter und andererseits mit der Belastungsanlage verschaltet, wie in folgenden Abbildung 15 gezeigt. Zusätzlich zu dem Ausgangsfilterschrank ist ein Schaltschrank mit einem passiven Brückengleichrichter aufgebaut worden, der sowohl die Gleichspannung für den DC-DC-Steller als auch die Versorgungsspannung für die Steuerung des Interleaved-Umrichters bereitstellt.



Abbildung 15: Ausgangsfilterschrank (links), Prüfstand im HiPE-LAB (rechts)

In der nachfolgenden Abbildung 16 ist die Validierung der inbetriebgenommenen Interleaved-Regelung gezeigt. Es ist dabei ein Spannungssollwert für den Tiefsetzsteller von 350 V vorgegeben, während der Maximalstromwert auf 40 A begrenzt wird. Der Leistungstransfer zwischen Umrichter und Batterie für den Betrieb an einer Ladesäule konnte mit diesen Versuchen und der durchgeführten Inbetriebnahme bei FREQCON erfolgreich im Voll- und Teillastbereich untersucht werden.

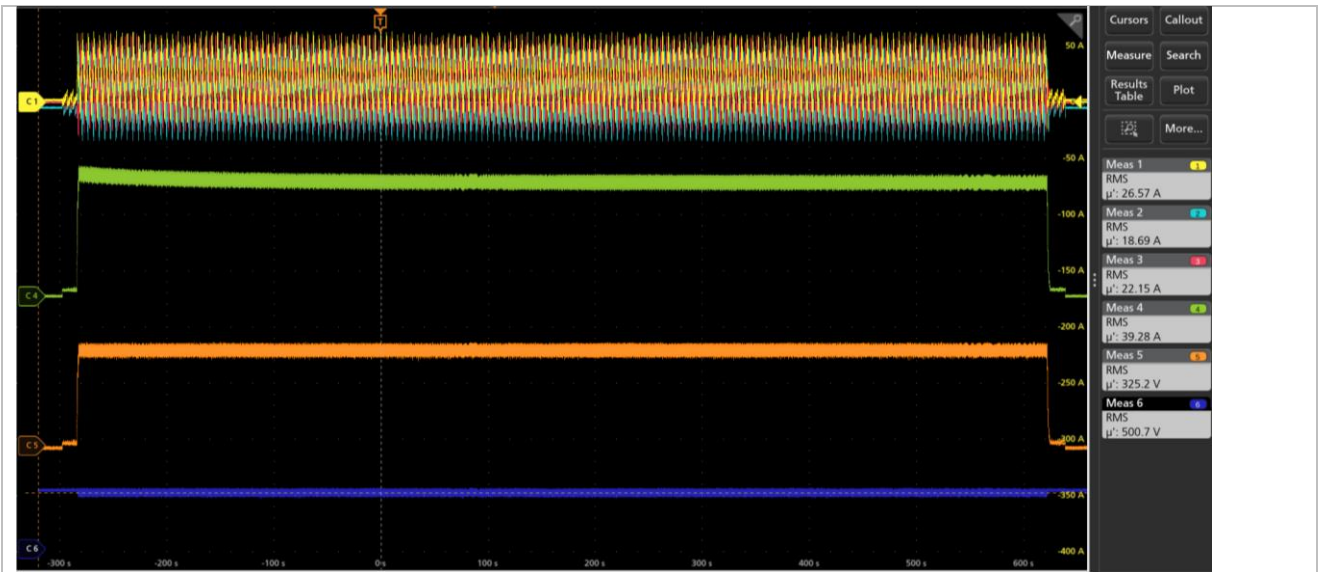


Abbildung 16: Validierung der Regelung

Der vorhandene Versuchsaufbau liegt dabei bereits aus den Arbeiten der vorherigen Berichtszeiträume und Arbeitspakete auch als digitaler Zwilling im Rahmen eines MATLAB/Simulink-Simulationsmodells vor. Das simulativ-erwartete Verhalten konnte ebenfalls vollumfänglich mit dem Aufbau des Prototyps auf dem Versuchsstand bestätigt werden.

3.6 AP-5 Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Komponenten und Subsysteme

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
BCM	Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist die Bewertung der Zuverlässigkeit hinsichtlich der Materialeigenschaften und den Subsystemen im kompakten SiC-Umrichteraufbau in verschiedenen Einsatzumgebungen.
Ergebnis	
Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene statische und dynamische Charakterisierungen der Halbleitermodule mit Hilfe der statischer Prüfvorrichtungen sowie eines Doppelpuls-Prüfstands vorgenommen, wie der folgenden Abbildung 17 gezeigt.	

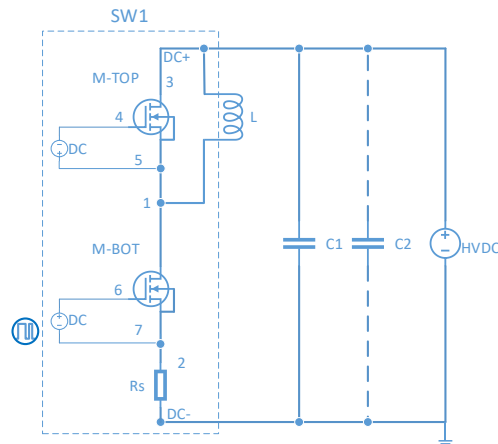


Abbildung 17: Doppelpulsversuchsstand als Ersatzschaltung (links), Prüfstand (rechts)

Im Einzelnen wurden dabei folgende Punkte mit exemplarischen Messergebnissen untersucht:

- Sperrverhalten Durchlassstrom (Sperrspannung)
- Durchlassverhalten MOSFET Strom (Durchlassspannung) für vers. Gate-Source-Spannungen
- Durchlassverhalten Inversdiode Strom (Durchlassspannung) für vers. Gate-Source-Spannungen
- Doppelpulstest: Gatespannung bei DC-Spannung 100-900 V
- Doppelpulstest: Drainstrom bei DC-Spannung 100-900 V
- Doppelpulstest: Drain-Source-Spannung bei DC-Spannung 100-900 V
- Doppelpulstest: Gate-Spannung bei variablem Drainstrom
- Doppelpulstest: Drain-Source-Spannung bei variablem Drainstrom
- Doppelpulstest: Ein-/Ausschaltverhalten zur Bestimmung Streuinduktivität
- Doppelpulstest: Auswertung Ein-/Ausschaltverluste
- Gate-Strom beim Einschalten
- Kurzschluss test für 1-10 μ s und Prüfung der integrierten Kurzschlusserkennung

Basierend auf den Messungen der ersten Entwicklung der Treiber seitens des Projektpartners BREUER wurden zahlreiche Parameter hinsichtlich des Treiberaufbaus untersucht und die Einflussgrößen auf das HF-schaltverhalten identifiziert. Dazu wurden u. a. nachfolgende Parameter messtechnisch im Doppelpulsversuch untersucht:

- Vergleich einer weiteren Treiberschaltung
- Einfluss einer externen Gate-Source Kapazität
- Einfluss eines niederinduktiven Gatewiderstands
- Einfluss eines Snubber Kondensators
- Einfluss einer Suppressor Diode

- Einfluss der Kombination aus Snubber Kondensators und Suppressor Diode

Basierend auf den einzelnen messtechnischen Untersuchungen wurden weitere Messergebnisse abgeleitet und die bestimmten Ersatzparameter in die Modellbildung aller weiteren Modellierungen überführt.

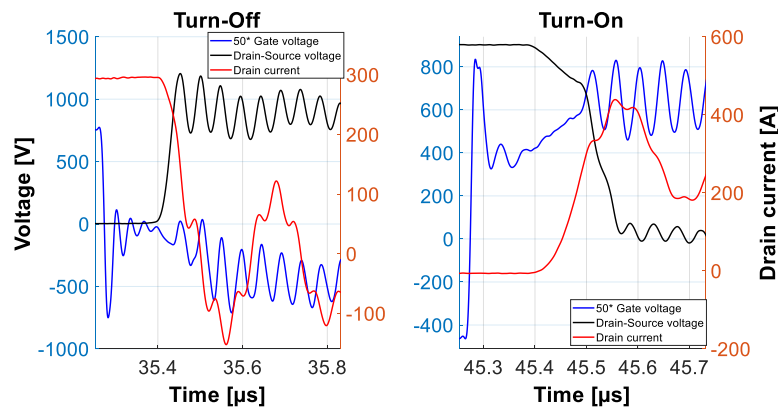


Abbildung 18: Exemplarisches Ergebnis - Ein- und Ausschalten des 300 A Moduls zur Bestimmung der Streuinduktivität

Hinsichtlich der reversiblen Modultests konnten mittels der statischen und dynamischen Charakterisierung der Halbleitermodule die beabsichtigten Referenz- und Initialmessungen abgeschlossen werden.

Zur Bestimmung der Restlebensdauer wird ein entwickeltes Lebensdauermodell verwendet, dass ein thermomechanisches Teilmodell basierend auf dem Coffin-Manson-Modell mit vorgeschaltetem Zyklenzähler sowie ein elektrochemisches Teilmodell basierend auf dem Peck-Modell. Fundamentaler Parameter für beide Teilmodelle ist die Sperrschichttemperatur, die wahlweise aus Messungen ermittelt oder über einen Beobachteransatz bestimmt werden kann. Dominante Einflussgrößen auf das Lebensdauermodell sind die Spannungen, Ströme, Temperatur und die Feuchte. Entscheidend sind zusätzlich die Änderungsraten der genannten Einflussgrößen. Dabei konnte identifiziert werden, dass schnelle Änderungsraten der Ströme und Spannungen, wie sie typischerweise bei SiC-Bauteilen vorkommen, erwartungsgemäß zu höherem Stress führen.

Im Projektverlauf waren anfänglich keine irreversiblen Modultests möglich, da die begrenzte Verfügbarkeit der Halbleitermodule aufgrund der Lieferengpässe dazu geführt hat, dass die verfügbaren Module zunächst für den Aufbau der verschiedenen SiC-Umrichter vorgehalten werden mussten. Mit der Bereitstellung der Umrichter seitens Fa. Breuer an die Projektpartner und die fortschreitende Inbetriebnahme der einzelnen Funktionalitäten stellte sich die Modulverfügbarkeit als wesentlich besser da, sodass zum Ende der Projektlaufzeiten die Testszenarien für die irreversiblen Modultests u.a. hinsichtlich der Temperatur untersucht wurden. Dabei waren Power-Cycling-Tests (Lastwechseltest) vorgesehen. Die Ergebnisse der Lastwechseltest sollten dann in die Lebensdauermodelle überführt und diese für das Condition Monitoring seitens des Projektpartners bereitgestellt werden.

Während der Planung der Teststrategie und weiterer Workshops aller beteiligten Projektpartner musste als Ergebnis festgestellt werden, dass die Anzahl der verfügbaren Module nicht ausreichend ist, um valide Aussagen zur Lebensdauer machen zu können. Grund ist, dass die Kurvenform typischer Lebensdauermodelle, wie in der nachfolgenden Abbildung gezeigt, nicht linear von dem Temperaturhub abhängt. Im Rahmen des Workshops hat sich gezeigt, dass gerade das Spiel der verschiedenen Temperaturhübe für die das Condition-Monitoring von wesentlichem Interesse ist. Zur Aufnahme dieses Verhaltens würden typischerweise minimal 18 Stück, besser jedoch 36 Stück oder mehr Module notwendig sein. Aufgrund der Beschaffungsprobleme zu

Beginn des Projekts stehen jedoch nur 3 bis 5 Module bereit, sodass die statistische Signifikanz aufgrund der Streuung zwischen den einzelnen Modulen schlicht nicht gegeben wäre.

Daher wurde erarbeitet, dass im Projekt zweigleisig gefahren wird: Einerseits wurden bereits am BCM durchgeführte Power-Cycling-Tests auf dessen Adaptionfähigkeit für die Untersuchungen in diesem Projekt geprüft, aufgearbeitet und bereitgestellt. Dabei zeigte sich, dass für sehr ähnliche Einzelchip-Module bereits Untersuchungen durchgeführt wurden und die Ergebnisse in diesem Projekt verwendbar sind. Hierbei handelt es sich nicht um die gleichen Module, jedoch besteht eine relativ hohe Vergleichbarkeit aufgrund der verwendeten Materialien und der Topologie als SiC-MOSFET. Als zweite Strategie wurde herstellerseitige Parameter für die Lebensdauermodelle in Erfahrung gebracht.

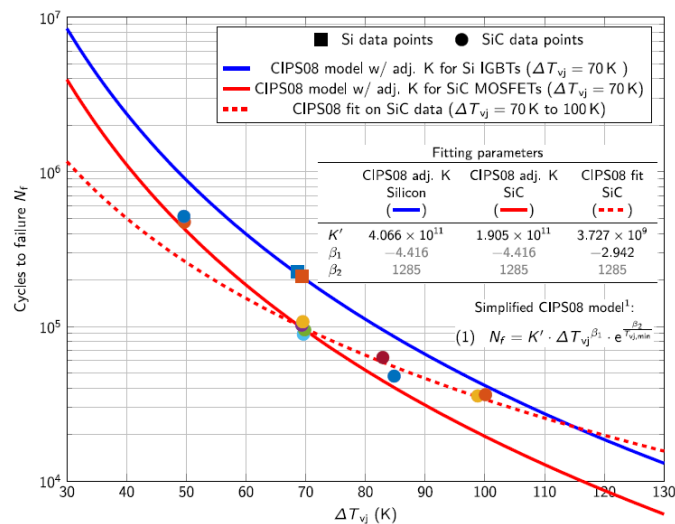


Abbildung 19: Typische Lebensdauerkurve in Abhängigkeit des Temperaturhubs für SiC MOSFET Einzelchip Module als Ergebnis eines zuvor durchgeführten Lastwechseltest am BCM (Quelle: M.Hanf et. al., "Power Cycling Performance of 3.3 kV SiC-MOSFETs and the Impact of the Thermo-Mechanical Stress on Humidity Induced Degradation", Solid State Phenomena, Published by Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2023)

3.7 AP-6 Optimale Betriebsstrategien für SiC-Umrichter in den Anwendungsbereichen

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
IAV GmbH	Ergebnis ist die Überwachung des Belastungszustands der Leistungselektronik in Echtzeit in Verbindung mit neuen, systemtechnisch optimierte Betriebsstrategien, um den Betrieb des SiC-Umrichters im physikalischen Grenzbereich zu ermöglichen und die Degradation der Leistungselektronik zu minimieren.
Ergebnis	
Überwachung des Belastungszustands der Leistungselektronik	

Für die Inbetriebnahme der Funktionen zur Echtzeitmessung der elektrischen Parameter wurde ein Prüfstand für die Schnittstellen- und Softwaretests der Platine aufgebaut. Bei der Inbetriebnahme aufgefallene Fehler wurden anschließend in der Hardware korrigiert.

Der Elektronikbaustein zur Messung der Ausschaltverzögerungszeit wurde so programmiert, dass Zeitmessungen im Bereich von 100 ns bis 600 ns möglich sind. Zur Bewertung der Messgenauigkeit wurden verschiedene Einstellungen des Bausteins miteinander verglichen. Zudem wurde der Einfluss der Gate-Spannung auf die Messgenauigkeit untersucht (siehe folgende Abbildung 20). Dabei stellte sich heraus, dass der Modus 2 für Zeitmessungen im Bereich von 250 ns bis 8 ms eine höhere Genauigkeit aufweist. Eine Erhöhung des Gate-Signals führte ebenfalls zu einer verbesserten Messgenauigkeit.

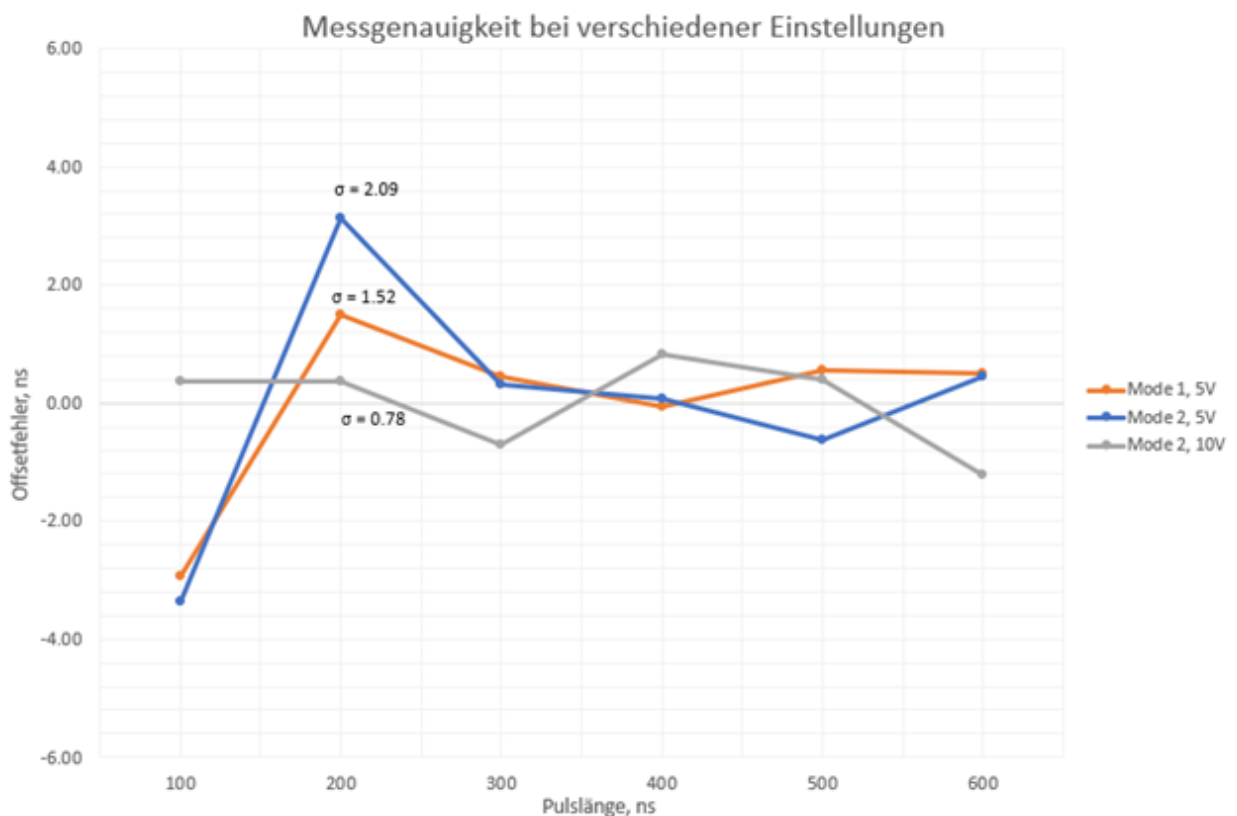


Abbildung 20: Messgenauigkeit der Zeitmessungsschaltung bei verschiedenen Modi und Gate-Spannungen

Belastungsoptimalen Betriebsstrategie

Die Lebensdauer der SiC-Module wird maßgeblich von deren Durchschnittstemperatur und dem Temperaturhub beeinflusst. Daher ist die Regelung bzw. Begrenzung dieser das Ziel der belastungsoptimalen Betriebsstrategie. Das Konzept besteht im Wesentlichen aus

- einer Vorausberechnung/Prädiktion und Regelung der durchschnittlichen Sperrschichttemperatur und des Temperaturhubs für eine Stromperiode am Anfang der Stromperiode,
- Stellgrößen max. Drehmoment (bzw. max. Strom) und Schaltfrequenz.

Hierzu werden folgende Komponenten benötigt:

- Das Prädiktionsmodell der durchschnittlichen Sperrschichttemperatur und des Temperaturhubs für eine Stromperiode

- Berechnung der durchschnittlichen Verlustleistung für eine Stromperiode
- Ein PI-Regler zur Regelung des max. Drehmoments bzw. des max. Stroms
- Ein Schaltalgorithmus zur Anpassung der Schaltfrequenz
- Berechnung der Beschränkungen für die zulässige Schaltfrequenz

Das Konzept ist als Blockschaltbild unten dargestellt.

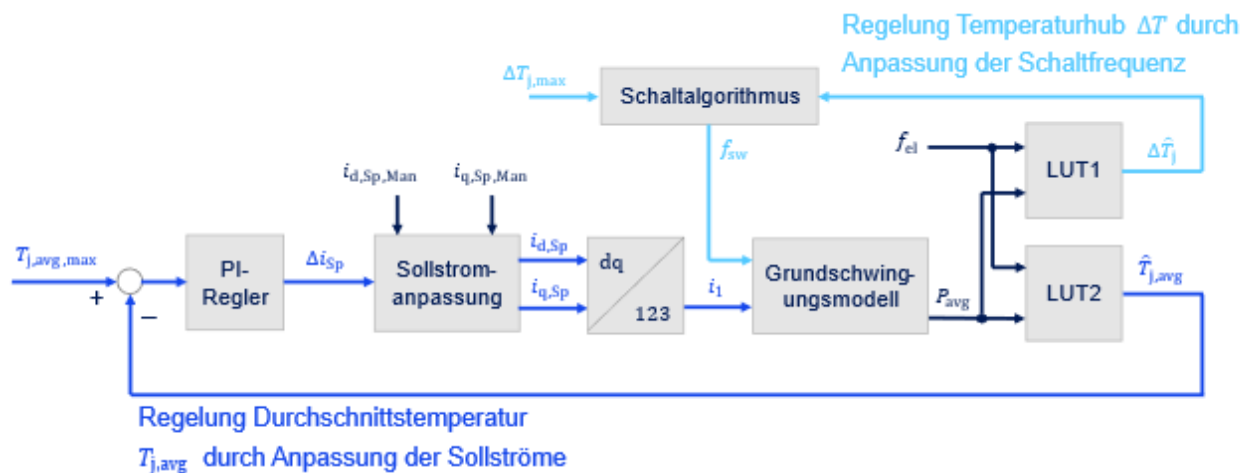
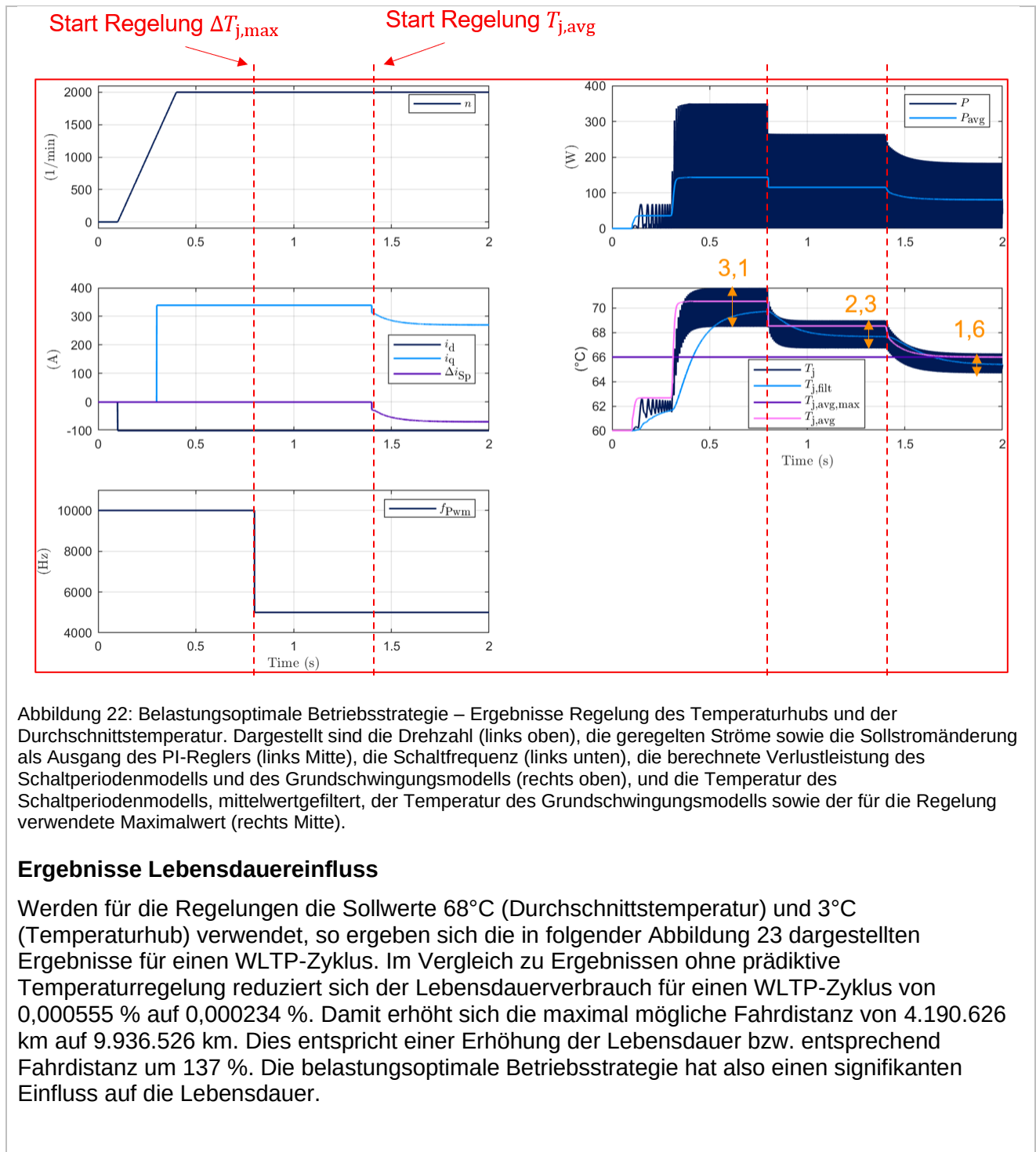
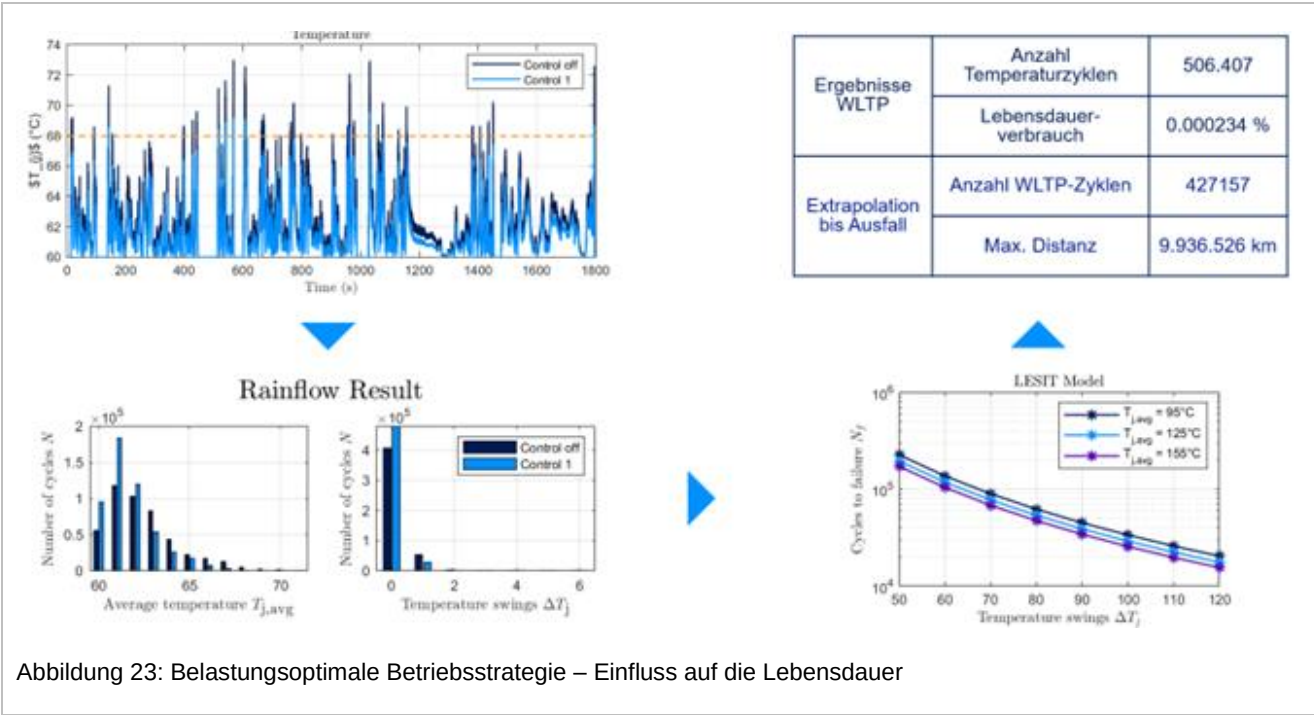


Abbildung 21: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Blockschaltbild

Ergebnisse Temperaturregelung

In der folgenden Abbildung 22 sind Ergebnisse der Temperaturregelung dargestellt. In der betreffenden Simulation wurde zunächst eine Drehzahl von 2000 rpm sowie Sollströme für die d- und q-Achse eingestellt und eingeregelt. Zum Zeitpunkt 0,8 s wurde die Regelung des Temperaturhubs aktiviert, welche zu einer sofortigen Reduktion der Schaltfrequenz führte, sowie einer daraus folgenden Reduktion der Verlustleistung und daraus resultierend einer Reduktion des Temperaturhubs. Zum Zeitpunkt 1,4 s wurde die Regelung der Durchschnittstemperatur aktiviert, wodurch eine Anpassung/Reduktion der Stromsollwerte realisiert wurde, welche wiederum auch zu einer Reduktion der sich einstellenden Verlustleistung und Temperatur führte.





3.8 AP-7 Charakterisierung des HF-Verhaltens von Motor/Drosseln/Batterie

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
BLOCK	Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes sind quantifizierte Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften und der Nutzbarkeit der Materialien zur Realisierung hochkompakter SiC-Umrichter und zur Begrenzung von Störemissionen.
Ergebnis	
Ergebnisse der EMV-Untersuchungen am SiC-Inverter (IAV)	
Im Rahmen der EMV-Messkampagne wurden gezielt die leitungsgebundene Störaussendungen des SiC-Wechselrichters im HV-Bordnetz analysiert. Es zeigte sich, dass die Emissionen erwartungsgemäß mit steigender PWM-Frequenz zunehmen. Auch das anliegende Drehmoment hatte einen Einfluss, wobei dieser schwächer ausgeprägt war. Insbesondere beim Übergang vom Zero-Moment-Clocking zu einem geringen Lastpunkt (60 Nm) änderte sich das Emissionsverhalten deutlich im Bereich um 10 MHz – ein Hinweis auf stromabhängige Effekte.	

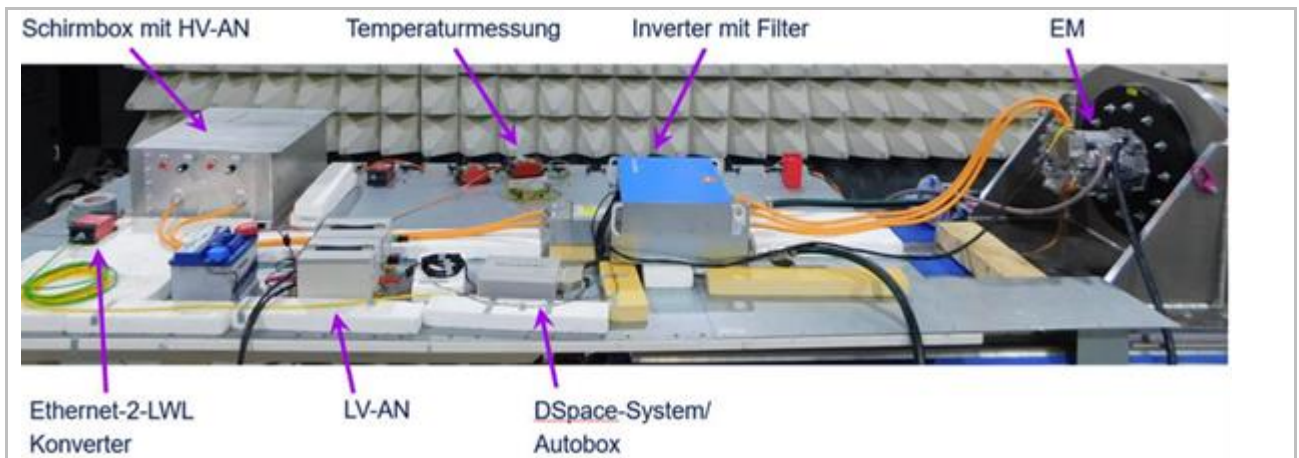


Abbildung 24: Messaufbau im akkreditierten EMV-Labor

Bei der Untersuchung verschiedener Ringbandkernkombinationen (RBK) wurde festgestellt, dass Kerne mit niedriger Permeabilität („LowPerm“) höhere Emissionen verursachen. Unterschiede zwischen normal- und hochpermeablen Kernen führten hingegen kaum zu messbaren Effekten, was möglicherweise auf magnetische Sättigung zurückzuführen ist. Oberhalb von 2 MHz verliert die RBK-Auswahl zunehmend an Bedeutung, was auf alternative Störausbreitungspfade im Aufbau hinweist.

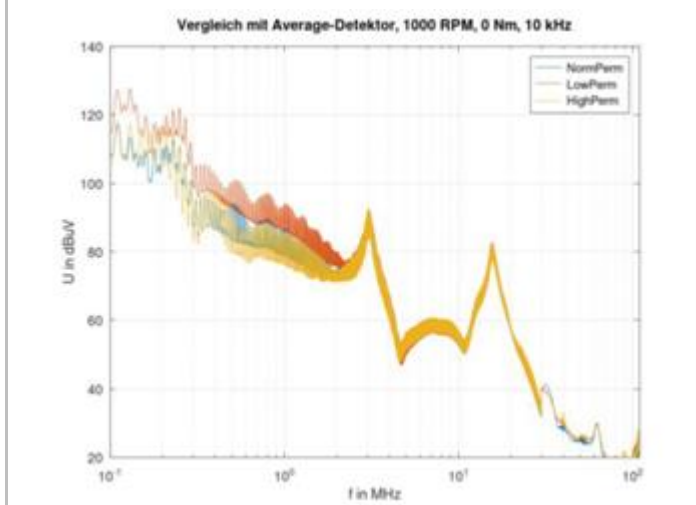
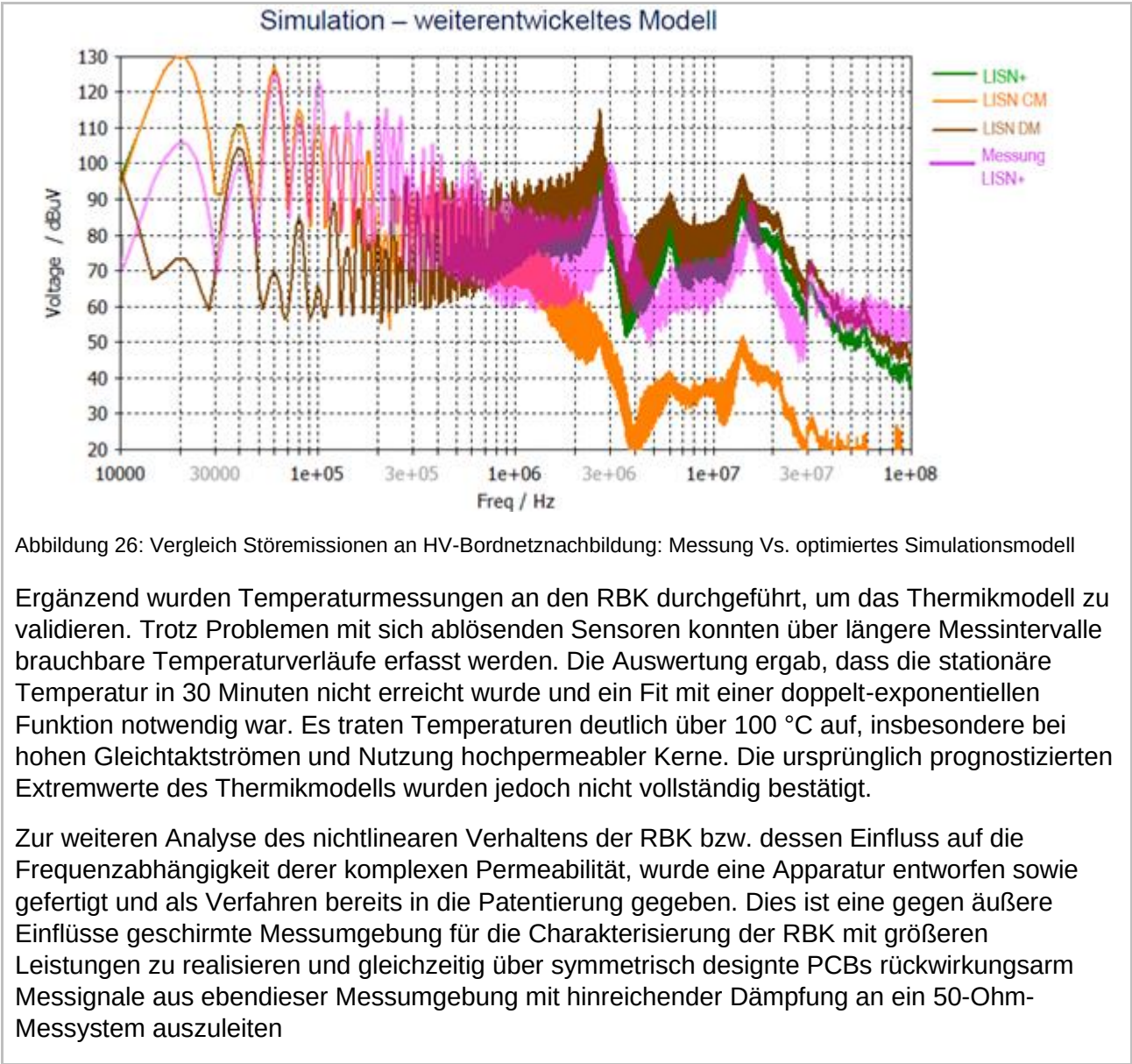


Abbildung 25: Abhängigkeit von RBK-Setup

Die Validierung des Simulationsmodells zeigte, dass mit dem initialen Modell eine Übereinstimmung mit den Messdaten nur bis etwa 2 MHz gegeben war. Nach Anpassung des Modells konnte jedoch eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Frequenzbereich erzielt werden. Somit gilt das Modell als geeignet zur Vorhersage des EMV-Verhaltens.



3.9 AP-8 Systemoptimierung für Antriebsstrang und Batterieladesystem

AP-Leitung	Meilenstein nach GVB
FREQCON	Meilenstein 3 „TRL-6 und TRL-7 SiC-Umrichterbetrieb wurden erfolgreich getestet“
Ergebnis	
Motormodus - Antriebsumrichter (IAV) Für die Inbetriebnahme des Prototyps (erste Inbetriebnahme und den sicheren Betrieb am Prüfstand, Funktionen zum Bauteilschutz, Derating-Funktionen, etc.) wurde zunächst eine Integrationssoftware mit allen relevanten Softwarekomponenten erstellt. Unter anderem wurde ein Fehlermanagement und Derating entwickelt und an die im Prototyp vorhanden Sensoren und	

Signale angepasst. Diese Schutzfunktionen waren für den Prototyp von besonderer Bedeutung, um einen sicheren Betrieb am Prüfstand zu ermöglichen und eine Beschädigung zu verhindern.

Um

- eine Überlastung und Schädigung des Wechselrichters aufgrund zu hoher Sperrschichttemperaturen der SiC-Module zu verhindern und
- den Wechselrichter optimal auszunutzen

War eine möglichst genaue Berechnung der internen Temperaturen der SiC-Module erforderlich. Hierzu wurde ein entsprechendes Temperaturmodell entwickelt. Ein wesentlicher Punkt hierfür war die genaue Berechnung der elektrischen Verluste im Halbleiter.

Ein weiterer Fokus wurde auf die Modulationsverfahren für den Wechselrichter gelegt. Es wurden verschiedene Verfahren implementiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Für eine effiziente Ansteuerung des Prototyps hat sich daraus eine Kombination von *space vector pulse width modulation* (SVPWM) und *discontinuous pulse width modulation* (DPWM) als zielführend erwiesen.

Für den Test des Umrichters am Prüfstand wurde eine Adapterwelle gefertigt, um den angeschafften E-Motor an den Prüfstand anzubinden. Dazu wurde eine Konstruktionszeichnung der Welle angefertigt und die Welle über einen Lieferanten angefertigt. In folgender Abbildung 27 ist der Wechselrichter-Prototyp mitsamt E-Motor am Prüfstand abgebildet.

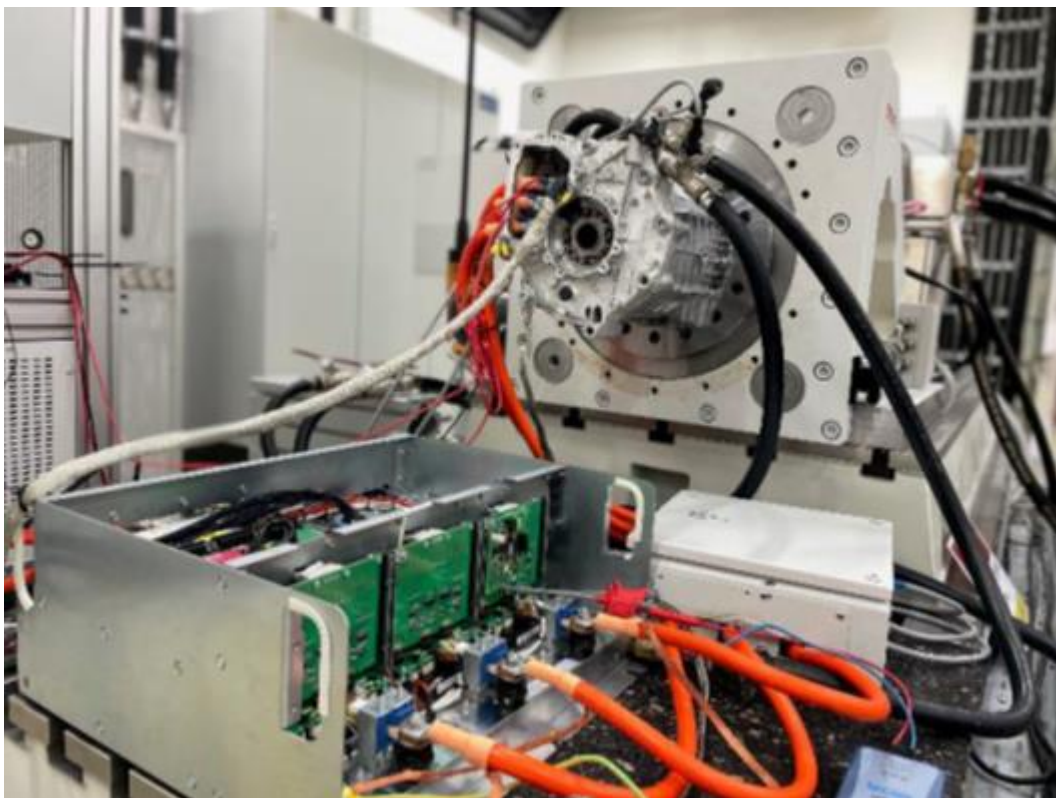


Abbildung 27: Wechselrichter-Prototyp und E-Motor am Prüfstand

Für die Inbetriebnahme des Prototyps am Prüfstand erfolgte zunächst ein Schnittstellentest der integrierten Software und eine Kalibrierung der Sensoren. Anschließend wurden die implementierten Überwachungsfunktionen und Fehlerabschaltungen getestet, um eine ungewollte Zerstörung des Prototyps zu verhindern. Anschließend wurde die Regelung in Betrieb genommen. Dafür wurde zunächst der Offsetwinkel des Rotorlagegebers ermittelt und anschließend die

elektrischen Parameter der Maschine bestimmt. Die Stromregler wurden parametrisiert und in verschiedenen Arbeitspunkten getestet.

Nach der Inbetriebnahme wurden verschiedene Tests am Prototyp durchgeführt. Um die Ansteuerung zu optimieren, wurden verschiedene stationäre Arbeitspunkte eingestellt, um damit die Parameter der elektrischen Maschine zu verbessern. Parallel hierzu wurden auch die Signale der Prüfstandsautomatisierung aufgezeichnet (z.B. mechanische und elektrische Leistung). Weiterhin wurden Temperaturen des Umrichters mitgemessen und überwacht. Zum Abschluss wurden die Verlustleistungs- und Temperaturmodelle für die Leistungsmodule implementiert und getestet.

Lademodus - Ladeumrichter (FREQCON)

Aufgrund der Verzögerung der vorherigen Arbeitspakete wurde sich in diesem Arbeitspaket auf den wesentlichen Kern fokussiert. Dazu wurde jeweils ein SiC-Umrichter mit den bei Breuer und Freqcon vorhandenen AFEs kombiniert und erfolgreich in Betrieb genommen. In Abbildung 28 ist Testaufbau für den SiC-Antriebsumrichter bei Breuer gezeigt, welcher mit einem 350 kW Prüfstand getestet worden ist. Dafür wurde eine Netzdrossel von 22µH verwendet, die Zwischenkreisspannung ist auf 1000 V eingestellt worden.

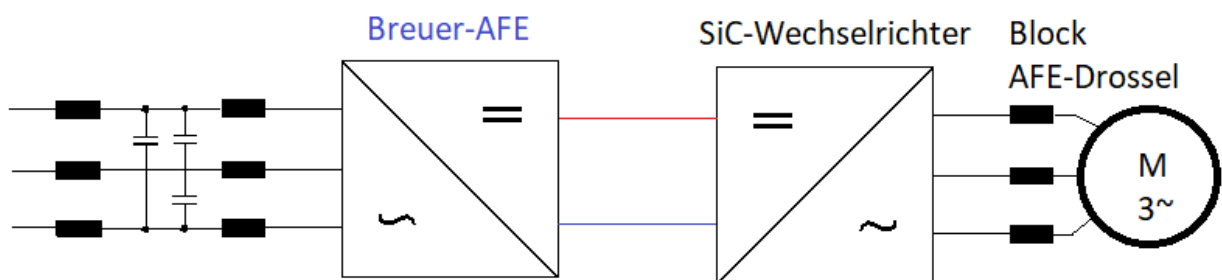
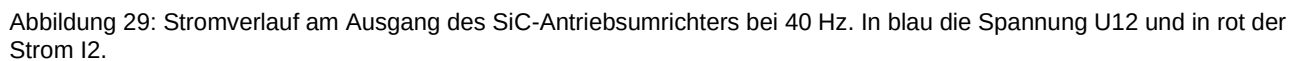


Abbildung 28: Schematische Darstellung Testaufbau SiC Antrieb. Der 4Q-Motorwechselrichter wurde über die Block-AFE-Drosseln an einen 350kW-Motor angeschlossen.

Als Beispiel für das Verhalten des SiC-Antriebsumrichters ist in Abbildung 29 der Stromverlauf am Ausgang für 40 Hz dargestellt.



Der Testaufbau für das Ladesystem, welches bei Freqcon getestet worden ist, ist in Abbildung 30 gezeigt. Um eine mögliche Beschädigung eines KFZs zu vermeiden sowie mögliche Probleme bei der Kommunikation mit dem Fahrzeug zu verhindern, ist der Test mit Batterieschränken von Freqcon (LFP-Zellen) durchgeführt worden. Um hohe Ladeleistungen zu erreichen und den Netzanschluss möglichst wenig zu belasten, wurde der Zwischenkreis von einem DC-Steller gestützt, welcher dafür Energie aus einem zweiten Batterieschrank bezieht.



Für die Ladetests wurden zwei Szenarien betrachtet, einmal mit möglichst hoher Leistung schnellladen und einmal mit hoher Leistung starten und anschließend länger mit mittlerer Leistung laden. Für beide Szenarien wurde von einem 800V-System ausgegangen mit einer Batteriekapazität in der Größenordnung von 100 kWh. In Abbildung 31 ist der Verlauf von Spannung und Strom für das Schnellladen dargestellt und in Abbildung 32 der langsamere Ladevorgang.

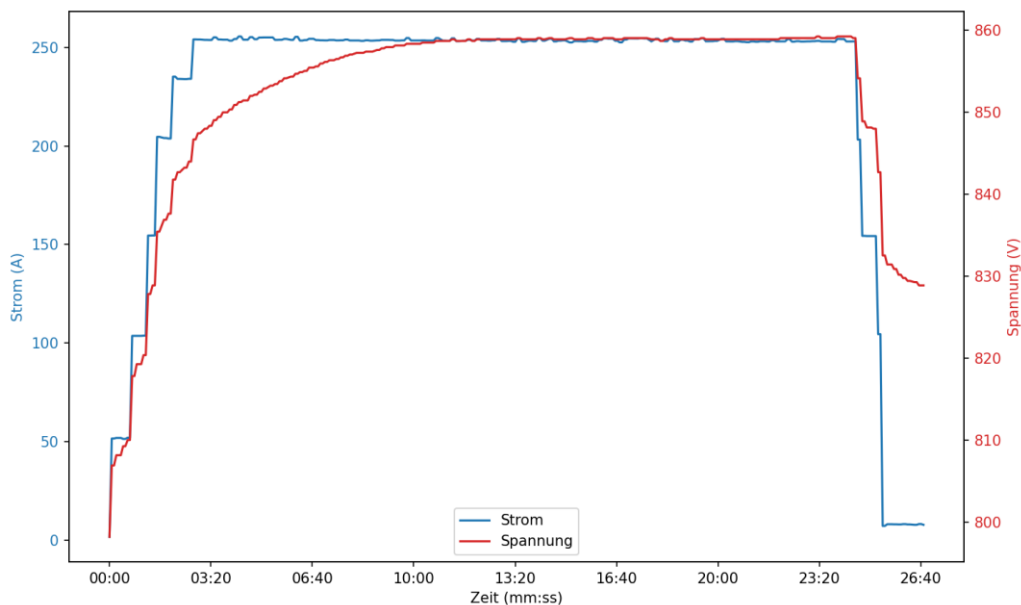


Abbildung 31: Strom- und Spannungsverlauf bei Schnellladevorgang mit SiC-Umrichter mit etwa 250 A.

Das Kühlsystem des SiC-Umrichters im Testaufbau für das Ladesystem ist an das Kühlsystem des AFE angeschlossen. In diesem Kühlsystem konnte während des Tests keine relevante Erhöhung der Temperatur beobachtet werden, die Temperatur lag bei etwa 31 °C.

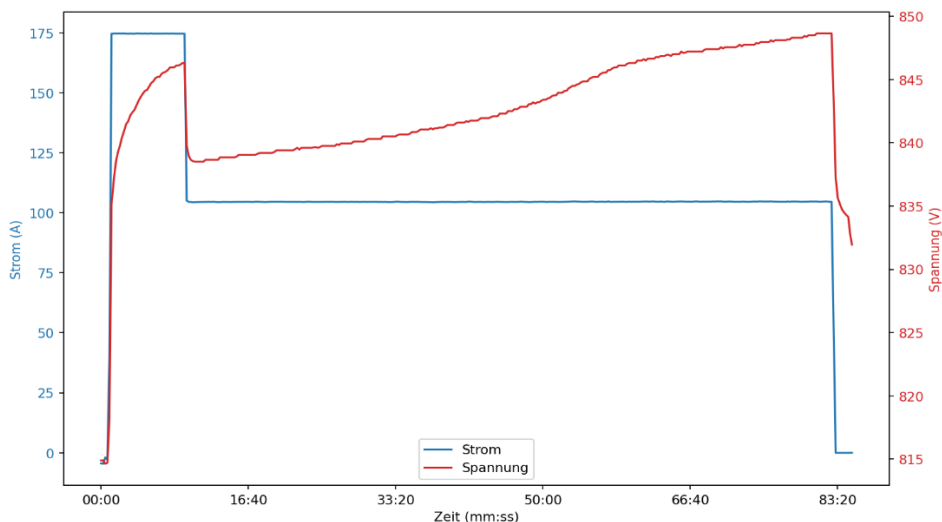


Abbildung 32: Strom- und Spannungsverlauf bei Ladevorgang mit SiC-Umrichter. 10 min mit etwa 170 A und 70 min mit etwa 100 A.

Für das Schnellade-Szenario wurde mit einer Leistung von 217 kW über einen Zeitraum von ca. 25 min geladen womit in dieser Zeit etwa 86 kWh geladen worden sind. Im zweiten Szenario ist 10

min lang mit 147 kW und anschließend ca. 70 mit 80 kW geladen worden, womit über den gesamten Zeitraum etwa 128 kWh an Energie geladen worden sind.

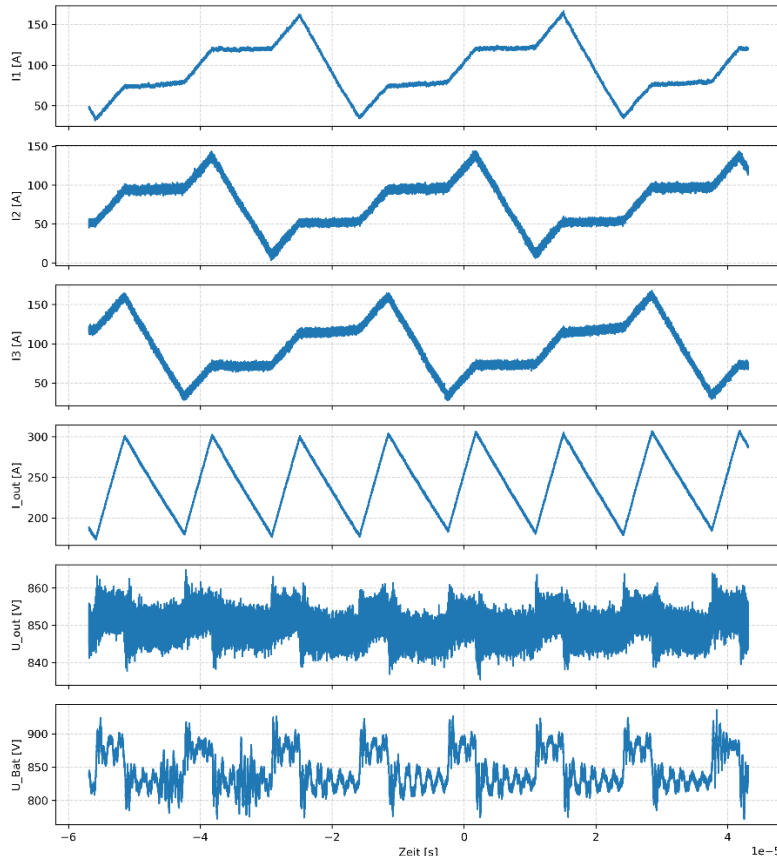


Abbildung 33: Strom und Spannung vom SiC-Umrichter als DC-Steller im Ladesystem während mit 250 A geladen wird. Der Strom wird dabei vor und hinter der Drossel gemessen.

Der Verlauf von Strom und Spannung auf der Zeitskala der Schaltfrequenz des SiC-Umrichters während des Ladevorgangs mit 250 A ist in Abbildung 33 dargestellt. Bei Betrachtung des Stroms der einzelnen Phasen I_1 - I_3 , welcher vor der Drossel gemessen wird, liegt bei einem Mittelwert von knapp 100 A ein Delta von etwa 120 A vor. Die Messung des Stroms I_{out} nach der Drossel zeigt einen relativ zum Mittelwert betrachtet deutliche reduzierte Stromwelligkeit von etwa $\Delta I = 50 \%$. Im Rahmen des Tests konnten keine negativen Auswirkungen auf die Kommunikation oder die Batterien beobachtet werden. Dieser Aspekt sollte jedoch bei weiteren Tests in Verbindung mit Fahrzeugbatterien beachtet werden, ebenso wie die Welligkeit der Spannung, welche für die Batterie ebenfalls relevant ist. Eine Reduzierung der Welligkeit des Stroms und damit auch der Spannung könnte entweder durch eine größere Induktivität der Spule oder durch eine höhere Schaltfrequenz der SiC-Umrichter erreicht werden.

Zusammengefasst wurden in diesem Arbeitspaket erfolgreich die SiC-Umrichter als Antriebsumrichter bei Breuer (Motormodus TRL-6) und als Ladesystem bei Freqcon (Batteriemo-
dus TRL-7) getestet.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

IAV: Durch enge Zusammenarbeit mit dem Konsortium entwickelte IAV innovative Lösungen und trug aktiv zur Gestaltung der Elektromobilität bei. Das Projekt SiC-Mobil stärkt die Marktstellung von

IAV und erweitert die Kompetenz in den Bereichen SiC-Antriebsumrichter und Lademanagement. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in interdisziplinäre Projekte ein und fördern die Entwicklung hocheffizienter Leistungselektronik. IAV wird die Zustandsüberwachung und Systemauslegung von SiC-Umrichtern weiter verbessern und die Lösungen dem Markt zugänglich machen.

Im Zuge der Bearbeitung des Projekts SiC-Mobil wurde die in AP3.7 beschriebene Fixture zur Vermessung von Ringbandkernen entwickelt, aufgebaut, genutzt und darüber hinaus zum Patent angemeldet. Das Patent wurde am 27.03.2025 erteilt und ist unter der Bezeichnung DE 10 2024 108 103 B3 einsehbar. Innerhalb der Patentschrift sind Aufbau und Nutzung der Fixture entsprechend beschrieben.

Breuer: Die Ergebnisse dieses Projektes sollen in die zukünftige Umrichtertechnologie von Breuer-Motoren einfließen. Die erzielten Eigenschaften der für Breuer neuen Technologie der SiC-Halbleiter sind sehr vielversprechend, allerdings auch herausfordernd. Es gilt hier die EMV und die Isolationsfestigkeit der angeschlossenen passiven Bauelemente (Drosseln, Filter) und der Motoren zu berücksichtigen.

Bei Breuer sollen neue Frequenzumrichter mit SiC-Halbleiter entwickelt werden. Hier sollen auch die Ergebnisse der Lebensdauermodelle mit einbezogen werden.

Freqcon: Die gewonnene Erfahrung mit SiC-Umrichtern im Rahmen dieses Projektes fließt in die Entwicklung für Powerstacks auf SiC Basis, welche es erlauben auf gleichem Bauraum deutliche höhere Leistungen zu erzielen. Eine unmittelbare Verwertung der SiC Module aus diesem Projekt ist nicht geplant.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde seitens des Projektpartners IAV eine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen. Weitere Patente oder Schutzrechtsanmeldungen sind nicht erfolgt.

BCM: Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende haben sich gegenüber dem Projektantrag bzw. der Vorhabenbeschreibung nicht geändert. Zusammen mit allen Partnern wurde unter der Führung von IAV ein Logo entwickelt und der Internetauftritt vorbereitet, um das Vorhaben und die Projektarbeiten der Öffentlichkeit zu präsentieren (www.sic-mobil.de). Ziel ist die konkrete Nachfrage nach wissenschaftlicher Dienstleistung von Interessenten aus der Wirtschaft.

Die wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten nach Projektende haben sich gegenüber dem Projektantrag bzw. der Vorhabenbeschreibung nicht geändert.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit gleicht weiterhin der im Projektantrag bzw. in der Vorhabenbeschreibung beschriebenen Prognose. Fortlaufend werden die Projekterkenntnisse am BCM in die Lehre, Laborübungen und bei der Vergabe von Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten an der Universität integriert und vermitteln somit den Studierenden industriennahe Erfahrungen. Aktuell sind hierzu mehrere Bachelorarbeiten und Masterprojekte durch Studierende bereits in der Bearbeitung.

Im Rahmen des Projekts konnte zusammen mit dem Projektpartner IAV die externe Masterarbeit von Herrn D. Schneidewind mit dem Thema „Entwicklung einer belastungsoptimalen Betriebsstrategie für Traktionswechselrichter“ erfolgreich abgeschlossen werden.

Gemeinsam mit dem Projektpartner BREUER wurde ein Messeauftritt auf der productronica vom 14. bis 17.11.2023 in München zur Präsentation des Projekts und der Kompetenzen im Bereich von SiC in Zusammenarbeit mit den Fachverband VDMA erfolgreich durchgeführt. Es konnten zahlreiche Gespräche und Anknüpfungspunkte mit Industrieunternehmen und Messebesuchern geführt werden.

Wissenschaftlich wurde der Aspekt der Modellierung der Hochfrequenzeffekte in einer Veröffentlichung auf der Internationalen Konferenz für elektrische Maschinen (ICEM24) in Turin verwertet (siehe weiter unten).

Im Rahmen des Konsortiums wurde das Interesse der Projektpartner diskutiert, um die weitere Verwertung der bisherigen Ergebnisse in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu erarbeiten. Das BCM, IAV und BREUER sind gegenwärtig in Gesprächen zu einem derartigen Anschlussprojekt. Dazu findet seit Dezember 2024 ein regelmäßiger Austausch unter den Projektpartnern statt.

Block: Die gesammelten Erfahrungen umfassen die Auslegung, Simulation, Dimensionierung und Fertigung von Wickelgütern für moderne leistungselektronische Schaltungen. Diese Kompetenzen sind bereits heute und werden auch künftig essenzielle Bestandteile des Geschäftsmodells der Firma BLOCK sein. BLOCK versteht sich nicht nur als Komponentenhersteller, sondern ebenso als Dienstleister zur Entwicklung optimaler Systemlösungen – ein Anspruch, der umfassende Fachkenntnisse voraussetzt.

Im Rahmen dieses Projekts konnte das bestehende Know-how gezielt erweitert werden, was dazu beitragen wird, zukünftige kundenspezifische Entwicklungen noch effizienter und wirkungsvoller umzusetzen. Die gewonnenen Erkenntnisse resultieren maßgeblich aus der Arbeit an AFE-Drosseln sowie an der gekoppelten TSS-Drossel. Diese basieren auf aufschlussreichen Untersuchungen zu Materialeigenschaften, thermischem Verhalten und magnetischer Kopplung.

Darüber hinaus wurde mit dem neu entwickelten Kalorimeter eine innovative Messeinrichtung geschaffen, mit der sich die Verlustleistung induktiver Wickelgüter präzise und reproduzierbar bestimmen lässt – selbst bei weiter steigenden Schaltfrequenzen moderner Halbleiter auf Basis von SiC oder GaN.

5 Öffentlichkeitsarbeit (Konferenzen, Messen und Publikationen)

Zur Außenkommunikation und Projekttransparenz wurde gleich zu Beginn des Projektes eine Projektwebsite (<https://sic-mobil.de>) erstellt und kontinuierlich gepflegt. Sie diente in erster Linie als Informationsplattform für die Öffentlichkeit.

Das Projektmanagement hat sämtliche Berichte gemäß den Vorgaben des Fördergebers fristgerecht erstellt. Dazu zählten Zwischenberichte und Finanzübersichten sowie Dokumentationen zu einzelnen Entwicklungen. Ergänzend erfolgten die Erstellung und Aufbereitung von Visualisierungen, Präsentationen und begleitenden Kommunikationsmaterialien, die sowohl für interne Zwecke als auch für Vorträge, Messen und Veröffentlichungen genutzt wurden.

Messen:

- 10/2021 – Präsentation des Projektes bei AUDI
- 03/2023 – ATZ MTZ Zukunftsantriebe, Bremen
- 04/2023 – Bremer Mechatroniktag, ILAB, Bremen
- 11/2023 – Messe productronica, München
- 04/2024 – Hannover Messe, Stand Block
- 06/2024 – PCIM Nürnberg

Publikationen:

N. Korshunov, T. Orlik, M. Maiworm and H. Rabba, "Potentials of Condition Monitoring for Automotive SiC Traction Inverters," PCIM Europe 2023; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1-7, doi: 10.30420/566091130.

Orlik, T., Maiworm, M., Lindner, M., Danzer, C., Rabba, H., Schultalbers, M. (2025). System Optimization of SiC Inverters Regarding Efficiency, Cost and Reliability. In: Heintzel, A. (eds) Antriebe und Energiesysteme von morgen 2023. ATZLive23 2023. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-46551-3_8

J. Ulbrich, W. Holzke and A. Ebrahimi, "A Method for Modelling High Frequency Effects in Electrical Machine Windings for the Use in Circuit Simulation Programmes," *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Torino, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700371.

11/2021 – Pressemitteilung zum Start des Projektes

LinkedIn Posts im Verlauf des Projektes bspw. von Konferenzen oder Messen