

# **SiC-Mobil**

**FKZ: 19I21024A**



**Abschlussbericht per 28.02.2025**



---

ZE:

(individuelles Partnerlogo)

Partnername



---

**Vorhabenbezeichnung:**

**SiC-Mobil**

**Teilprojekt:**

SiC-Drive. Steuerung, Systemdaten, Schaltungsintegration

---

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.09.2021 bis 28.02.2025

---

**Impressum:**

© 2025 Dr. Alexander Hoffmann  
und Verkehr

IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto

---

---

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 einfügen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Kurzdarstellung.....</b>	<b>7</b>
1	Aufgabenstellung .....	7
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	8
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	11
4.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden .....	11
4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	11
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
<b>II</b>	<b>Eingehende Darstellung .....</b>	<b>13</b>
1	Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen .....	13
1.1	AP 0 Projektmanagement.....	13
1.2	AP 1 Definition der Leistungsmerkmale, Konzepterstellung und Spezifikation ....	14
1.3	AP 2 Applikationsentwicklung, Aufbau SiC-Frequenzumrichter.....	17
1.4	AP 3 Entwicklung kompakter, modularer Aufbau- / Einbaukonzepte .....	24
1.5	AP 4 Entwicklung und Aufbau einer Belastungsanlage zur Nachbildung der Betriebszustände .....	31
1.6	AP 5 Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Komponenten und Subsysteme.....	31
1.7	AP 6 Optimale Betriebsstrategien für SiC-Umrichter in den Anwendungsbereichen .....	34
1.8	AP 7 Charakterisierung des HF-Verhaltens von Motor/Drosseln/Batterie.....	47
1.9	AP 8 Systemoptimierung für Antriebsstrang und Batterieladesystem.....	53
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	60
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	61
4	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	61
5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	62
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	62
<b>III</b>	<b>Erfolgskontrollbericht.....</b>	<b>63</b>
1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen .....	63
2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens .....	63
3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	67
4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	67



5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer .....	67
6	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung .....	68
7	Technische Anlagen.....	69
<b>IV</b>	<b>Berichtsblätter.....</b>	<b>70</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Projektschwerpunkte der Partner .....	8
Abbildung 2:	Projektphasen.....	9
Abbildung 3:	Balkenplan des Projekts .....	10
Abbildung 4:	Modulare Systemarchitektur mit Active Front End, DC-DC Wandler und Antriebsumrichter .....	16
Abbildung 5:	Konzept zur Bestimmung der Alterung.....	17
Abbildung 6:	Schaltungssimulation der Ausschaltverzögerungszeit.....	18
Abbildung 7:	Blockdiagramm der Hardware-Baugruppen.....	19
Abbildung 8:	Validierungsfälle Doppelpulstest, Schwarz = Messung, Rot = Simulation mit finalem Modell der Schaltzelle .....	20
Abbildung 9:	3D-Simulationsmodell Busbars + Gehäuse + Zwischenkreiskondensator.....	21
Abbildung 10:	3D-View der Platine für die Zustandsüberwachung.....	22
Abbildung 11:	Top-Level der Systemsimulation.....	23
Abbildung 12:	Integrationssoftware mit allen Softwaremodulen .....	23
Abbildung 13:	CAD-Modell des finalen Filter-Designs .....	25
Abbildung 14:	Erste Version des Simulationsmodells in SPICE.....	26
Abbildung 15:	Verbessertes Simulationsmodell in CST-Studio.....	26
Abbildung 16:	Temperaturverteilung in Ringbandkernen des EMV-Filters bei Worst Case Betrieb...	27
Abbildung 17:	Entwickelte Fixture zur RBK-Vermessung mit bestücktem Ringbandkern.....	27
Abbildung 18:	Schematischer Messaufbau mit Fixture (links) und verzerrte Quellspannung bei starker Sättigung (rechts).....	28
Abbildung 19:	Temperaturverlauf im Simulationsmodell des Kerns und Angabe Messpunkte .....	28
Abbildung 20:	Vergleich gemessener und simulierter Temperaturverläufe am Ringbandkern .....	29
Abbildung 21:	Vergleich Messung und Simulation zur Validierung Modellansatz bei geringer sowie deutlicher Sättigung.....	30
Abbildung 22:	Schirmung Inverterfront (links) und -rückseite mitsamt HVAC-Kabeln und E-Motor-Blende (rechts).....	30
Abbildung 23:	Wirkkette Lebensdauersimulation .....	32
Abbildung 24:	WLTP-Zyklus. Quelle: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedure#">https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedure#</a> .....	32

Abbildung 25: Resultierende Temperaturverläufe, Rainflow-Analyse, verbrauchte Lebensdauer .....	33
Abbildung 26: LESIT Lebensdauermodell für Leistungshalbleiter .....	33
Abbildung 27: LESIT Lebensdauermodell mit Stützstellen (Rot).....	34
Abbildung 28: Auszug aus der Signalliste. Analogeingänge der Inverter. ....	34
Abbildung 29: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Blockschaltbild.....	35
Abbildung 30: Vergleich Grundswingungsmodell mit Schaltperiodenmodell: Verlustleistung des Grundswingungsmodells ( $P_{avg}$ ), Verlustleistung des Schaltperiodenmodells ( $P$ ) und gefiltert ( $P_{filt}$ ) .....	37
Abbildung 31: Simulation zur Generierung des Temperaturprädiktionsmodell .....	38
Abbildung 32: Lookup-Tabellen der prädiktiven Temperaturen.....	38
Abbildung 33: Simulation zur Berechnung des DC-Spannungsrippels.....	40
Abbildung 34: Ergebnisse minimale Schaltfrequenz für verschiedene Phasenströme .....	40
Abbildung 35: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Ergebnisse Regelung des Temperaturhubs $\Delta T_j$ und der Durchschnittstemperatur $\Delta T_{j, avg}$ . Dargestellt sind die Drehzahl $n$ (links oben), die geregelten Ströme $i_d$ , $i_q$ sowie die Sollstromänderung $\Delta i_{Sp}$ als Ausgang des PI-Reglers (links Mitte), die Schaltfrequenz $f_{Pwm}$ (links unten), die berechnete Verlustleistung des Schaltperiodenmodells $P$ und des Grundswingungsmodells $P_{avg}$ (rechts oben), und die Temperatur $T_j$ des Schaltperiodenmodells, mittelwertgefiltert $T_{j, filt}$ , der Temperatur $T_{j, avg}$ des Grundswingungsmodells sowie der für die Regelung verwendete Maximalwert $T_{j, avg, max}$ (rechts Mitte). .....	41
Abbildung 36: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Einfluss auf die Lebensdauer.....	42
Abbildung 37: Adapterwelle zur Prüfstandsanzbindung.....	43
Abbildung 38: Wechselrichter-Prototyp und E-Motor am Prüfstand .....	43
Abbildung 39: Darstellung relevanter Signale der Stromregelung.....	44
Abbildung 40: Berechnete Verlustleistungen und Temperaturen der SiC-MOSFET-Sperrschichten. ....	45
Abbildung 41: Geloggte Signale des Prüfstands.....	45
Abbildung 42: Schnittstellen-Test für die Zustandsüberwachung.....	46
Abbildung 43: Messgenauigkeit der Zeitmessungsschaltung bei verschiedenen Modi und Gate-Spannungen.....	47
Abbildung 44: Messaufbau im akkreditierten EMV-Labor .....	48
Abbildung 45: Untersuchte Ringbandkernkombinationen (links) und Arbeitspunkte (rechts) der EMV-Messkampagne.....	49
Abbildung 46: Abhängigkeit leitungsgeführte HV-Emissionen von PWM-Frequenz und Drehmoment .....	50
Abbildung 47: Abhängigkeit von RBK-Setup.....	50
Abbildung 48: Betrag der Impedanz aller Ringbandkernvarianten [Darstellung als impedanzproportionale Spannung].....	51
Abbildung 49: Vergleich Messung und Netzwerksimulation Leistungspfad bei unterschiedlichen PWM-Frequenzen .....	51



Abbildung 50: Vergleich Störemissionen an HV-Bordnetznachbildung: Messung Vs. optimiertes Simulationsmodell .....	52
Abbildung 51: EMV-Filter mit ausgeführten Signalleitungen (links) und Befestigung PT1000-Glieder im Filter (rechts) .....	52
Abbildung 52: Gemessener (links) und erwarteter Temperaturverlauf auf Basis des Fittings (rechts)	53
Abbildung 53: Simulink-Software für das Condition-Monitoring .....	54
Abbildung 54: Bedienoberfläche für den Test der Messplatine .....	55
Abbildung 55: Sicherheitskonzept des Prüfstands .....	56
Abbildung 56: Prüfstandaufbau für das Condition-Monitoring .....	56
Abbildung 57: Vollintegrierte Messplatine .....	57
Abbildung 58: Messungen des Condition-Monitorings am Prüfstand .....	57
Abbildung 59: Messung der Ausschaltverzögerungszeit mithilfe der Messplatine .....	58
Abbildung 60: Messung der Ausschaltverzögerungszeit bei 600 V .....	59
Abbildung 61: Messung der Durchlassspannung .....	59
Abbildung 62: Bestimmtheitsmaß der Messung der Durchlassspannung .....	60

# I Kurzdarstellung

## 1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes SiC-Mobil war es, Traktionsantriebe und Ladesysteme von Elektrofahrzeugen kleiner, leichter und effizienter zu machen. 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 den bisher 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 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Spätsommer 2020 begannen die Vorbereitungen für die Erstellung der Projektskizze für das Forschungsprojekt „Hocheffiziente elektrische Antriebe mit SiC-Umrichtern“. Die fünf Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft formulierten ihre Entwicklungsaufgaben wie folgt:

- Aufbau eines SiC-Demonstrationsumrichters
- Erforschung neuer Technologien zur Steigerung der Leistungsdichte
- Charakterisierung der wesentlichen Lebensdauer-Einflüsse von E-Maschine und Wechselrichter im Systemverbund
- Optimierung des Hochfrequenzverhaltens des E-Antriebs und Untersuchung der Wechselwirkungen zu den anderen Komponenten.
  - Ansteuerstrategien für einen Betrieb bei maximalen Betriebstemperaturen

Nach Einreichung Skizze und anschließendem detailliertem Antrag wurde das Projekt SiC-Mobil schlussendlich am 01.09.2021 bewilligt. 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.

Jeder der beteiligten Partner trug mit spezifischen Fachkenntnissen, Kompetenzen und Vorarbeiten zum Projekt SiC-Mobil bei:

Partner	Expertise	AP-Verantwortung
IAV	Spezialist auf dem Gebiet der Entwicklung neuer Antriebe und Energiespeicher für die Elektromobilität	0, 1, 3, 6
Breuer Motoren	Hersteller von Frequenzumrichtern für batteriebetriebene Nutzfahrzeuge	2

Uni Bremen	Umfangreiche Kompetenzen in der Leistungselektronik im Bereich der anwendungsorientierten Forschung	4, 5
Block	Spezialist für Strom- und Spannungsfilter	7
Freqcon	Hersteller von Speziallösungen für netzgekoppelte Batteriespeicher	8

Das SiC-Mobil-Projekt konnte auf Basis der unterschiedlichen Vorarbeiten, Expertisen und den technologischen Ressourcen der Projektpartner erfolgreich durchgeführt werden. Die intensive Zusammenarbeit der Partner, ihre Bereitschaft zur gemeinsamen Entwicklung neuer Technologien sowie die enge Verbindung von Wissenschaft und Praxis waren entscheidende Faktoren für den Erfolg des Projektes.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt SiC-Mobil wurde im Zeitraum 01.09.2021 bis 28.02.2025 durchgeführt.

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.

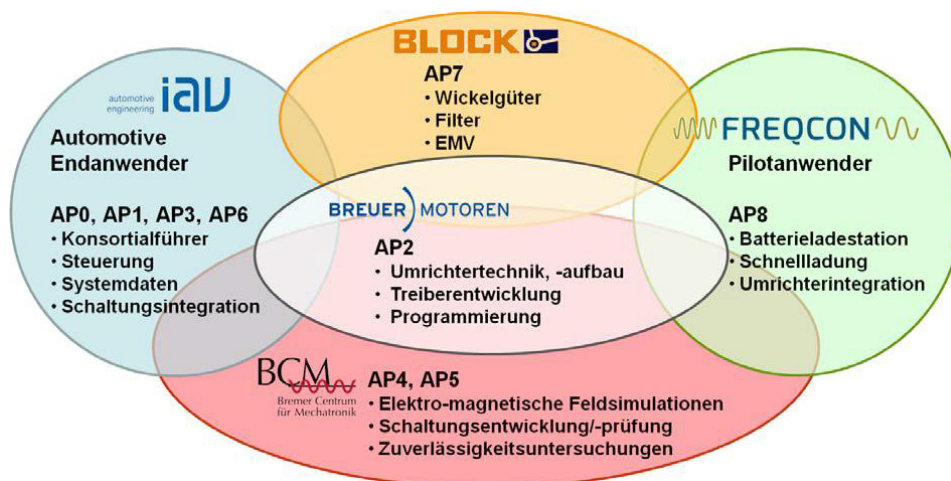


Abbildung 1: Projektschwerpunkte der Partner

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)

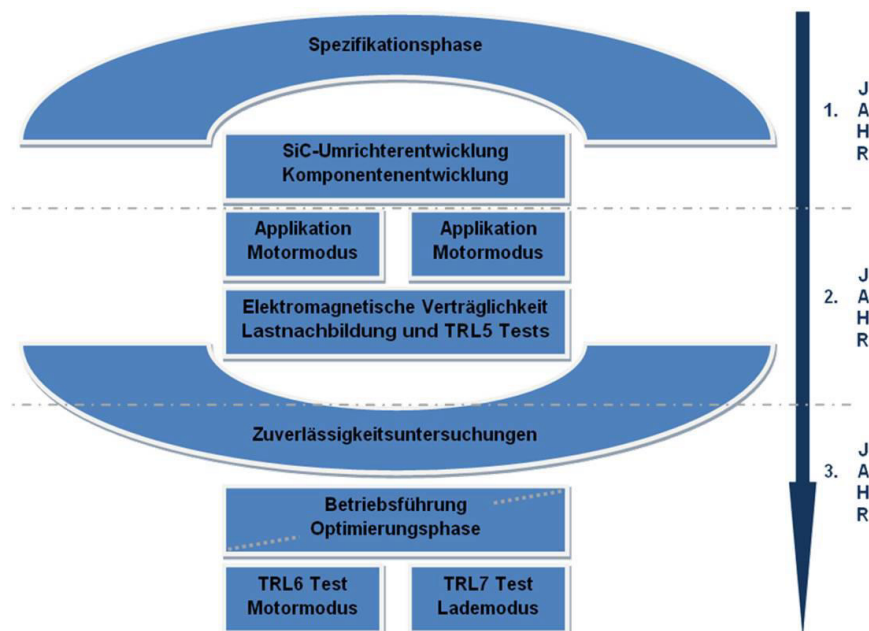


Abbildung 2: Projektphasen

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.





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.

## **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

### **4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Partner IAV hat innovative Lösungen entwickelt und aktiv zum Projekterfolg beigetragen. Sie haben die Zustandsüberwachung und Systemauslegung von SiC-Umrichtern verbessert und die Lösungen dem Markt zugänglich gemacht. Zudem wurde ein Patent für eine Fixture zur Vermessung von Ringbandkernen angemeldet.

Partner Block hat seine Kompetenzen in der Auslegung, Simulation und Fertigung von Wickelgütern für leistungselektronische Schaltungen erweitert. Sie haben ein Kalorimeter entwickelt, um die Verlustleistung induktiver Wickelgüter präzise zu bestimmen. Diese Erkenntnisse werden genutzt, um kundenspezifische Entwicklungen effizienter umzusetzen.

Partner Freqcon hat Erfahrungen mit SiC-Umrichtern gesammelt, die in die Entwicklung von Powerstacks auf SiC-Basis einfließen. Diese erlauben es, auf gleichem Bauraum höhere Leistungen zu erzielen. Freqcon wird die SiC-Technologie in zukünftigen Produkten berücksichtigen.

Partner Breuer hat neue Frequenzumrichter mit SiC-Halbleitern entwickelt, wobei die EMV und Isolationsfestigkeit der angeschlossenen passiven Bauelemente berücksichtigt wurden. Die erzielten Eigenschaften der SiC-Technologie sind vielversprechend und sollen in zukünftige Umrichtertechnologien einfließen. Breuer hat auch die erforderlichen Features für die Steuerung der SiC-Wechselrichter erarbeitet.

Uni Bremen (BCM) hat die Projekterkenntnisse in die Lehre und Laborübungen integriert, um den Studierenden industriennahe Erfahrungen zu vermitteln. Sie haben an der Entwicklung einer belastungsoptimalen Betriebsstrategie für Traktionswechselrichter mitgewirkt. BCM ist in Gesprächen über ein Anschlussprojekt, um die bisherigen Ergebnisse weiter zu verwerten.

Für das Vorhaben wurden ansonsten keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte verwendet.

### **4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Es wurden keine speziellen Informations- und Dokumentationsdienste verwendet.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des Projekts sollte für den SiC-Umrichter in AP 6 eine Betriebsstrategie entwickelt werden die, unter anderem, auch die Lebensdauer der SiC-MOSFETs in Betracht zieht. Für eine



Quantifizierung und Beeinflussung der Lebensdauer waren jedoch entsprechende Lebensdauermodelle notwendig. Diese konnten im Rahmen des Projekts nicht selbst von den Projektpartnern generiert werden (siehe AP 5.5), weshalb sich IAV an den Hersteller der SiC-MOSFETs Mitsubishi gewandt hat. Es wurde deshalb zwischen IAV und Mitsubishi eine Geheimhaltungserklärung aufgesetzt und unterschrieben, worauf Mitsubishi anschließend IAV ein entsprechendes Lebensdauermodell zukommen ließ.

## **II Eingehende Darstellung**

### **1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen**

Im Folgenden werden die Arbeitspakete beschrieben, an denen IAV beteiligt war.

#### **1.1 AP 0 Projektmanagement**

Die Gesamtkoordination und damit auch das AP 0 „Projektmanagement“ des Projekts SiC-Mobil lag bei IAV, Koordinator des Projektes, und umfasste die organisatorische, administrative sowie kommunikative Steuerung aller Projektaktivitäten über die gesamte Laufzeit hinweg. Dies erfolgte unter Anwendung bewährter Projektmanagementmethoden, um einen strukturierten Ablauf und die Zielerreichung im Förderzeitraum sicherzustellen.

Das Projektteam setzte sich aus interdisziplinären Fachkräften zusammen, wodurch eine effiziente Aufgabenverteilung sowie eine fundierte Bearbeitung der vielfältigen Themenbereiche des Projekts gewährleistet wurde. Die Projektleitung übernahm die Koordination der Arbeitspakete, die Überwachung der Meilensteine sowie das Risikomanagement. Die Zusammenarbeit mit und Zuarbeit der Projektpartner während der Projektlaufzeit verlief durchweg konstruktiv.

Die Projektstruktur orientierte sich an den Anforderungen des Fördergebers sowie an den spezifischen Erfordernissen des Projekts. Hierzu gehörten insbesondere die regelmäßige Überwachung des Projektfortschritts, das Zeit- und Ressourcenmanagement sowie die Qualitätssicherung der Arbeitsergebnisse. Ein zentrales Element bildete das interne Berichtswesen, das durch Zwischenberichte, Statusmeetings und Projektdokumentationen die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Projektfortschritte gewährleistete.

Die Kommunikation mit dem Projektträger TÜV Rheinland erfolgte eng abgestimmt und zielgerichtet. Bei der Klärung fachlicher, administrativer, abrechnungstechnischer Fragestellungen stand der Projektträger als kompetenter Ansprechpartner zur Verfügung und unterstützte die Projektleitung.

Hier ist auch der kontinuierliche Austausch mit dem Projektträger TÜV Rheinland, insbesondere im Zusammenhang mit herausfordernden Situationen im Projektverlauf zu erwähnen. Hervorzuheben ist die erfolgreiche Abwendung eines Insolvenzverfahrens eines Projektpartners (ab 09/2022), das eine intensive Abstimmung mit dem Projektträger erforderte. In enger Kooperation wurden in diesem Zusammenhang geeignete Maßnahmen zur Sicherstellung des Projektfortschritts und zur Wahrung der Förderfähigkeit erarbeitet und von den Projektpartnern trotz der Unsicherheiten über das Ergebnis und den Verbleib des Partners im Konsortium umgesetzt.

Die Koordination umfasste darüber hinaus die Organisation und Dokumentation von regelmäßigen Arbeitstreffen, sowohl online (regelmäßige 14tägige online Konsortialmeetings, regelmäßige Treffen der Mitglieder der Arbeitspakete, sowie bi-laterale-ad-hoc Treffen) als auch jährlich stattfindende Präsenzveranstaltungen im Beisein des Projektträgers:

10/2021 - Konsortialtreffen in Gifhorn, IAV

11/2022 - Konsortialtreffen in Verden, Block

09/2023 - Konsortialtreffen in Bremen, Uni Bremen

09/2024 - Konsortialtreffen in Bochum, Breuer Motoren

02/2025 - Konsortialtreffen in Rethem (Aller), Freqcon

All diese online und persönliche Treffen dienten der Abstimmung der Arbeitspakete, der Fortschrittsüberwachung sowie dem interdisziplinären Austausch zwischen den Projektpartnern.



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.

Im Rahmen des Projektmanagements wurden sämtliche Berichte gemäß den Vorgaben des Fördergebers fristgerecht erstellt. Dazu zählten Zwischen- 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:

1. 03/2023 - ATZ live paper, "System optimization of SiC inverters regarding efficiency, cost and reliability", Dr. Thomas Orlik, Dr. Michael Maiworm, Dr. Mathias Lindner, Dr. Christoph Danzer, Heiko Rabba, and Matthias Schultalbers ([https://sic-mobil.de/wp-content/uploads/2024/11/20230217\\_ATZlive\\_Paper\\_Systemoptimierung-SiC\\_IAV.pdf](https://sic-mobil.de/wp-content/uploads/2024/11/20230217_ATZlive_Paper_Systemoptimierung-SiC_IAV.pdf))
2. 11/2023 – PCIM Europe, Nürnberg, (<https://ieeexplore.ieee.org/document/10173229>)
3. 09/2024 - International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy (<https://ieeexplore.ieee.org/document/10700371>)
4. 11/2021 – Pressemitteilung zum Start des Projektes
5. LinkedIn Posts im Verlauf des Projektes

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Projektmanagements war die Begleitung innovationsrelevanter Ergebnisse bis hin zur Patentanmeldung eines Patents bei IAV. (Schutzrecht für das Inland - Patentanmeldung - DE 10 2024 108 103.1 "Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung von Eigenschaften eines Magnetkerns"). Dieser Prozess wurde zentral koordiniert und mit entsprechenden Stellen abgestimmt, um die rechtliche Absicherung und Verwertung der Projektergebnisse sicherzustellen.

Das Projektmanagement hat wesentlich zur erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens beigetragen. Durch eine strukturierte Planung, enge Kommunikation mit allen Beteiligten und die frühzeitige Identifikation und Bearbeitung kritischer Projektsituationen konnte das Projekt trotz einzelner Herausforderungen planmäßig und zielgerichtet abgeschlossen werden.

## 1.2 AP 1 Definition der Leistungsmerkmale, Konzepterstellung und Spezifikation

### 1.2.1 AP 1.1 Systemparameter

Im Rahmen von AP 1.1 wurden die relevanten technischen Anforderungen für den Antriebswechselrichter und seine Subkomponenten aus Sicht von IAV (Leistungsmodul, Gate-



Treiber, Control-Board, Sensoren) erstellt und mit den Konsortialpartnern gemeinsam weiterentwickelt. Die Herausforderung bestand dabei, die teilweise unterschiedlichen Anforderungen des Ladesystems und des Antriebswechselrichters im Hinblick auf einen modularen Einbau in Übereinstimmung zu bringen.

Es wurde schließlich eine modulare Systemarchitektur mit den Komponenten

1. Antriebs-/Traktionsumrichter
2. Ladeumrichter (Interleaved DC-DC Wandler)
3. Active-Front-End

entwickelt, wobei in allen drei Komponenten derselbe SiC-Umrichter zum Einsatz kommt. In Abbildung 4 sind die Subkomponenten und ihre Funktionen sowie Schnittstellen dargestellt.

- Im Netzteil wird eine dreiphasige Wechselspannung (690V) durch Gleich- und Gegentaktpfade geleitet.
- Das Active Front End (250 kW) wandelt diese Spannung in eine Gleichspannung um und arbeitet mit einer Schaltfrequenz von 25 kHz oder 50 kHz.
- Der Interleaved DC-DC Wandler (250 kW, erweiterbar auf 750 kW) erhöht die Spannung auf 1200V, wobei ebenfalls eine Schaltfrequenz von 25 kHz oder 50 kHz verwendet wird.
- Der Antriebsumrichter (IAV DC Boardnetz) wandelt die Gleichspannung in eine Dreiphasenwechselspannung mit variabler Frequenz für den E-Antrieb.

Die Inhalte der Architektur sind mit den Anforderungen verknüpft und wurden u.a. für die Abstimmung der Schnittstellen der einzelnen Partner im Status-Meetings genutzt.

Weitere technische Leistungsdaten des Umrichters (z.B. Spannungsbereich, Dauer-Nennstrom, Überlastfähigkeit, Schaltfrequenz) können dem Abschlussbericht des Projektpartners Breuer entnommen werden.

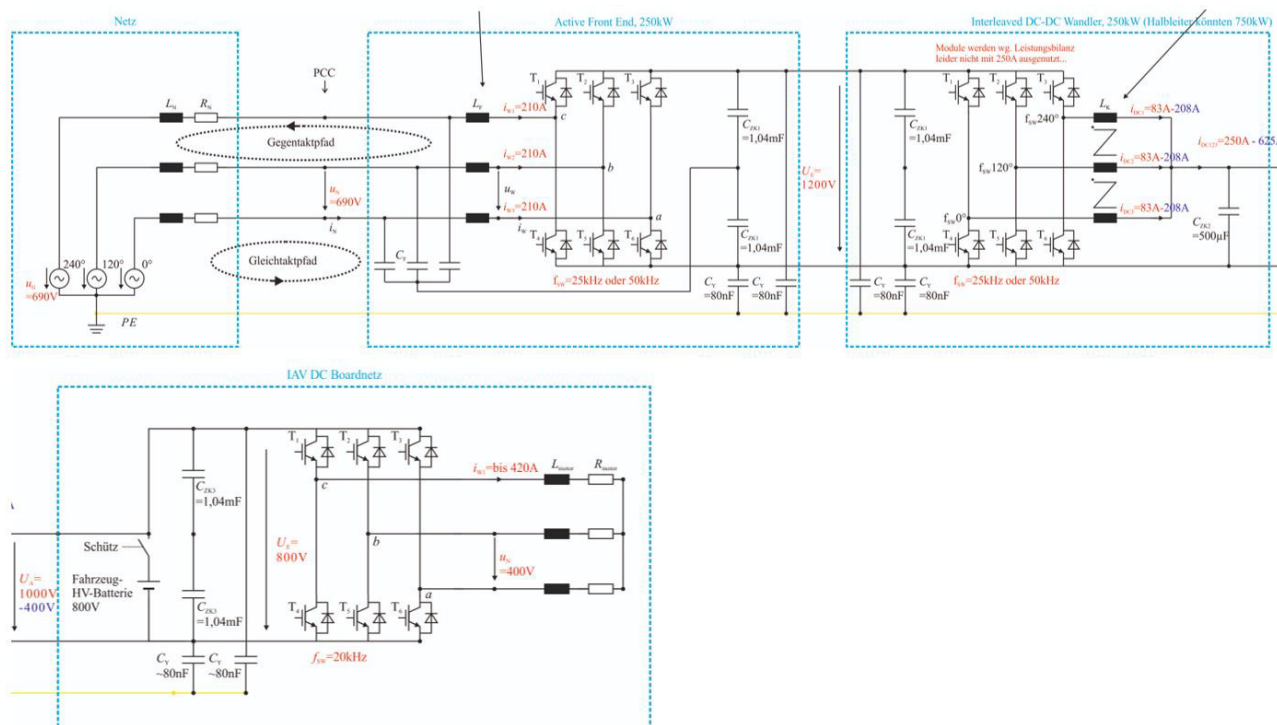


Abbildung 4: Modulare Systemarchitektur mit Active Front End, DC-DC Wandler und Antriebsumrichter

### 1.2.2 AP 1.2 Randbedingungen, Einsatzumgebung, EMV-Anforderungen

Für die Konzeptentwicklung der Zustandsüberwachung wurden die relevanten Normen analysiert und eine Literaturrecherche zu physikalischen Effekten bei der Alterung von SiC-MOSFETs durchgeführt. Auf Basis der Recherche wurden messbare technische Parameter für die Alterung abgeleitet, sog. "Lifetime Sensitive Parameters" (LSPs), unter anderem die Durchlassspannung, die Ausschaltverzögerungszeit und die Threshold-Spannung. Diese LSPs wurden in Bezug auf die Verwendung in einer Echtzeit-Zustandsüberwachung bewertet.

Die relevanten Rahmenbedingungen und Normen für die Lebensdauerprüfung wurden analysiert. Insbesondere erfolgte hier eine detaillierte Analyse der teilweise unterschiedlichen EMV-Normen für den Industriebereich und den Automobilbereich, um die Anforderungen für die Anwendung "Ladesystem" (Industriebereich) und "Antriebswechselrichter" (Automobilbereich) weiter zu detaillieren.

Mit Blick auf den aktuellen Stand der Technik für Hochvolt-Komponenten erfolgte eine rigorose Analyse der marktüblichen EMV-Validierungsverfahren im Bereich Hochvolt und ein Abgleich mit den Beschreibungen der Prüf- und Messverfahren von ISO, IEC und CISPR wurde durchgeführt. Letztendlich wurde auf Basis dieser Analysen ein EMV-Anforderungsmodul erstellt, das hinsichtlich technischer Komplexität als Basis-Entwicklungsanforderung für HV-Traktionskomponenten zur Anwendung kommen kann.

Ebenfalls in Anforderungen übersetzt wurde die Marktzugangsregelung UN ECE R10- 06, wobei hier insbesondere eine Umrechnung von Grenzwerten der gestrahlten Emissionen für Frequenzen kleiner 108 MHz auf eine äquivalente geleitete Störemission der HV-Versorgungsleitungen erfolgte. Dies ermöglicht eine exklusive Bewertung der Marktkonformität der Leistungsstrangkomponenten und damit des SiC-Umrichters, ohne, wie sonst üblich in einer gestrahlten Emissionsmessung, zusätzlich die Emissionen der Niedervolt-Subkomponenten und deren Versorgung zu betrachten. Diese umgerechneten Anforderungen werden in der abschließenden Bewertung der Messungen und

Simulationen des SiC-Umrichters genutzt, sind aber keine taugliche Anforderung für ein Lastenheft und daher im erstellten Anforderungskatalog nicht berücksichtigt.

### 1.2.3 AP 1.3 Belastungsszenarien

In diesem Arbeitspaket hat IAV, zusammen mit den Projektpartnern, das modulare Konzept und in dem Zusammenhang das Testkonzept für die funktionalen Tests erarbeitet. Dies beinhaltet auch die Aufteilung der Tests je nach Partner. Diesbezüglich gab es am Anfang des Projekts auch eine Recherche der betreffenden Normen (siehe z.B. AP 1.2) und für welchen Bereich jeweils welche Norm relevant war, sodass diese, wenn möglich, bei den Tests berücksichtigt werden konnten.

Das modulare Konzept wurde entwickelt, um eine flexible und skalierbare Testumgebung zu schaffen, die den unterschiedlichen Anforderungen der Projektpartner gerecht wird. Durch die Modularität konnten spezifische Testmodule für verschiedene Funktionalitäten und Systemkomponenten erstellt werden, was eine gezielte und effiziente Prüfung ermöglichte. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war entscheidend, um sicherzustellen, dass alle relevanten Aspekte und Anforderungen integriert wurden.

### 1.2.4 AP 1.4 Modellierung der Subsysteme

Siehe AP 1.1, insbesondere Abbildung 4.

## 1.3 AP 2 Applikationsentwicklung, Aufbau SiC-Frequenzumrichter

### 1.3.1 AP 2.1 Erstellung einer Schaltkreissimulation

Für die Zustandsüberwachung wurden die recherchierten alterungs- sowie temperatursensitiven Parameter (LSPs) des Leistungsmoduls weiter hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften untersucht und Auswerteschaltungen für eine Integration im Wechselrichter betrachtet. Es erfolgte hierbei außerdem ein Vergleich zur etablierten Technik auf Basis von Silizium (IGBT). Dabei wurden einige LSPs für weitere Untersuchungen ausgewählt, unter anderem die Durchlassspannung, die Ausschaltverzögerungszeit und die Threshold-Spannung (Abbildung 5).

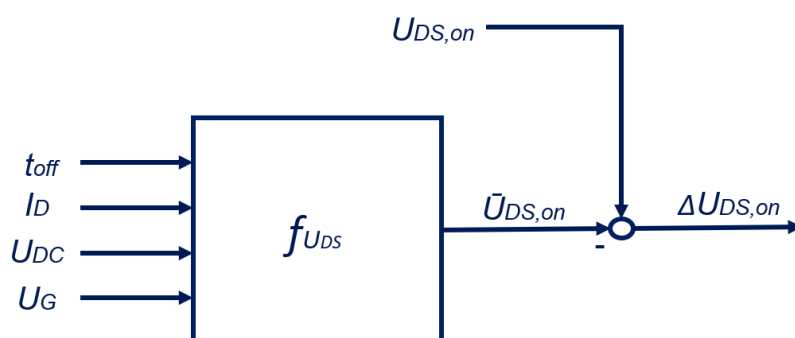


Abbildung 5: Konzept zur Bestimmung der Alterung

Für die zu untersuchende Parameter wurden Schaltungssimulationen durchgeführt (Abbildung 6). Parallel wurde zur Bestimmung des Schaltverhaltens von SiC-MOSFETs eine Simulation des Doppelpulstests durchgeführt.

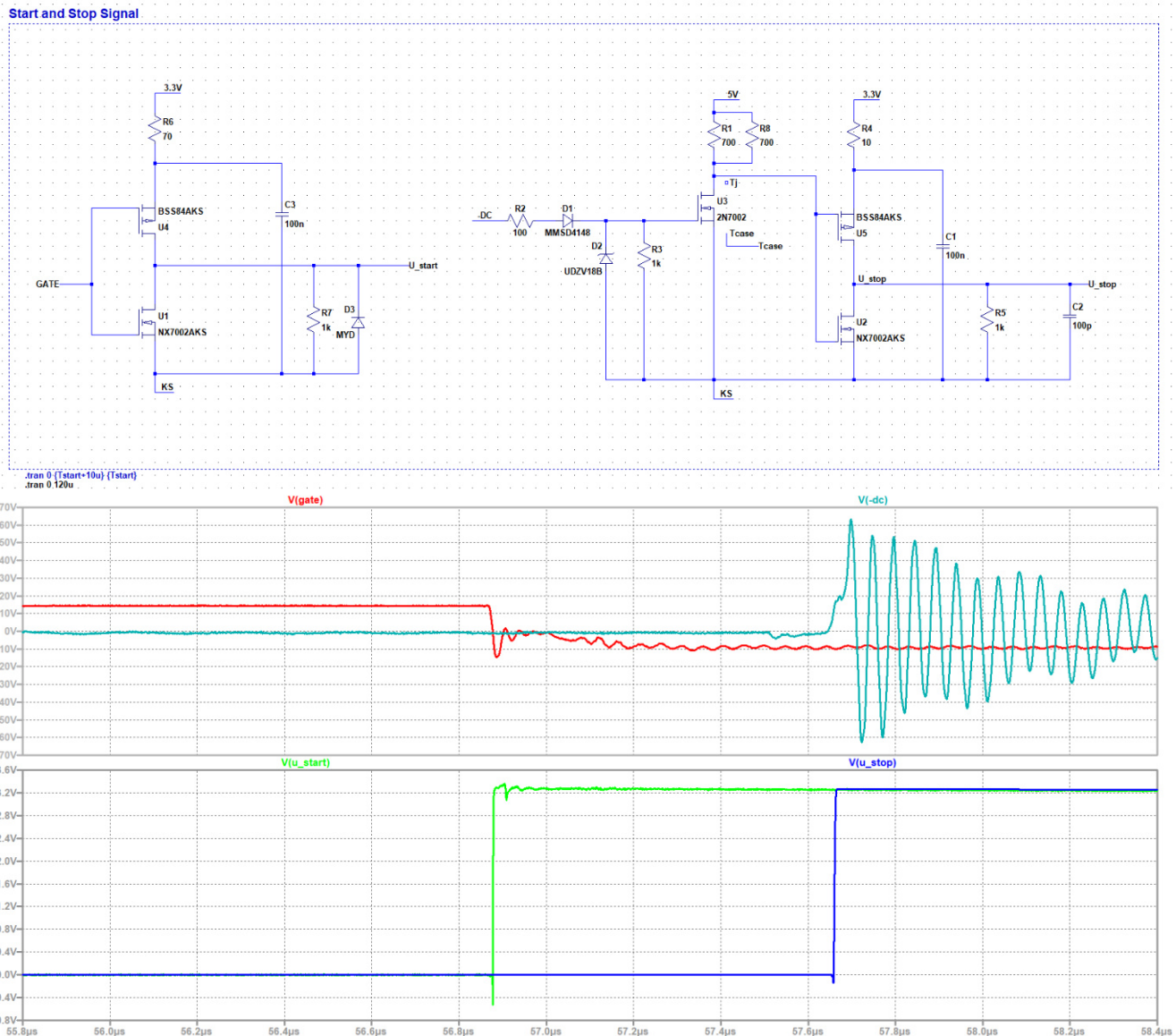


Abbildung 6: Schaltungssimulation der Ausschaltverzögerungszeit.

### 1.3.2 AP 2.2 Entwicklung: Leistungsendstufe, Treiber

Zunächst wurden die Hardware-Software-Schnittstellen mit dem Projektpartner Breuer und die Aufgaben zur Integration der IAV-Steuerplatine detailliert abgestimmt. Dazu wurden alle relevanten elektrischen Schnittstellen erfasst und beschrieben und an Breuer übergeben.

Bzgl. der ausgewählten Auswerteschaltungen des Condition-Monitorings im Prototyp erfolgte mit dem Partner Breuer eine Abstimmung zu den zusätzlich benötigten Schnittstellen und einem Konzept für die Integration im Wechselrichter. Da für die Alterungseffekte eine sehr hohe Messgenauigkeit erforderlich ist, musste bei der Integration bereits darauf geachtet werden, dass die Auswerteschaltung nicht durch externe Störeinflüsse beeinflusst wird.

Auf Basis der Abstimmungen und der Simulationen wurde ein Hardware-Konzept erstellt, welches anschließend als elektronische Baugruppe umgesetzt wurde (Abbildung 7).

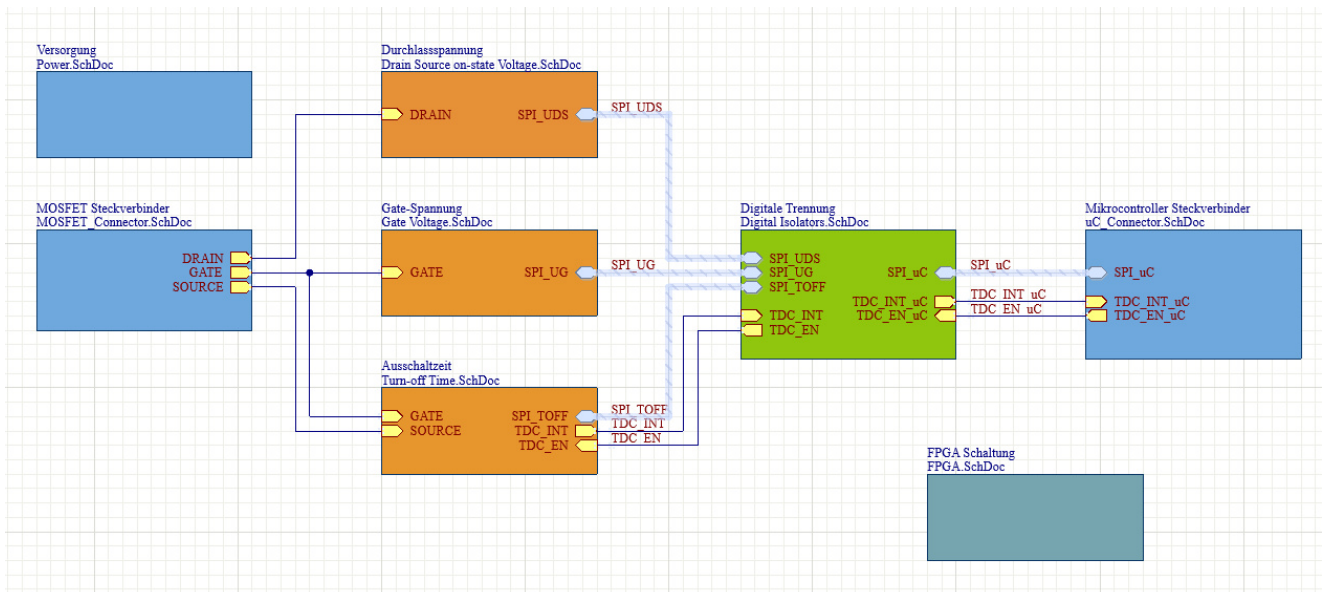


Abbildung 7: Blockdiagramm der Hardware-Baugruppen.

Parallel wurde die bestehende Ansteuerungssoftware für eine Inbetriebnahme im Antriebswechselrichter vorbereitet. Die existierenden Software-Funktionen wurden in Hinblick auf die abgestimmten elektrischen Schnittstellen und die geplante Hardware-Umsetzung überprüft und angepasst. Dies betrifft vor allem die Auswertung der Sensoren (Strom- und Winkel) sowie die Fehlerüberwachung.

### 1.3.3 AP 2.4 HF-Messung/Modellierung Halbleitermodule und Schaltzellen

Bei der Charakterisierung der Halbleiter bestand das Fernziel darin eine für EMV-Belange ausreichende Ersatzschaltbildtopologie für SiC-FETs abzuleiten. Im konkreten Fall bedeutet das, dass basierend auf einer Literaturrecherche eine grundsätzliche Ersatzschaltbildtopologie aufgesetzt und in einem Standardnetzwerksimulator (genutzt wurde LTSpice) auf Lauffähigkeit hin überprüft wurde. Da einige mathematisch-physikalische Zusammenhänge nicht eins zu eins in LTSpice umsetzbar sind, wurde die Netzwerktopologie adaptiert, um sich dem gewünschten Verhalten zu nähern. Dies betrifft insbesondere die Umsetzung der Transferkennlinie, die die Abhängigkeit der Gate-Source-Spannung zum möglichen Drainstrom darstellt, ebenso wie Abhängigkeit des Drain-Source-Widerstandes als auch aller Kapazitäten des Halbleiters von der Drain-Source-Spannung. Da die Informationen aus dem Datenblatt nur unzureichend sind, um das Halbleitermodul zu modellieren, wurden mit den Konsortialpartnern messtechnisch zu bestimmende Parameter definiert als auch Röntgenaufnahmen vereinbart, die genutzt werden sollten, um die Anschlussstopologie der Module nachzubilden und letztlich deren parasitäre Induktivität zu bestimmen.

Die vereinbarten Parameter konnten weitestgehend durch die Konsortialpartner erhoben werden, sodass ein erstes, funktionales Halbleitermodell aufgesetzt werden konnte. Die erhobenen Röntgenaufnahmen waren jedoch nicht verwertbar, sodass die parasitäre Induktivität der Halbleiterpfade über Erfahrungswerte abgeschätzt wurde. Über eine Betrachtung der Ergebnisse der Doppelpulstests beim BCM der Universität Bremen sowie der simulativen Nachbildung von deren Messumgebung konnte das Modell der SiC-Schaltzelle um Subkomponenten im Sinne eines Verhaltensmodells erweitert werden. Das so erhaltene Modell der Schaltzelle wurde anhand der Doppelpulstests validiert (siehe Abbildung 8) und wird für die EMV-Simulationsmodelle des SiC-Umrichters genutzt.

Abseits der eigentlichen Schaltzelle wurden die Treiberpfade auf Basis der PCB-Daten für Treiber- und Grundkarte der Firma Breuer in 3D modelliert und für die weitere Nutzung in einer Netzwerksimulation entsprechend abstrahiert. Dabei ist insbesondere anzumerken, dass sich die sog. Grundkarte, die ausschließlich mit passiven Bauteilen bestückt ist, problemlos modellieren und abstrahieren ließ, wohingegen eine weitreichende Modellierung der Treiberkarte wegen nicht vorhandener Modelle für die Treiber ICs entfallen musste. Die Treiber ICs wurden daher direkt durch Spannungsquellen abgebildet, die direkt und ohne eigenen Innenwiderstand das PWM-Signal für die FETs auf die Gate-Leitung geben.

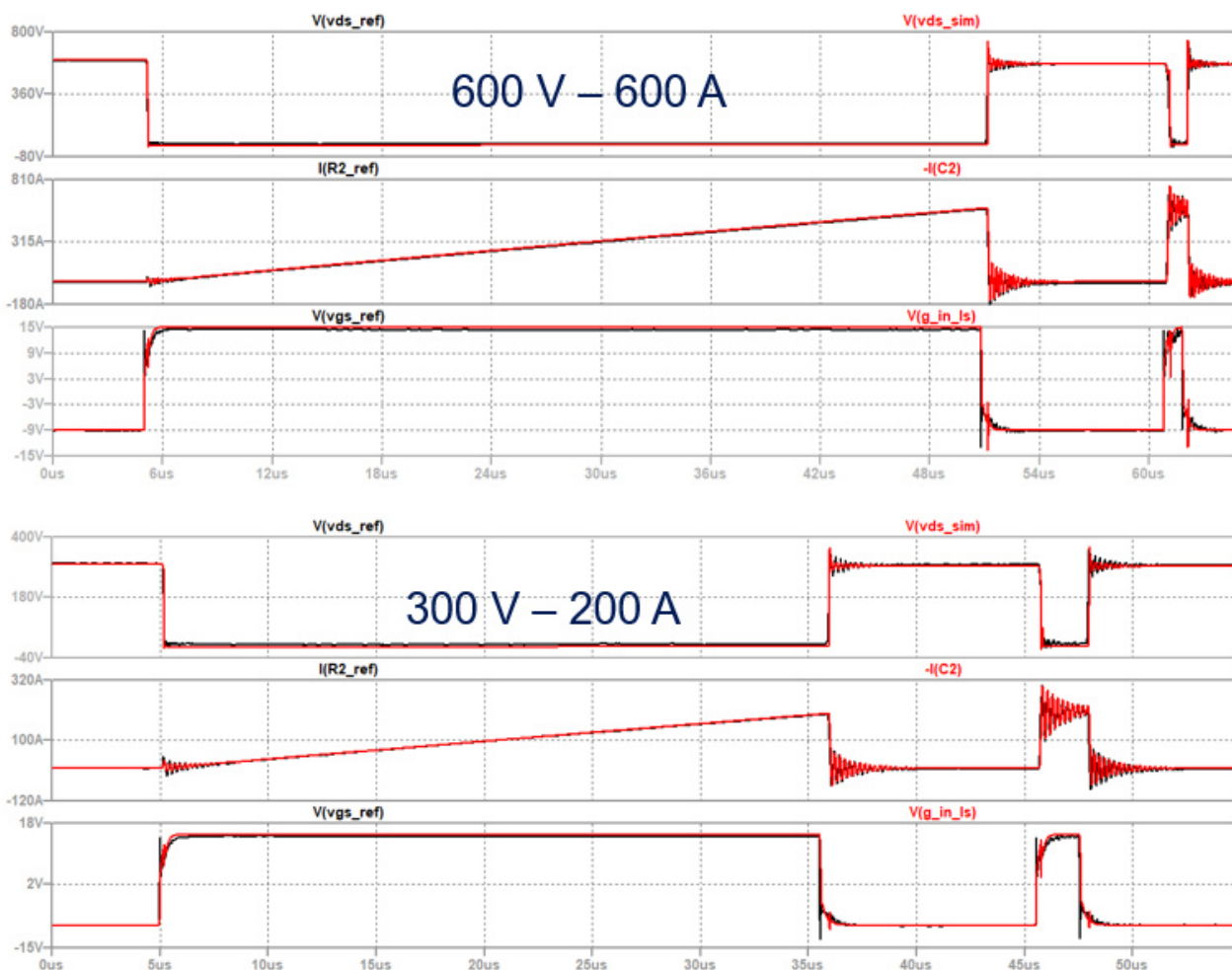


Abbildung 8: Validierungsfälle Doppelpulstest, Schwarz = Messung, Rot = Simulation mit finalem Modell der Schaltzelle

### 1.3.4 AP 2.7 Auslegung des Kühlsystems, Berücksichtigung EMV

Parallel zur Modellierung der Halbleiter und deren Treiberpfade wurden ebenfalls die restlichen Mechanikteile des Leistungspfades innerhalb des Inverters betrachtet, was vornehmlich die Busbars und zwingendermaßen die daran angebotenen Zwischenkreiskondensatoren sind. Dabei wurden die betreffenden Teile in 3D nachgestellt, per Vollwellensimulation durchgerechnet (zugehöriges Modell ist dargestellt in Abbildung 9) und abschließend auf ein äquivalentes Netzwerk abstrahiert. Im Kontext der Auslegung des Designs bestand jedoch wenig Spielraum für die EMV, da die Kühlung bereits möglichst effizient/kurz ausgeführt wurde und der erste Stand des Zwischenkreiskondensators - ein pragmatischer Aufbau aus diskreten Folienkondensatoren - zwangsläufig größer ausfällt als sonst im Automotive-Bereich üblich, jedoch direkt nutzbar war. In einer weiterentwickelten Version des Umrichters wurde der diskret zusammengesetzte

Zwischenkreiskondensator durch eine angepasste und vor allem kleinere Komponente ersetzt, die aber nicht mehr abschließend durch die EMV betrachtet wurde mangels Hardware.

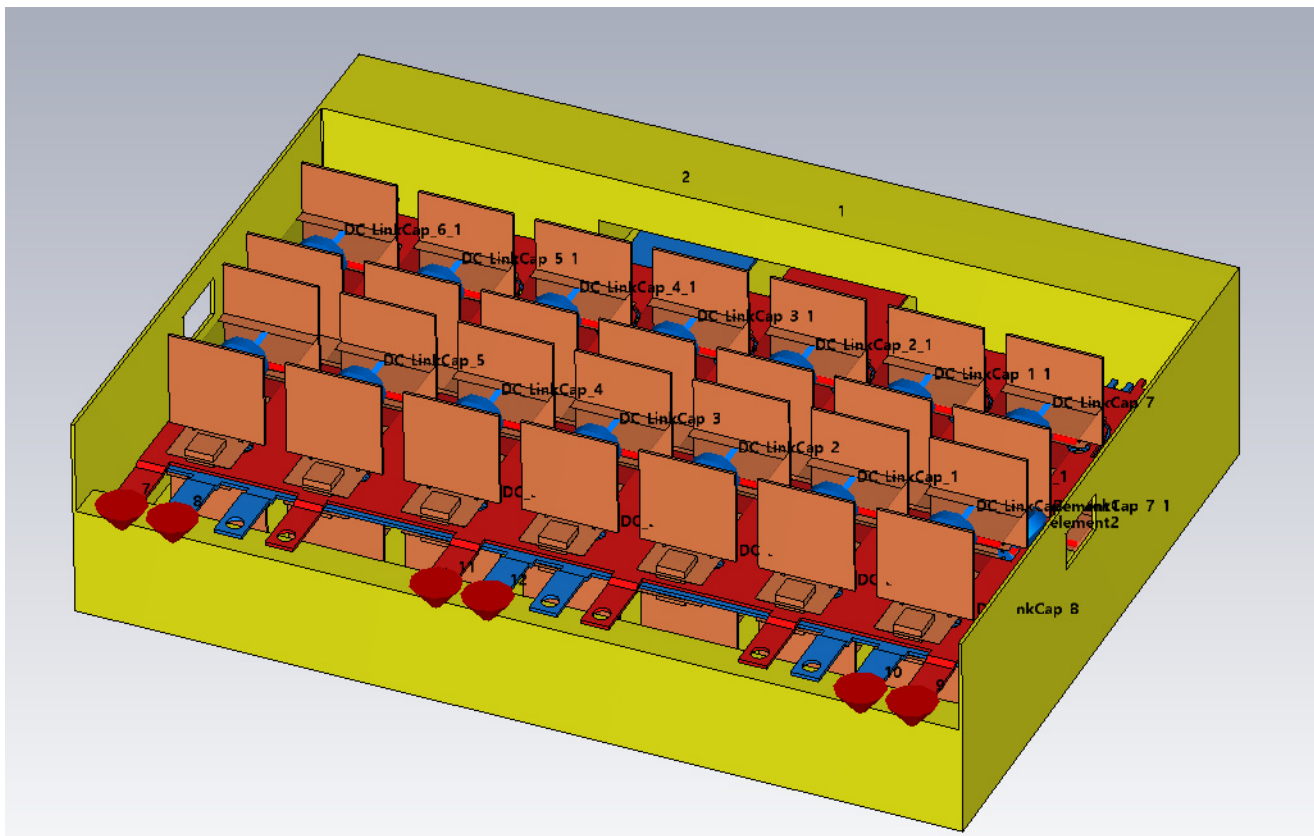


Abbildung 9: 3D-Simulationsmodell Busbars + Gehäuse + Zwischenkreiskondensator

### 1.3.5 AP 2.8 Controller-/Rechnerarchitektur für das Antriebsmodul

Aufgrund der Lieferengpässe bei Elektronikkomponenten wurde anstelle einer bestehenden Controllerplatine die dSPACE MicroAutoBox II (MABXII) eingesetzt. Daher wurde die Leiterplatte für die Zustandsüberwachung der SiC-MOSFETs als eigenständige Platine konzipiert. In diesem Zusammenhang wurden die Schnittstellen zwischen der Leiterplatte für die Zustandsüberwachung, der MABXII und den Gate-Treiber-Platinen neu definiert. Dies ermöglichte eine optimale Integration der PCB in den Wechselrichter.

Das Konzept für die Zustandsüberwachung basiert auf der Messung von drei verschiedenen spezifischen elektrischen Parametern im Leistungsmodul, die eine Abhängigkeit von der Temperatur und der Lebensdauer aufweisen. Durch die Messung mehrerer Parameter soll die Robustheit der Messung erhöht und die Abhängigkeit von der Betriebstemperatur verringert werden. Konkret wurde die Ausschaltverzögerungszeit des Moduls, die Durchlassspannung und die Gate-Spannung gemessen.

Mit den Ergebnissen von AP 1.1 erfolgten der Entwurf der Schaltung sowie das Design und Layout der erforderlichen Platinen (Abbildung 10).

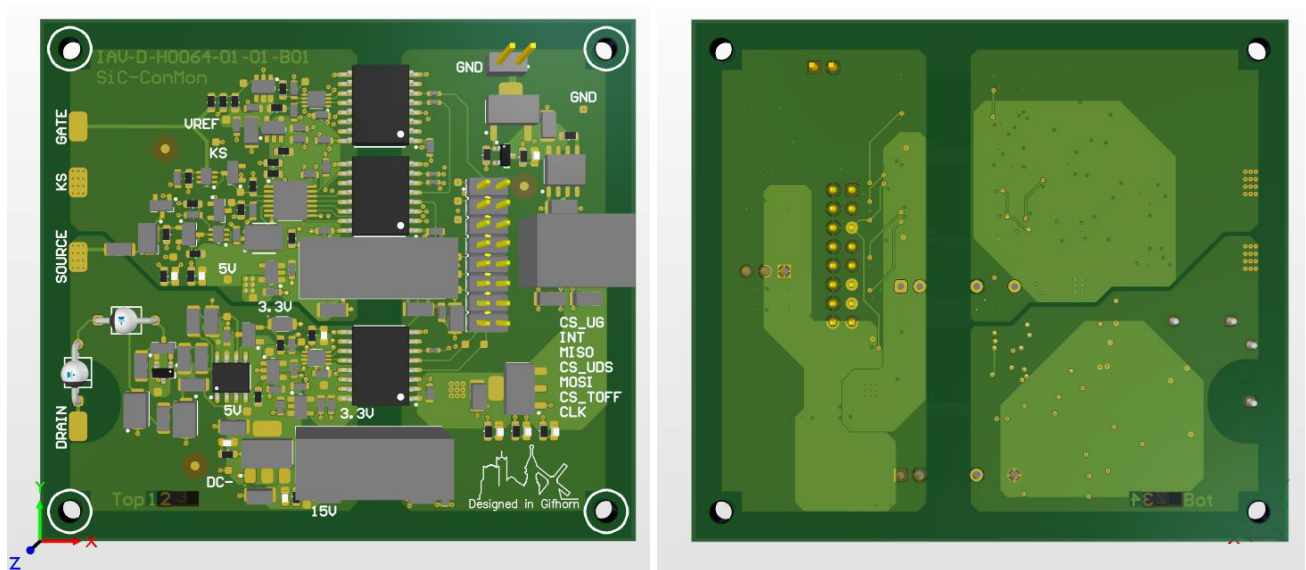


Abbildung 10: 3D-View der Platine für die Zustandsüberwachung

### 1.3.6 AP 2.9 Aufbau SiC-Antriebsumrichter: Muster TRL5

Für die Inbetriebnahme des Prototyps (erste Inbetriebnahme und den sicheren Betrieb am Prüfstand, Funktionen zum Bauteilschutz, Derating-Funktionen, etc.) sowie verschiedene folgende Arbeitspakete in diesem Projekt (z.B. AP 5.5 „Modelle zur Lebensdauer-Optimierung“, AP 6 „Optimale Betriebsstrategien für SiC-Umrichter in den Anwendungsbereichen“) wird eine entsprechende Systemsimulation benötigt.

Daher wurde diesem Arbeitspaket eine Simulation in MATLAB/Simulink erstellt, welche ein Modell eines permanenterregten Synchronmotors (PMSM) und entsprechende Sensormodelle beinhaltet. Für eine möglichst genaue Nachbildung der Realität wurde die für den Prüfstand verwendete Antriebs-/Integrationssoftware auch in die Simulation eingebettet (Abbildung 11). Dabei enthält die Integrationssoftware (Abbildung 12) alle relevanten Softwarekomponenten, welche dann in der Simulation getestet werden konnten. Unter anderem wurde ein Fehlermanagement und Derating entwickelt und an die im Prototyp vorhandenen Sensoren und Signale angepasst. Diese Schutzfunktionen sind 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

ist eine möglichst genaue Berechnung der internen Temperaturen der SiC-Module erforderlich. Hierzu wurde ein entsprechendes Temperaturmodell entwickelt. Ein wesentlicher Punkt hierfür ist die genaue Berechnung der elektrischen Verluste im Halbleiter. Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Berechnung im Steuergerät gegenübergestellt und deren Genauigkeit in der Simulation bewertet.





### **1.4 AP 3 Entwicklung kompakter, modularer Aufbau- / Einbaukonzepte**

#### **1.4.1 AP 3.1 Modellierung**

In AP 3.1 wurden Schaltungssimulationen in LTSpice erstellt, um die Robustheit der Schaltung gegen Produktions- und Bauteiltoleranzen zu bewerten und ggf. notwendige Kalibriermethoden zu entwickeln, um den hohen Anforderungen an die Robustheit von Diagnosen im Automobilbereich gerecht zu werden.

Des Weiteren wurden Modelle der Sensoren erstellt und parametrisiert. Dies betrifft insbesondere den Rotorlagesensor, den Zwischenkreisspannungssensor und die Stromsensoren. Modelle für Sensoren zur Messung der Phasenspannungen wurden nicht erstellt, da diese aus Kostengründen nicht vorgesehen wurden.

#### **1.4.2 AP 3.2 Ansteuerung und Kommunikation**

Zur Verringerung von Systemauswirkungen der HF-Störungen wurden verschiedene Abhilfe- und Kompensationsmaßnahmen realisiert. Zunächst wurde die entwickelte Treiberschaltung und der resultierende Einfluss auf das Schaltverhalten der SiC-MOSFETs intensiv beim Projektpartner Breuer untersucht. Näheres hierzu ist dem Breuer-Schlussbericht zu entnehmen. Seitens IAV wurden zur Vermeidung negativer Auswirkungen entsprechende EMV-Filter entwickelt (siehe AP 3.6). Auf Seite der Ansteuerungs-/Integrationssoftware wurden weiterhin die Softwaremodule EmSt (State machine) und EmDiag (Diagnosemodul) angepasst. In diesen wurden Funktionen implementiert, welche eine fehlerhafte Funktion der Sensoren erkennen und entsprechende Fehlerreaktion (z.B. Ausschalten der Stromregelung) auslösen können.

#### **1.4.3 AP 3.3 Optimierung der Schaltzellen für HF und Betrieb**

Da ein vollständiges 3D-Modell wegen fehlender Informationen zum SiC-Modulaufbau nicht erstellbar war (siehe Bericht zu TAP 2.4), haben sich Optimierungen der Schaltzelle exklusiv im Kontext der Treiberpfade ergeben. Dabei wurde eine signifikante Verbesserung dadurch erreicht, dass die sog. Cera-Link-Kondensatoren, die zwischen Drain und Source der SiC-FETs angebracht waren, nicht mehr bestückt wurden. Die Motivation für diesen Schritt rührte nicht initiativ aus Betrachtungen des EMV-Simulationsmodells, da sich bereits bei realen Messungen am ersten Prototypen Cera-Link-Kondensatoren selbst entlötet haben. Jedoch konnte eine parallele Betrachtung im EMV-Simulationsmodell bestätigen, dass die besagten Kondensatoren im Gesamtaufbau wegen der parasitären Eigenschaften im Rahmen von Schalthandlungen in Resonanz geraten und dabei unverhältnismäßig viel Wirkleistung umsetzen. Die saubere Modellierung der Cera-Link-Kondensatoren konnte über ein Herstellermodell sichergestellt werden, das ebenfalls das nichtlineare Verhalten des komplexen Dielektrikums im Zeitbereich berücksichtigt.

#### **1.4.4 AP 3.5 Leitungsgeführte Störaussendung**

Ein erster Musterstand, der vermessen werden konnte, stand im Gesamtkontext des Projektzeitplans aus nachvollziehbaren Gründen erst deutlich später als erwartet zur Verfügung. Um trotzdem möglichst zeitnah erste Ergebnisse zu erhalten, wurde im Projektverlauf überprüft, inwieweit die ohnehin durchzuführenden Tests auf Motorenprüfständen mit Messtechnik für die EMV erweitert werden können. Aufgrund der räumlich-geometrischen Gegebenheiten des Prüfstands musste dieser Ansatz jedoch verworfen werden. Anstatt dessen wurden die Umfänge dieser initialen Messung auf die EMV-Vermessung in einer geschirmten Umgebung mit EMV-Belastungsaggregat verschoben (TAP 7.3), wobei die Messkampagne dann deutlich umfangreicher ausgeführt wurde, um bei verschiedensten Lastpunkten zu messen, aber auch eine tiefgehende Analyse hinsichtlich des elektrischen wie thermischen Verhaltens von Ringbandkernen darzustellen.

### 1.4.5 AP 3.6 EMV-Filterentwicklung/-Drosseln

Da erste Messungen der geleiteten HV-Störemissionen gemäß Bericht zu TAP 3.5 nicht zur Verfügung standen, wurde der EMV-Filter anhand erster Ergebnisse des damals noch nicht final optimierten Gesamtsimulationsmodells des CISPR25-Inverteraufbaus gemäß TAP 3.7 entwickelt. Wichtig war dabei, dass der qualitative Verlauf der Störemissionen mit der Realität hinreichend gut übereinstimmt, was angesichts des hohen Störpotentials im kHz-Bereich sowohl in der Messung aber auch der ersten Simulation gegeben ist.

Im Zuge der Filterentwicklung wurde mit dem Kooperationspartner Breuer ein iterativer Prozess etabliert, um mehrere Filter-Designs zu simulieren, hinsichtlich der Einfügedämpfung zu vergleichen und dann Verbesserungen anhand der Ergebnisse abzuleiten. Das Resultat war ein Filterdesign in „klassischer“ T-Form, d.h. auf eine Induktivität folgt eine Kondensatorbank, auf die wiederum eine Induktivität folgt. Da sehr hohe DC-Ströme getrieben werden, mussten die Induktivitäten je auf einen Ringbandkern reduziert werden, der über beide HV-Leiter gezogen wird und somit nur den Common-Mode-Anteil dämpft. Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl im 3D-Modell des Filters als auch im resultierenden SPICE-Modell des endgültigen Filter-Designs die Dispersion des permeablen Kernmaterials korrekt abgebildet wird.

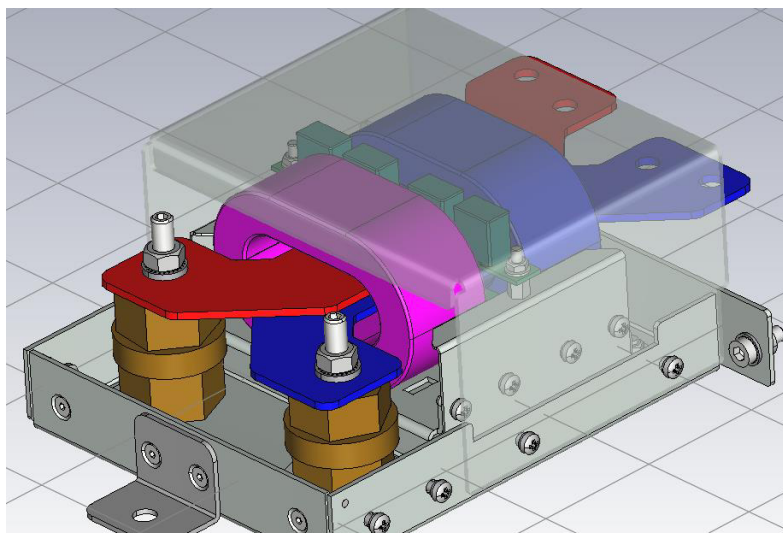


Abbildung 13: CAD-Modell des finalen Filter-Designs

Das finale Filter Design (siehe obige Abbildung) ist daher am Ende nicht nur kompakt, sondern beinhaltet auch gezielte Maßnahmen, um die parasitäre Induktivität in den kapazitiven Pfaden möglichst gering zu halten. Die Filterbauteile selbst sind „off the shelf“ Teile regulärer Hersteller am Markt (keine customized Teile).

### 1.4.6 AP 3.7 Elektromagnetische Feldsimulation / digitaler Zwilling

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der TAP 2.4, 2.7 und 3.6 wurde ein Gesamtmodell des grundsätzlichen Inverters aufgebaut. Hierbei kam zugute, dass alle Submodelle auch in Form eines SPICE-Modells vorlagen, sodass eine Verschaltung einfach und effizient möglich war. Um das Gesamtmodell zu komplettieren, später aber auch validieren zu können, mussten noch Subkomponenten hinzugefügt werden, die notwendig sind, um einen CISPR-25 Messaufbau zu beschreiben, wie er später im TAP 7.3 umgesetzt und genutzt wurde. D.h. konkret, dass noch Modelle für die geschirmten HV-DC und HV-AC Leitungen hinzugefügt werden mussten, als auch Modelle für die HV-LISNs und den E-Motor. Die Leitungsmodelle wurden vorerst auf Basis von Normlängen und der Querschnittsgeometrie des verwendeten HV-Kabeltyps gemäß Ansatz aus der Literatur erstellt. Als Motormodell wurde ein bereits vorhandenes, EMV-taugliches Modell verwendet,

das einen Motor des gleichen Wirkprinzips (permanent erregte Synchronmaschine) und in einer vergleichbaren Leistungsklasse abbildet.

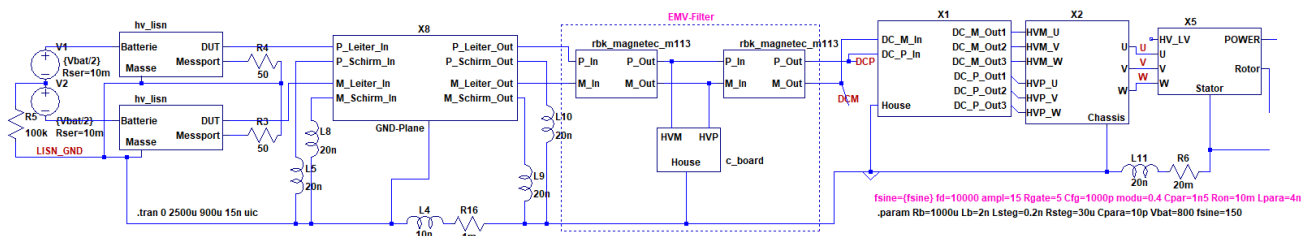


Abbildung 14: Erste Version des Simulationsmodells in SPICE

Da der Vergleich mit den Messergebnissen aus TAP 7.3 nur eine grobe Übereinstimmung zeigte, wurde das Modell in einer Optimierungsschleife an jeder möglichen Subkomponente durch ein äquivalentes 3D-Modell ersetzt. Dieser vollumfängliche Ersatz hat sich im Nachhinein als übertrieben herausgestellt. Hier konnte gezeigt werden, dass eine vergleichbare Qualität der Simulationsergebnisse erreicht werden konnte, indem in der Schaltungssimulation an den entscheidenden Stellen 3D-Modelle eingesetzt werden. Dadurch konnte die Simulationszeit reduziert werden. Die Modellerstellung wurde entsprechend in CST-Studio umgesetzt und nicht mehr in LTSpice.

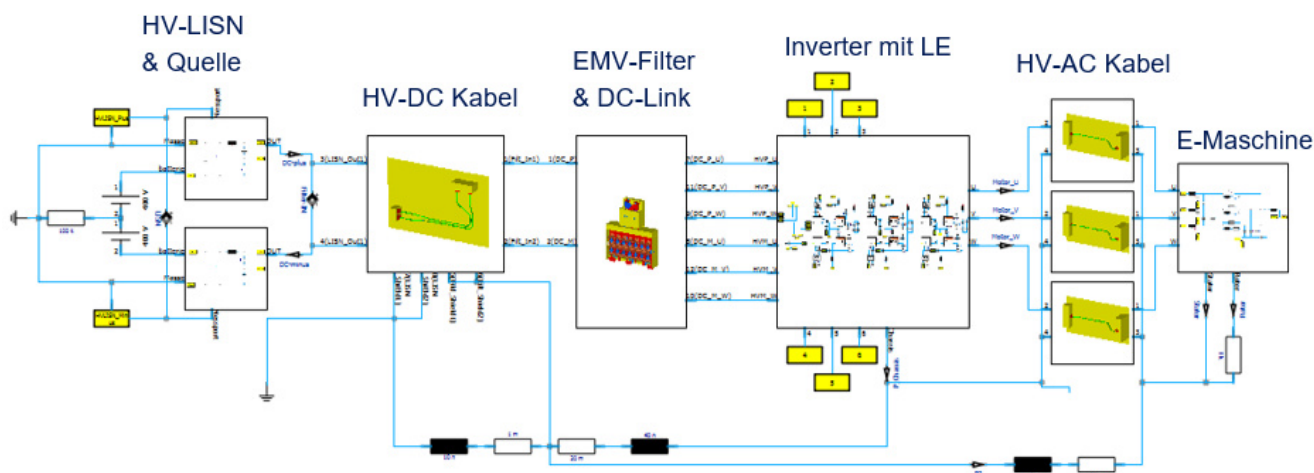


Abbildung 15: Verbessertes Simulationsmodell in CST-Studio

Abseits des Gesamtmodells des SiC-Inverter-Aufbaus hat sich im Laufe des Projekts noch ein zweiter Fokus in Bezug auf die Feldberechnung bzw. digitale Zwillinge ergeben, da sich bereits in frühen Messungen bei Konsortialpartnern gezeigt hat, dass sich die Ringbandkerne im HV-DC EMV Filter unerwartet stark im Normalbetrieb erwärmen und dabei sogar verfärben. Ursache der Erwärmung sind die hohen Common-Mode-Störströme, die vom Inverter emittiert werden und nicht nur signifikant Leistung in die Ringbandkerne des Filters einprägen, sondern auch im Verdacht stehen das Ringbandkernmaterial mindestens anteilig in Sättigung zu treiben. Für die Erstellung digitaler Zwillinge für Ringbandkerne wurden dabei zwei Pfade parallel beschritten: einerseits wurde ein thermischer digitaler Zwilling aufgesetzt, andererseits wurde ein Modell auf Netzwerkebene erarbeitet, das sowohl Dispersions- als auch Sättigungseffekte des Kernmaterials abbilden kann.

Eine erste Version des thermischen Modells wurde auf Basis von Daten, die der Ringbandkernhersteller bereitgestellt hat, aufgesetzt und mit Wirkleistungen, wie sie aus dem Simulationsmodell des Gesamtaufbaus für die Ringbandkerne ermittelt werden konnten, gespeist. Das Modell umfasst dabei den gesamten EMV-Filter, um ebenfalls die Entwärmung der Kerne im

realen Aufbau möglichst sauber dazustellen. Das Ergebnis liefert sehr hohe Temperaturwerte in den Kernen (siehe Abbildung 16) und korrespondiert somit prinzipiell gut mit den ersten Beobachtungen. Nachdem jedoch eine quantitative Überprüfung im Rahmen der Messungen des Gesamtaufbaus unter TAP 7.3 ergab, dass derart hohe Werte real nicht erreicht werden, mussten Modell und Messmethodik noch einmal überarbeitet werden.

Zu diesem Zwecke wurde eine Fixture entwickelt, in der Ringbandkerne unter sehr klaren und reproduzierbaren Randbedingungen sowohl thermisch als auch elektrisch vermessen werden können. Die entsprechende Fixture wurde im Projektverlauf entwickelt, aufgebaut, für Messungen genutzt und letztendlich auch patentiert (siehe Abbildung 17).

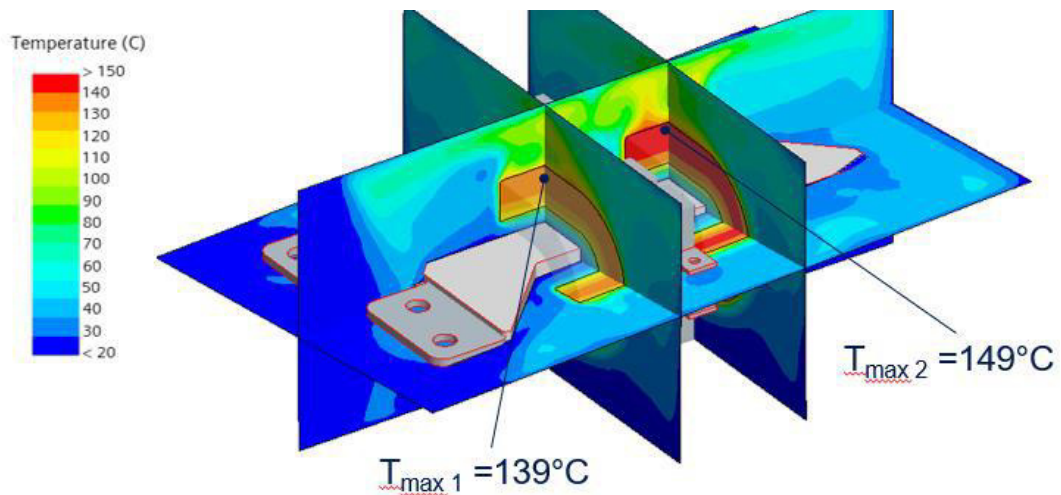


Abbildung 16: Temperaturverteilung in Ringbandkernen des EMV-Filters bei Worst Case Betrieb

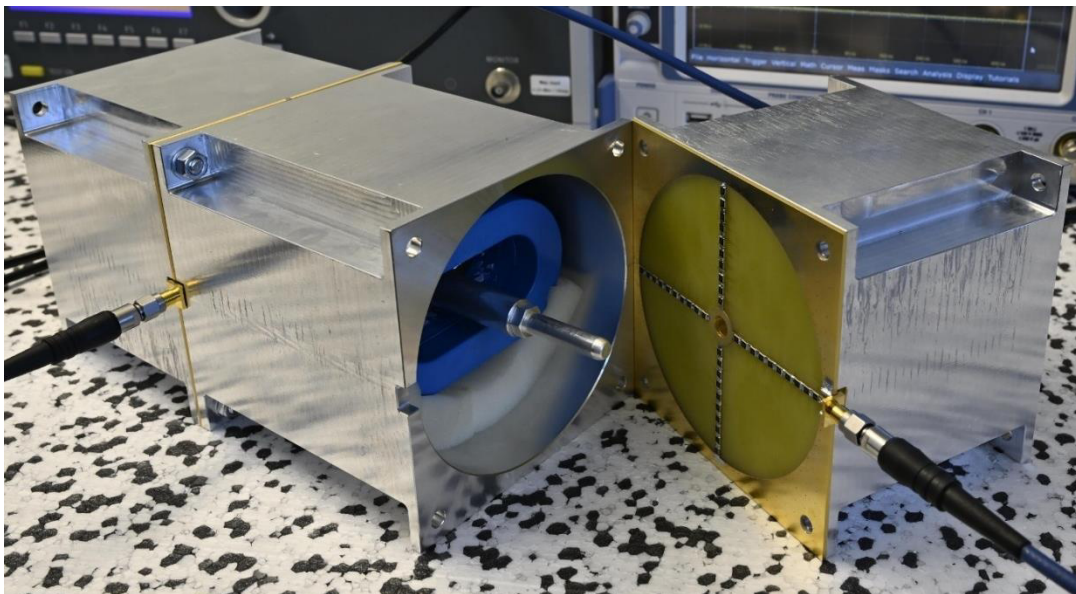


Abbildung 17: Entwickelte Fixture zur RBK-Vermessung mit bestücktem Ringbandkern

Mit der entwickelten Fixture wurden wiederum thermische Messungen durchgeführt, wobei die eingespeiste Leistung direkt ermittelt werden konnte, da sowohl die angelegte Spannung am Generatorausgang als auch der stromproportionale Spannungsabfall über einen Shunt gemessen wurde (siehe Abbildung 18). Wichtig zu erwähnen ist hierbei, dass das genutzte Equipment hinsichtlich seiner technischen Möglichkeiten limitiert war, insbesondere was die Dynamik beim

Treiben von Stromspitzen angeht. Dies hatte zur Folge, dass Messungen nur bis  $f < 100$  kHz umsetzbar waren, nicht mehr als 40 V Amplitude am Generatorausgang angelegt werden konnten und die Spannung beim Auftreten von starken Sättigungseffekten letztlich eingebrochen ist.

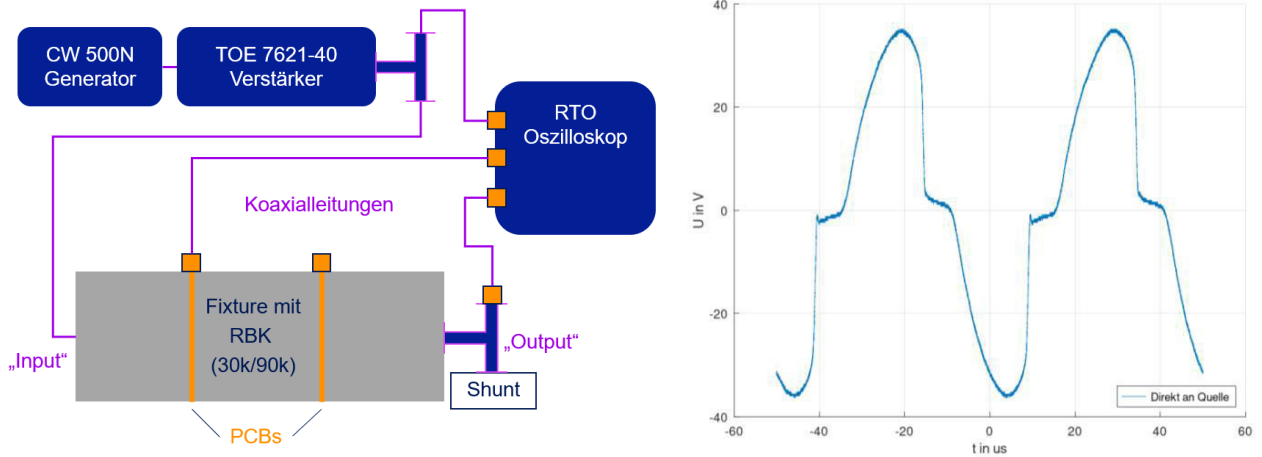


Abbildung 18: Schematischer Messaufbau mit Fixture (links) und verzerrte Quellspannung bei starker Sättigung (rechts)

Das thermische Simulationsmodell wurde grundsätzlich in Anbetracht der neuen Messumgebung angepasst und abschließend mit ca. 10 W Nennleistung gespeist und einer entsprechenden Messung verglichen.

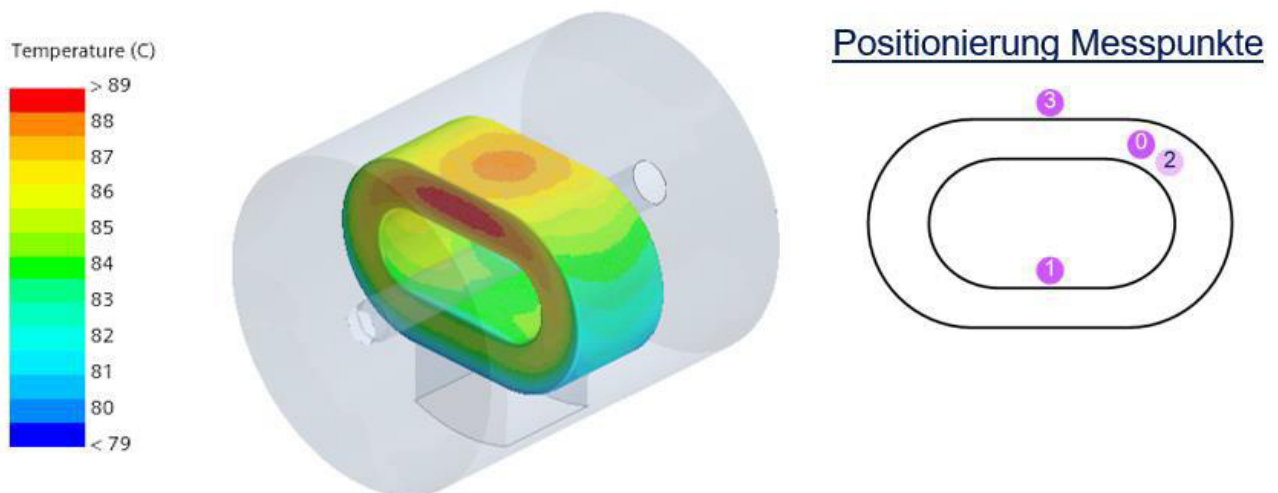


Abbildung 19: Temperaturverlauf im Simulationsmodell des Kerns und Angabe Messpunkte

Beim Vergleich der Messung und Simulation in Abbildung 20 ist zu erkennen, dass auch das überarbeitete thermische Modell noch kein „Perfect Match“ darstellt, aber sowohl qualitativ wie quantitativ die Erwärmung zufriedenstellend darstellen kann.

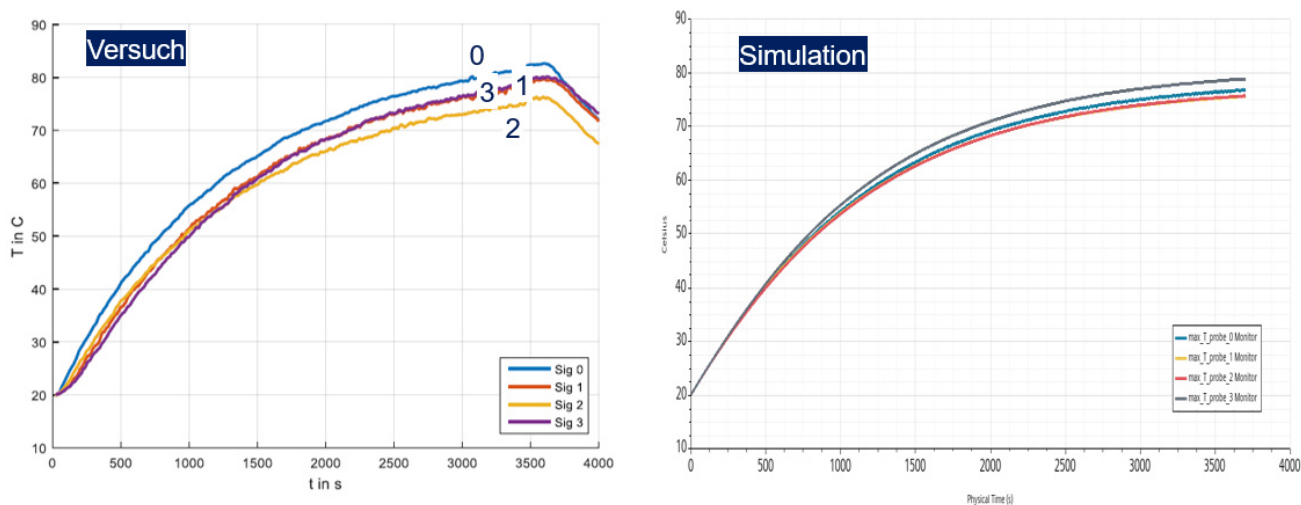


Abbildung 20: Vergleich gemessener und simulierter Temperaturverläufe am Ringbandkern

Unter Beachtung der oben genannten Effekte, konnten die Messergebnisse mit Fixture genutzt werden, um mehrere Modellierungsansätze für Ringbandkerne gegeneinander abzuwägen, die das Potenzial haben gleichzeitig die Dispersion der Permeabilität als auch die Sättigung des Kernmaterials abzubilden. Letztlich wurde ein Ansatz gefunden, der in jedem Fall bessere Ergebnisse liefert als ein lineares „Standardmodell“, das nur die Dispersion und keinerlei Sättigung berücksichtigt. Jedoch ist auch der neue Modellierungsansatz offensichtlich nicht perfekt. Dies zeigt sich beim Vergleich von Simulation und Messung im Fall geringer und deutlicher Sättigung (siehe Abbildung 21). Das Standardmodell ohne Sättigung kann im Fall der geringen Sättigung sinnvolle Spitzenwerte liefern, während der neue Modellansatz hier etwas zu pessimistisch ist und eine zu große Shuntspannung hervorbringt. Die leichte Verzerrung der Kurvenform wird jedoch nicht nachgebildet. Im Falle der deutlichen Sättigung ist das Modell ohne Sättigung qualitativ wie quantitativ unzureichend. Das neue Modell kann den qualitativen Verlauf deutlich besser nachempfinden, auch wenn hier ebenfalls keine perfekte Übereinstimmung erzielt wird und auch die Spannungsspitzen sichtbar schwächer ausfallen als real gemessen. Nichtsdestotrotz kann gezeigt werden, dass der neue Modellansatz offensichtlich eine insgesamt bessere Modellierung erlaubt, als es mit einem linearen Modell möglich ist.

Obwohl der neue Modellansatz das Verhalten von Ringbandkernen im Zeitbereich offenbar besser nachbilden kann, gibt es auch hier noch Optimierungsbedarf. Das in LTSpice implementierte Modell zeigte bei direkter Nutzung im Gesamtmodell der Invertermessungen gemäß TAP 7.3 Instabilitäten und vor allem unplausible Leistungsumsätze innerhalb des Kerns in Form negativer oder verschwindend geringer Leistungen. Wie es zu diesem Verhalten kommt, ist derzeit noch unklar und Gegenstand zukünftiger Untersuchungen. Im einfacheren Simulationsmodell der Fixture, das genutzt wurde, um die Verläufe aus Abbildung 21 zu generieren, treten diese Phänomene jedoch nicht auf und es zeigt sich, dass sich die Leistungsaufnahme des Kerns etwas erhöht, sobald deutliche Sättigungseffekte auftreten. Die Erhöhung im Leistungsumsatz ist aber eher graduell und kann gegenüber der Prognose mit linearem Modell vorerst vernachlässigt werden.

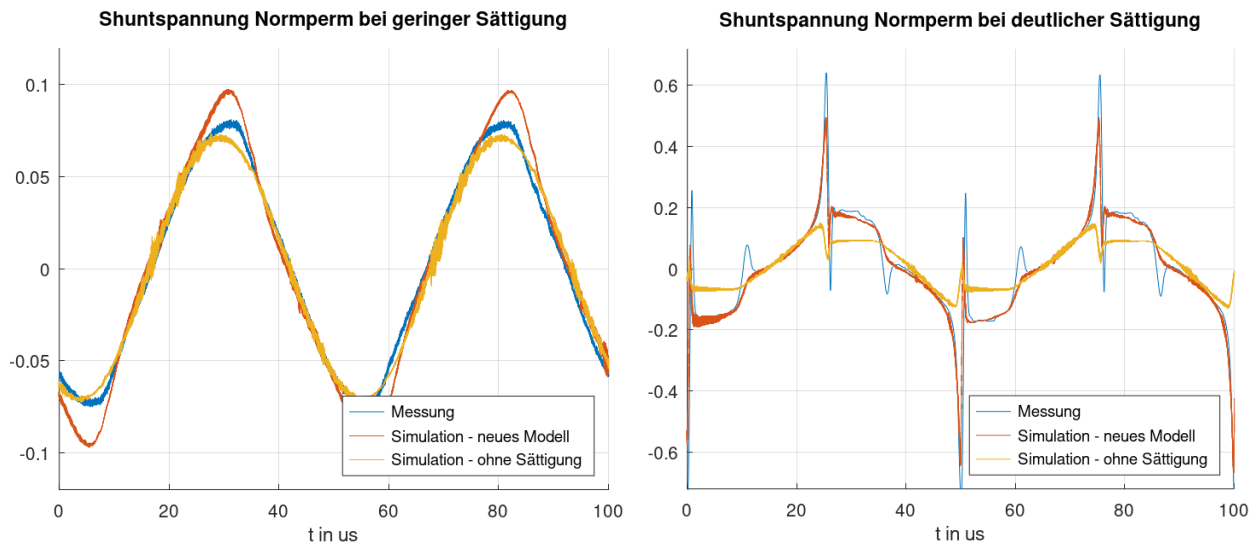


Abbildung 21: Vergleich Messung und Simulation zur Validierung Modellansatz bei geringer sowie deutlicher Sättigung

#### 1.4.7 AP 3.8 Schirmungsmaßnahmen und Systemsicherheit

Tätigkeiten zur Schirmung des Inverters wurden auf Basis des prototypischen Aufbaus von Inverter und E-Motor vorgenommen und umgesetzt. Die Änderungen sind in Abbildung 22 dargestellt und waren nicht nur als konkretes Arbeitspaket gefordert, sondern sind auch für belastbare EMV-Messungen im TAP 7.3 unerlässlich. Geschirmt wurden dabei vor allem die Schnittstellen des Inverters nach außen sowie auch die Schnittstelle der HV-AC Kabel zum E-Motor mittels eigens dafür angefertigter Blenden. Die Schirmanbindung wurde dabei so gestaltet, dass in der EMV-Messumgebung ein definierter Rückstrompfad für Gleichtaktströme zwischen Inverter, E-Maschine und Netznachbildungen besteht.



Abbildung 22: Schirmung Inverterfront (links) und -rückseite mitsamt HVAC-Kabeln und E-Motor-Blende (rechts)

## **1.5 AP 4 Entwicklung und Aufbau einer Belastungsanlage zur Nachbildung der Betriebszustände**

### **1.5.1 AP 4.5 Motormodus (dynamischer Antriebsstrang)**

Belastungstests des entwickelten Umrichters im Motormodus, also als Antriebsumrichter, wurden einerseits beim Projektpartner Breuer durchgeführt, siehe hierzu den Breuer-Schlussbericht, und andererseits bei der IAV am Maschinenprüfstand, siehe hierzu AP 6.4. Des Weiteren wurden Belastungstests als Tiefsetzsteller im Interleave-Verfahren beim Projektpartner BCM aufgebaut und getestet (siehe BCM-Schlussbericht).

## **1.6 AP 5 Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Komponenten und Subsysteme**

### **1.6.1 AP 5.1 Feuchte, Temperatur der SiC-Module**

Die IAV hat in diesem Arbeitspaket die Messungen am BCM begleitet. Weitere Details sind dem Abschlussbericht des BCM zu entnehmen.

### **1.6.2 AP 5.2 Referenz- und Initialmessungen**

Die IAV hat in diesem Arbeitspaket die Messungen am BCM begleitet. Weitere Details sind dem Abschlussbericht des BCM zu entnehmen.

### **1.6.3 AP 5.5 Modelle zur Lebensdauer-Optimierung**

Grundlage war hier das in AP 2.9 entwickelte Gesamtsimulationsmodell, bestehend aus Antrieb-/Integrationssoftware, Sensormodellen und E-Maschinenmodell.

Zur Berechnung der Lebensdauer der SiC-Module wurde die Wirkkette in Abbildung 23 verwendet. Ausgangspunkt ist hier ein definierter Fahrzyklus (Mission Profile). Hierbei wird der WLTP-Zyklus (Übersetzung in etwa *weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Testverfahren*) aus Abbildung 24 verwendet, welcher einen definierten Geschwindigkeitsverlauf über einen Zeitraum von 1800 s vorgibt. Die zurückgelegte Strecke entspricht dabei 23,262 km. Wird dieser Zyklus für die Simulation verwendet, ergibt sich daraus ein zeitlicher Verlauf des Stroms --> Verlustleistung --> Temperatur. Aus der Zeitreihe der Temperatur können mittels Rainflow-Analyse Temperaturzyklen berechnet werden, welche wiederum Eingang in ein Lebensdauermodell finden. Erste Ergebnisse, unter Verwendung eines Lebensdauermodells aus der Literatur, sind in Abbildung 25 dargestellt. Die mögliche Kilometerleistung bis zum Ende der Lebensdauer beträgt 4.190.626 km.

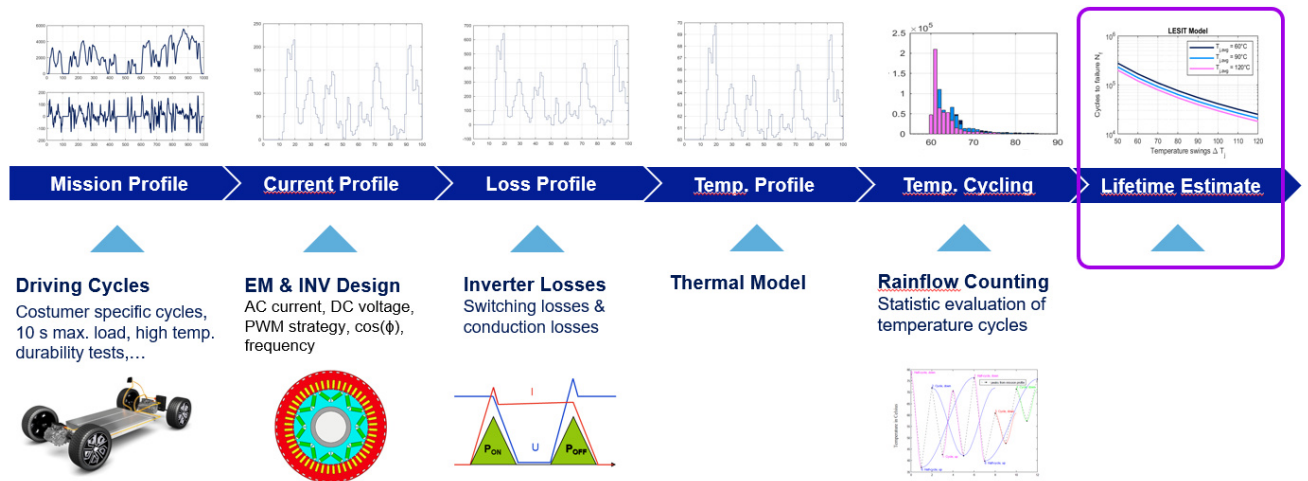


Abbildung 23: Wirkkette Lebensdauersimulation

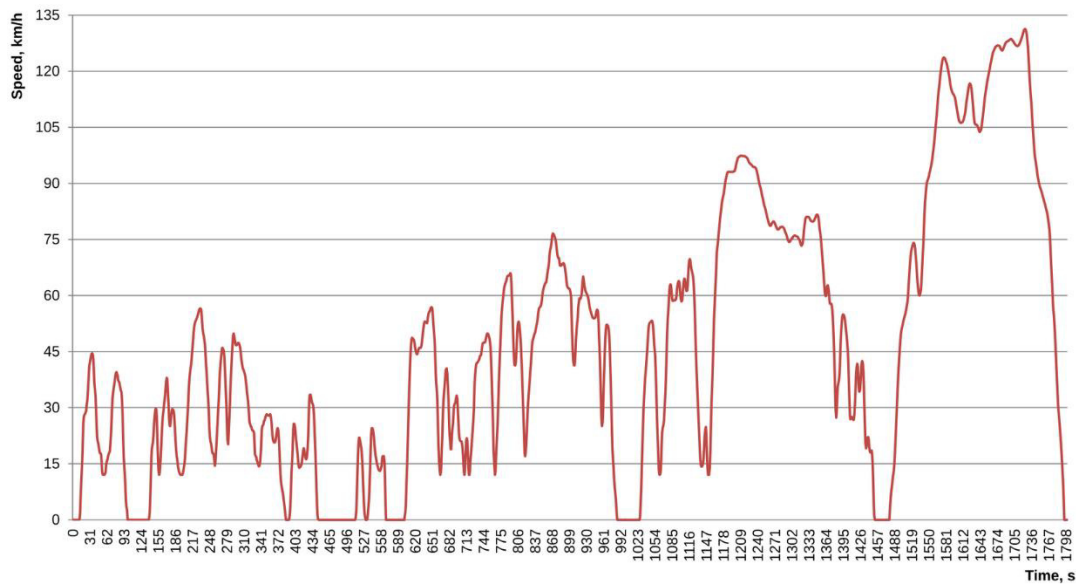
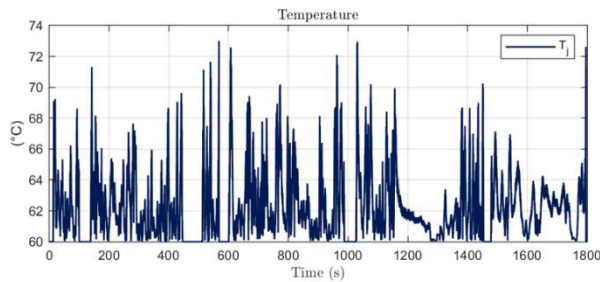


Abbildung 24: WLTP-Zyklus. Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide\\_harmonized\\_Light\\_vehicles\\_Test\\_Procedure#](https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedure#)



Ergebnisse WLTP	Anzahl Temperaturzyklen	462.921
	Lebensdauer-verbrauch	0.000555 %
Extrapolation bis Ausfall	Anzahl WLTP-Zyklen	180149
	Max. Distanz	4.190.626 km

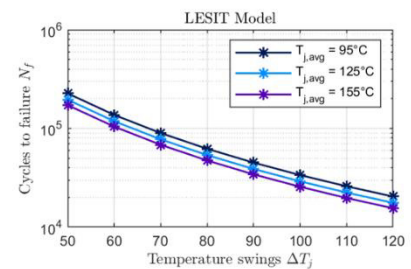
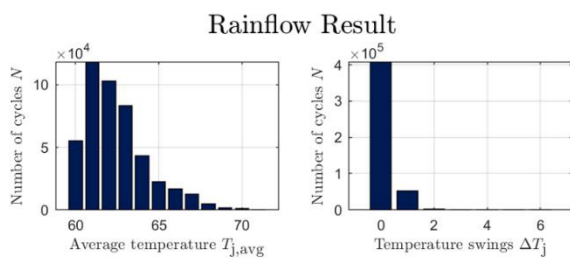


Abbildung 25: Resultierende Temperaturverläufe, Rainflow-Analyse, verbrauchte Lebensdauer

### Lebensdauermodell SiC-MOSFETs

Das verwendete Lebensdauermodell der SiC-MOSFETs war zu Testzwecken der Literatur entnommen. Bei diesem handelt um ein LESIT-Modell (Abbildung 26), welches als Eingang die Durchschnittstemperatur  $T_{j,avg}$  und den Temperaturhub  $\Delta T_j$  der Leistungshalbleitersperrschicht verwendet. Als Ausgang liefert dieses Modell für die Kombination  $(T_{j,avg}, \Delta T_j)$  die maximal mögliche Anzahl an Schaltzyklen  $N_f$  bis zum Ausfall des Leistungshalbleiters.

Zur Parametrierung eines solchen Modells an die tatsächlich verwendeten SiC-MOSFETs sind sogenannte Power-Cycling-Tests notwendig. In diesen werden die entsprechenden Leistungsschalter bei unterschiedlichen  $(T_{j,avg}, \Delta T_j)$  Kombinationen bis zum Ausfall betrieben, um Stützstellen für das Lebensdauermodell zu generieren (Abbildung 27).

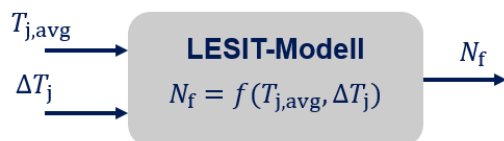


Abbildung 26: LESIT Lebensdauermodell für Leistungshalbleiter

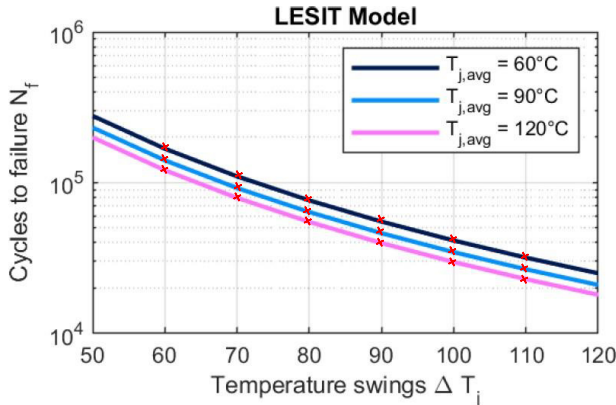


Abbildung 27: LESIT Lebensdauermodell mit Stützstellen (Rot)

Im Rahmen eines Workshops mit dem Projektpartner BCM wurde diskutiert, inwiefern solche Power-Cycling Test im Rahmen des Projekts mit den eingesetzten SiC-MOSFETs möglich ist. Dabei stellte sich heraus, dass, um statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten, ca. 6-12 Leistungsmodule getestet (und damit zerstört) werden müssen. Da die die Projektpartner nicht über die notwendige Anzahl an freien (nicht weiter benötigten) Leistungsmodule verfügen, wurde entschieden keine Power-Cycling Tests durchzuführen. Als Alternative wurden daher folgende zwei Optionen diskutiert:

1. Anfrage beim Hersteller der SiC-MOSFETS (Mitsubishi) bzgl. eines geeigneten Lebensdauermodells
2. Verwendung und ggf. Anpassung von Modellen aus der Literatur

Die Projektpartner waren sich einig, dass zunächst Option 1 verfolgt werden soll. Falls dies nicht zum Erfolg führt, sollte Option 2 verfolgt werden.

Daraufhin kontaktierte IAV den Hersteller Mitsubishi, welcher, nach Aushandlung und Unterschreibung einer entsprechenden Geheimhaltungsvereinbarung, ein Lebensdauermodell bereitgestellt hat. Aus Gründen der Geheimhaltung wird auf das Modell an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

**1.7 AP 6 Optimale Betriebsstrategien für SiC-Umrichter in den Anwendungsbereichen**

**1.7.1 AP 6.1 Kommunikationsschnittstellen Motor/Batterie**

Im Rahmen von TAP 6.1 wurden die erforderlichen Kommunikationsschnittstellen für den Antriebsumrichter gemeinsam mit den Projektpartnern abgestimmt. In enger Zusammenarbeit mit der Firma Breuer konnten sämtliche notwendigen Schnittstellen spezifiziert werden. Dies umfasst die MABX, die Adapterplatine, die Gatetreiber-Platine sowie die Platine zur Zustandsüberwachung. Alle relevanten Signale wurden anschließend vollständig in der Ansteuerungssoftware implementiert. Abbildung 28 zeigt einen Auszug aus der erstellten Signalliste.

Single-Ended Analogeingänge:				SAMTEC T2M-105-01-L-D-RA-WT	
AIN_PWR_0	Temperatursensor Modul 1	X1000		1	
AIN_PWR_1	Temperatursensor Modul 2	X1000		2	
AIN_PWR_2	Temperatursensor Modul 3	X1000		3	
AIN_PWR_5	Zwischenkreisspannungsmessung	X1000		6	
AVCC_PWR	Analog Versorgung Endstufe (5V/50mA)	X1000		7	
AVCC_PWR	Analog Versorgung Endstufe (5V/50mA)	X1000		9	
AGND	Masse	X1000		8	
AGND	Masse	X1000		10	

Abbildung 28: Auszug aus der Signalliste. Analogeingänge der Inverter.

### 1.7.2 AP 6.2 Umsetzung Ansteuerelektronik und Modulator

In diesem Arbeitspaket wurde eine belastungsoptimale Betriebsstrategie entwickelt, welche den Pulswechselrichter online im Betrieb so ansteuert, dass auch die Lebensdauer gezielt beeinflusst werden kann. Hierzu war zum einen eine Temperaturberechnung der SiC-Module notwendig, als auch eine Derating-Funktionalität (z.B. Anpassung von Stromgrenzwerten).

#### Konzept

Im Folgenden wird ein Konzept einer belastungsoptimalen Betriebsstrategie vorgestellt. Wie in Abschnitt 1.6.3 dargestellt, wird die Lebensdauer der SiC-Module maßgeblich von deren Durchschnittstemperatur  $T_{j,avg}$  und dem Temperaturhub  $\Delta T_j$  beeinflusst. Daher ist die Regelung bzw. Begrenzung dieser das Ziel der belastungsoptimalen Betriebsstrategie. Das Konzept besteht im Wesentlichen aus

- einer Vorausberechnung/Prädiktion der durchschnittlichen Sperrschichttemperatur  $T_{j,avg}$  und des Temperaturhubs  $\Delta T_j$  für eine Stromperiode am Anfang der Stromperiode,
- der Regelung von  $T_{j,avg}$  und  $\Delta T_j$  auf bzw. unter vorgegebene Sollwerte mit den
- Stellgrößen max. Drehmoment (bzw. max. Strom) und Schaltfrequenz  $f_{sw}$ .

Hierzu werden folgende Komponenten benötigt:

- Das Prädiktionsmodell der durchschnittlichen Sperrschichttemperatur  $T_{j,avg}$  und des Temperaturhubs  $\Delta T_j$  für eine Stromperiode
- Berechnung der durchschnittlichen Verlustleistung  $P_v$  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 in Abbildung 29 dargestellt. Die einzelnen Komponenten und erste Teilergebnisse werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt.

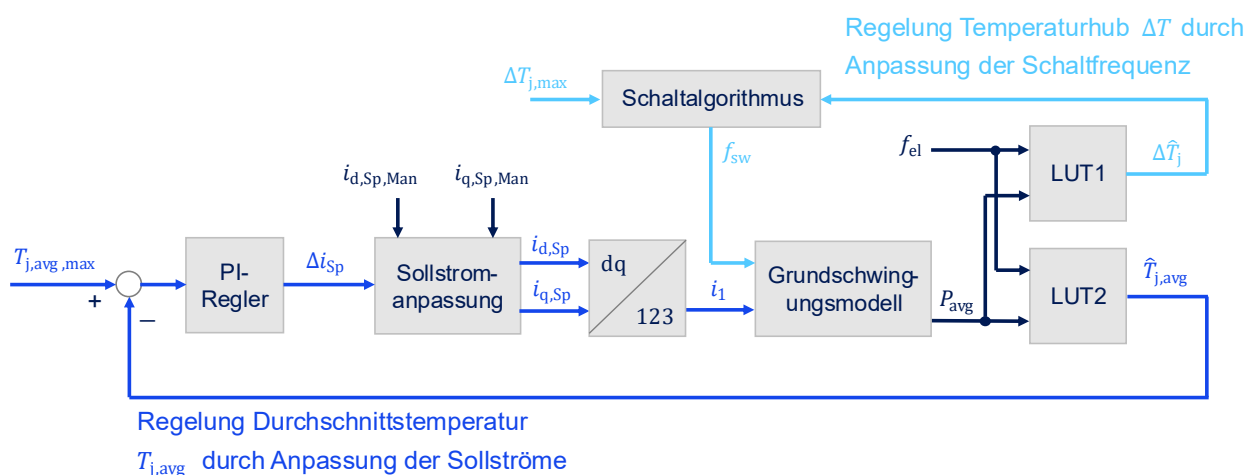


Abbildung 29: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Blockschaltbild

#### Verlustleistungsmodell für eine Grundschwingungsperiode

Gemäß Abbildung 29 werden die Temperaturen des Prädiktionsmodells auch als Funktion der durchschnittlichen Verlustleistung  $P_v$  bzw.  $P_{v,avg}$  für eine Stromperiode berechnet. Entsprechend wird ein Modell benötigt, dass diese berechnet.

Bei diesem Modell (wie auch z.B. bei einem Verlustleistungsmodell auf Schaltperiodenebene) ergibt sich die Verlustleistung aus der Summe von Schalt- und Durchlassverlusten

$$P_{v,avg} = P_{v,avg,sw} + P_{v,avg,fw} \cdot$$

### Schaltverluste

Die Schaltverluste für eine Grundswingungsperiode basieren auf den Gleichungen für eine Schaltperiode in Bereich  $0 < d_{cyc} < 1$  (sonst fallen keine Schaltverluste an) und ergeben sich zu

$$P_{v,avg,sw} = \frac{f_{sw}}{\pi} \cdot (E_{on}(\hat{i}, T_{j,avg}) + E_{off}(\hat{i}, T_{j,avg}))$$

mit Stromamplitude  $\hat{i}$ , Durchschnittstemperatur  $T_{j,avg}$ , Ein- und Ausschaltenergien  $E_{on}(\cdot)$  und  $E_{off}(\cdot)$  aus dem Datenblatt. Da die Eingänge Stromamplitude und Durchschnittstemperatur sich jeweils zu Beginn einer jeden Stromperiode ändern, ändert sich auch die entsprechende Verlustleistung zu diesen Zeitpunkten.

### Durchlassverluste

Die Durchlassverluste lassen sich mit

$$P_{v,avg,fw} = r_s \cdot \hat{i}^2 \cdot (k_{2,S} + k_{2,D})$$

$$k_{2,S} = \frac{1}{8} + \frac{M \cos(\varphi)}{3\pi}$$

$$k_{2,D} = \frac{1}{8} - \frac{M \cos(\varphi)}{3\pi} + \frac{\sqrt{3} M \cos(3\varphi)}{40\pi^2}$$

berechnen, wobei die Gleichungen für die Faktoren  $k_{2,S}$  und  $k_{2,D}$  für das SVPWM-Modulationsverfahren gelten.

### Simulationsergebnisse:

In Abbildung 30 (oben) sind Zeitreihen dargestellt, in denen der Ausgang des Grundswingungsmodells mit dem Ausgang des in der Software implementierten Schaltperiodenmodells zur Verlustleistungsberechnung verglichen wird. Wie zu sehen ist, funktioniert das Grundswingungsmodell, wobei die resultierende Verlustleistung leicht überschätzt wird. Qualitativ dasselbe Verhalten ergibt sich bei den resultierenden berechneten Temperaturen Abbildung 30 (unten).

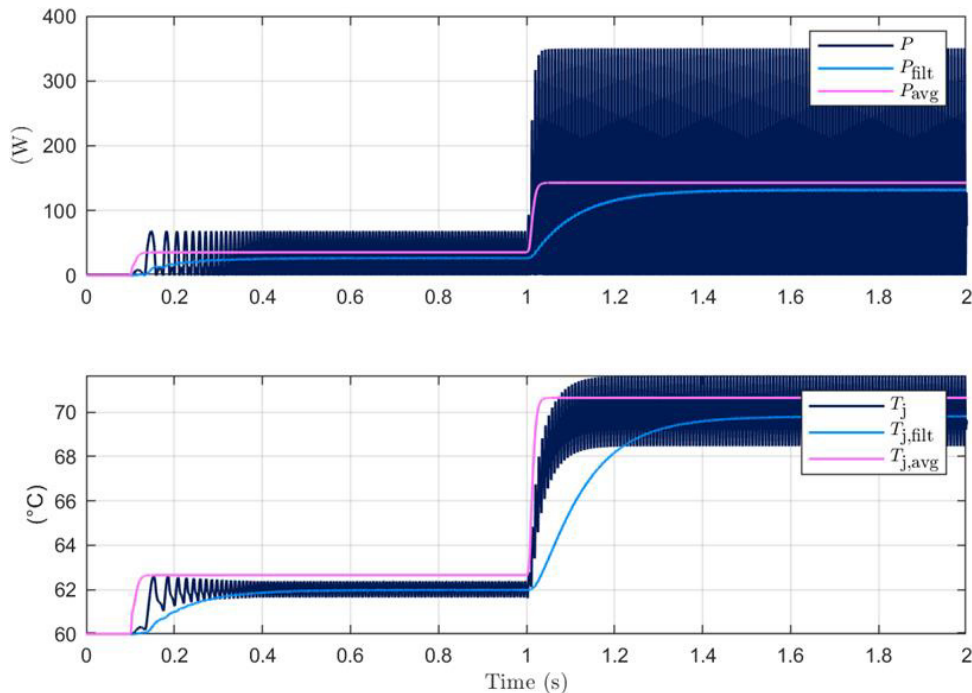


Abbildung 30: Vergleich Grundswingungsmodell mit Schaltperiodenmodell: Verlustleistung des Grundswingungsmodells ( $P_{avg}$ ), Verlustleistung des Schaltperiodenmodells ( $P$ ) und gefiltert ( $P_{filt}$ )

### Temperaturprädiktionsmodell

Basierend auf der durchschnittlichen Verlustleistung  $P_{v,avg}$  für eine Stromperiode und der elektrischen Frequenz  $f_{el}$  sollen Prädiktionswerte für die durchschnittliche Sperrschichttemperatur  $T_{j,avg}$  und des Temperaturhubs  $\Delta T_j$  für eine Stromperiode berechnet werden, d.h., es müssen folgende funktionale Zusammenhänge bestimmt werden:

$$T_{j,avg} = f_1(f_{el}, P_{v,avg})$$

$$\Delta T_j = f_2(f_{el}, P_{v,avg})$$

Die Funktionen  $f_1(\cdot)$  und  $f_2(\cdot)$  sollen als Lookup-Tabellen approximiert werden. Zu diesem Zweck wurde eine eigene Simulation mit einem Verlustleistungs- und Temperaturmodell auf Schaltperiodenebene erstellt (Abbildung 31). In dieser Simulation wurden insbesondere  $f_{el}$  und die Stromamplitude  $\hat{i}$  variiert. Unterschiedliche Kombinationen von  $(f_{el}, \hat{i})$  führen dann zu unterschiedlichen durchschnittlichen Verlustleistungen  $P_{v,avg}$ , durchschnittlichen Sperrschichttemperaturen  $T_{j,avg}$  und Temperaturhuben  $\Delta T_j$ . Diese Werte wurden für jeden stationären Betriebspunkt gespeichert, woraus wiederum die gesuchten Lookup-Tabellen erstellt werden konnten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt.

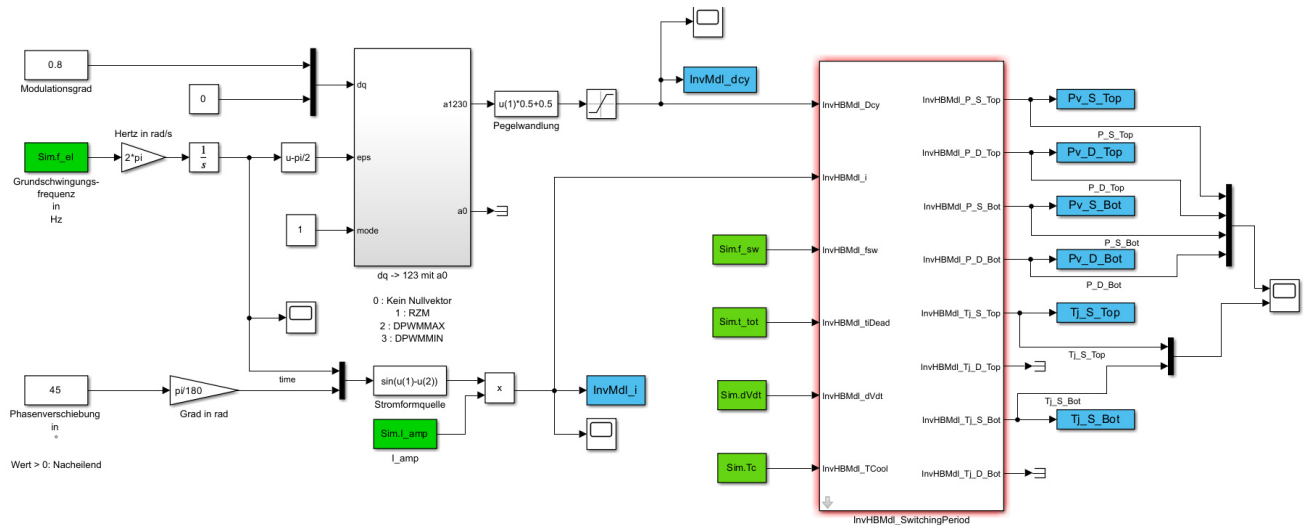


Abbildung 31: Simulation zur Generierung des Temperaturprädiktionsmodell

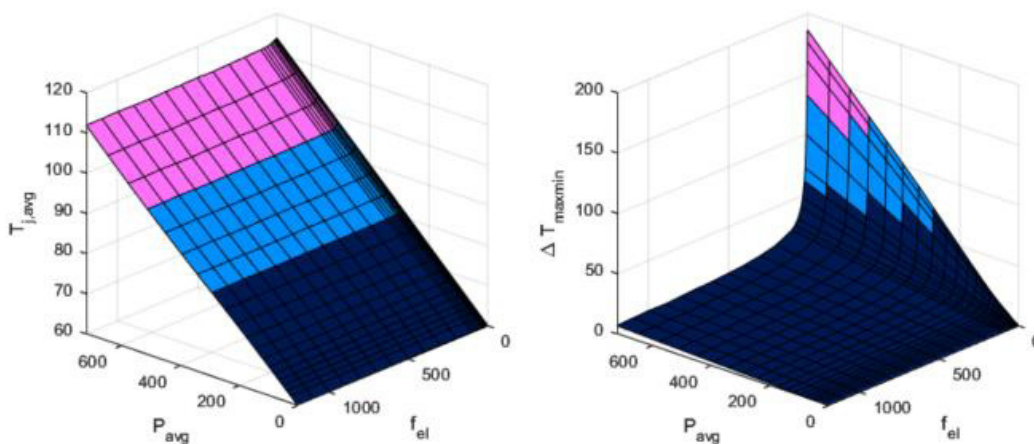


Abbildung 32: Lookup-Tabellen der prädiktiven Temperaturen

### Schaltalgorithmus

Der Schaltalgorithmus wird im Wesentlichen durch die Vorschrift

$$f_{sw}(k + 1) = \frac{\Delta T_{j,sp}}{\Delta T_j(k)} f_{sw}(k)$$

realisiert, wobei  $k$  der aktuelle diskrete Zeitschritt ist,  $\Delta T_j(k)$  der zum aktuellen Zeitschritt prädizierte Temperaturhub und  $\Delta T_{j,sp}$  der vorgegebene Temperaturhubsollwert. Die Schaltfrequenz wird somit verringert, wenn der prädizierte Temperaturhub kleiner als der zugehörige Sollwert ist und erhöht, wenn der prädizierte Temperaturhub größer als der Sollwert ist.

Allerdings kann die Schaltfrequenz nicht beliebig geändert werden, insbesondere nicht hin zu kleinen Werten. Neben der Berechnungsvorschrift sind daher zusätzlich noch folgende Randbedingungen/Beschränkungen für die Schaltfrequenz zu beachten:

1. *Verluste der E-Maschine*

Prinzipiell gilt: Je niedriger  $f_{sw}$ , desto höher die Verluste in der E-Maschine. Deswegen muss  $f_{sw} > 5 \text{ kHz}$  immer gelten. Diese untere Grenze kann angepasst werden.

2. *Signalabtastung*

Damit die Sinusform des Stroms in ausreichendem Maße gegeben ist, soll  $f_{sw} \geq 10f_{el}$  gelten.

3. *DC-Spannungsrippel*

Der DC-Spannungsrippel (-welligkeit) im Zwischenkreis ist auch abhängig von  $f_{sw}$  (je kleiner die Schaltfrequenz, desto größer der Spannungsrippel). Entsprechend muss betriebspunktabhängig eine minimale Schaltfrequenz eingehalten werden damit der Spannungsrippel die zulässigen Grenzen einhält.

Während die Beschränkungen 1. und 2. einfach realisiert werden können, ist die Einhaltung von Beschränkung 3. aufwendiger.

*Einhaltung des DC-Spannungsrippel*

Der DC-Spannungsrippel (-welligkeit)  $\Delta U_{DC}$  hängt im Wesentlichen von der Stromamplitude  $\hat{i}$ , der Schaltfrequenz  $f_{sw}$ , dem  $\cos(\varphi)$  und dem Modulationsgrad  $M$  ab, d.h.,

$$\Delta U_{DC} = f(\hat{i}, f_{sw}, M, \cos(\varphi)) .$$

Die zulässigen Grenzwerte  $\Delta U_{DC,max}$  sind betriebspunktanfällig 16 V oder 32 V. Das bedeutet, dass es für jeden durch  $(\hat{i}, M, \cos(\varphi), \Delta U_{DC,max})$  bestimmten Betriebspunkt eine Schaltfrequenz  $f_{sw,min}$  gibt, ab der  $\Delta U_{DC,max}$  eingehalten wird. Es wird somit eine Abbildung, bzw. Lookup-Tabelle der Form

$$f_{sw,min} = f_{LUT}(\hat{i}, M, \cos(\varphi), \Delta U_{DC,max})$$

benötigt. Zur Erstellung dieser Lookup-Tabelle wurde eine DC-Spannungsrippel-Simulation verwendet (Abbildung 33), welche den Einfluss des Pulswechselrichters auf den Zwischenkreis modelliert.

Die Ergebnisse für verschiedene Phasenströme sind in Abbildung 34 dargestellt.

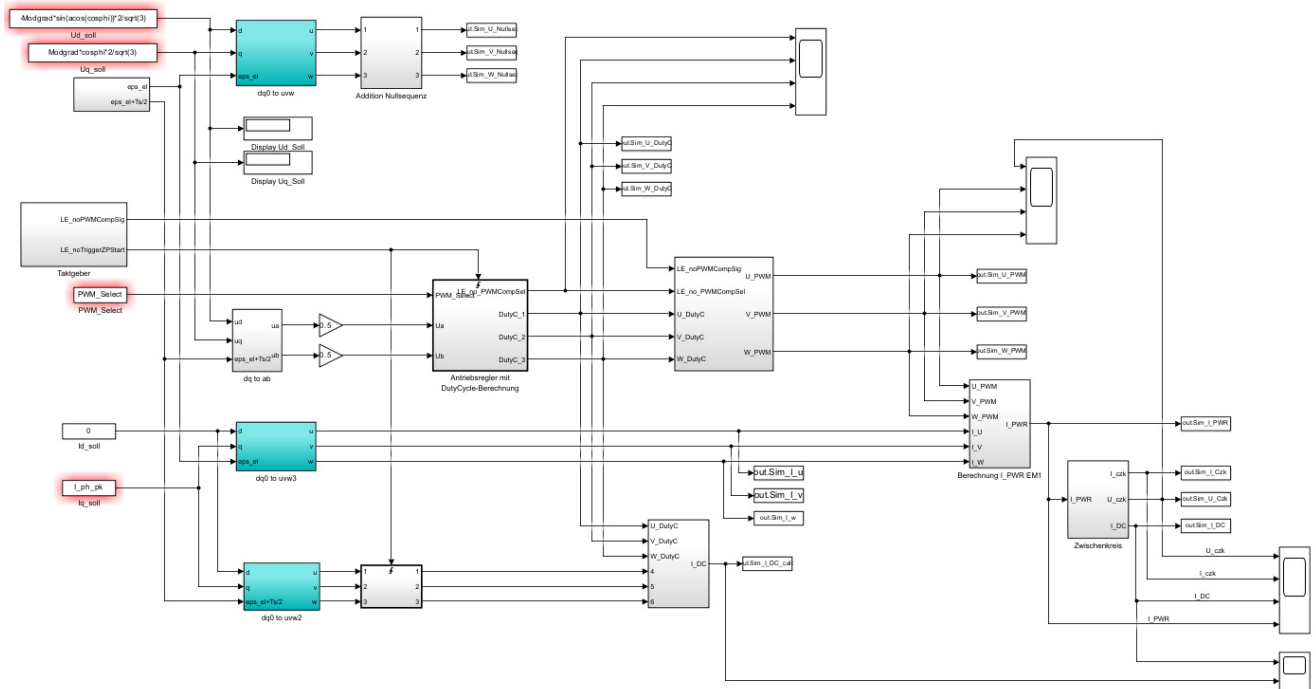


Abbildung 33: Simulation zur Berechnung des DC-Spannungsrippels

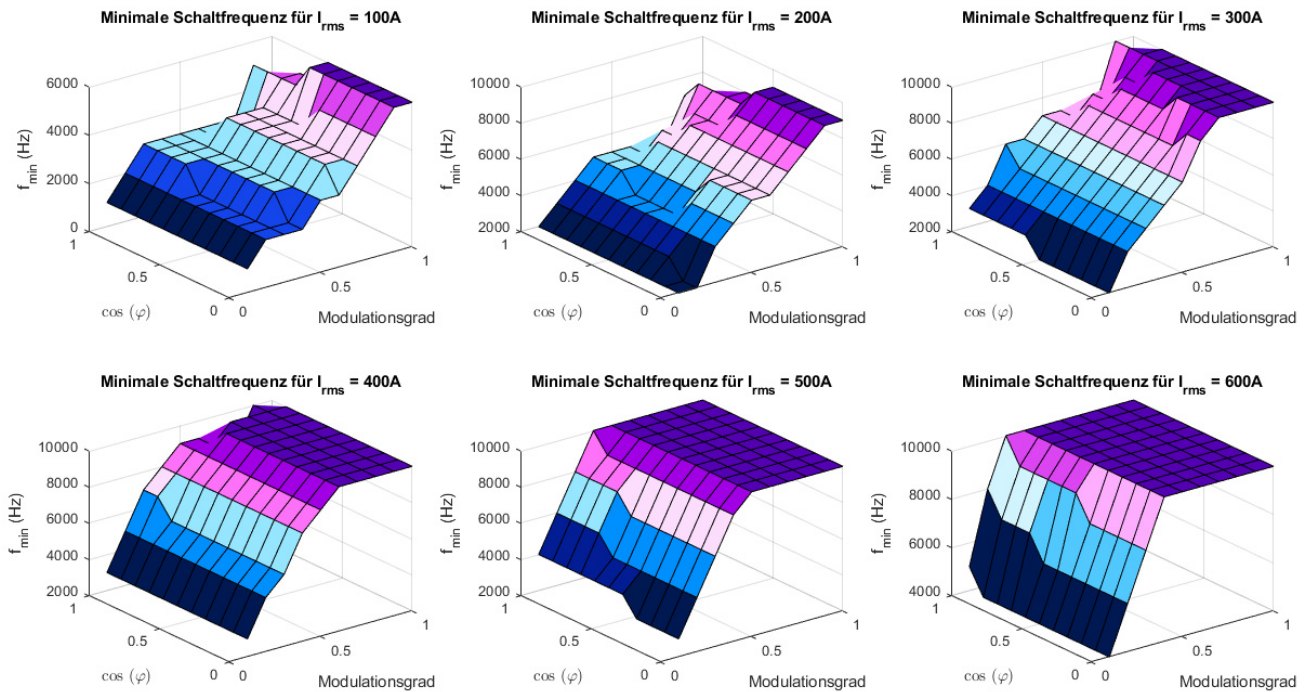


Abbildung 34: Ergebnisse minimale Schaltfrequenz für verschiedene Phasenströme



Erhöhung der Lebensdauer bzw. entsprechend Fahrdistanz um 137 %. Die belastungsoptimale Betriebsstrategie hat also einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer.

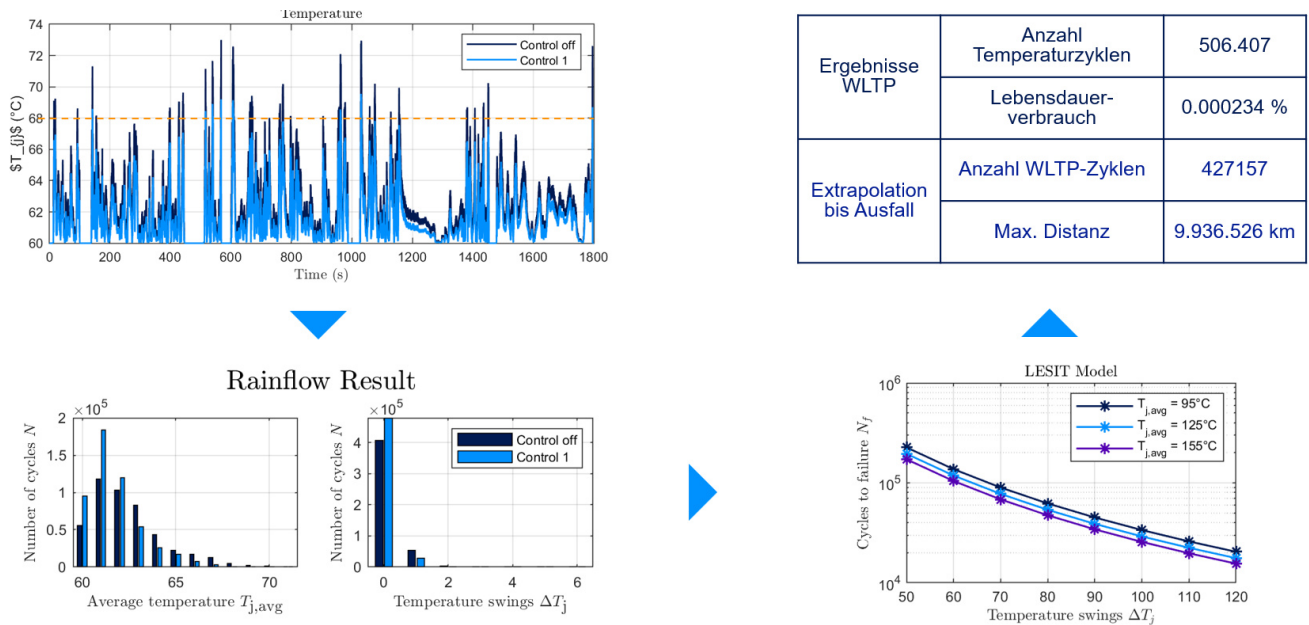


Abbildung 36: Belastungsoptimale Betriebsstrategie – Einfluss auf die Lebensdauer

**1.7.3 AP 6.4 Inbetriebnahme Betriebsführung**

Aufgrund von Lieferschwierigkeiten und dem Insolvenzverfahren des Partners Breuer verzögerte sich die Bereitstellung des Wechselrichter-Prototyps durch Breuer bis Juli 2023, was die geplante Inbetriebnahme auf August 2023 verschob.

Für den geplanten 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. Die fertige Adapterwelle ist in Abbildung 37 dargestellt. In Abbildung 38 ist der Wechselrichter-Prototyp mitsamt E-Motor am Prüfstand abgebildet.

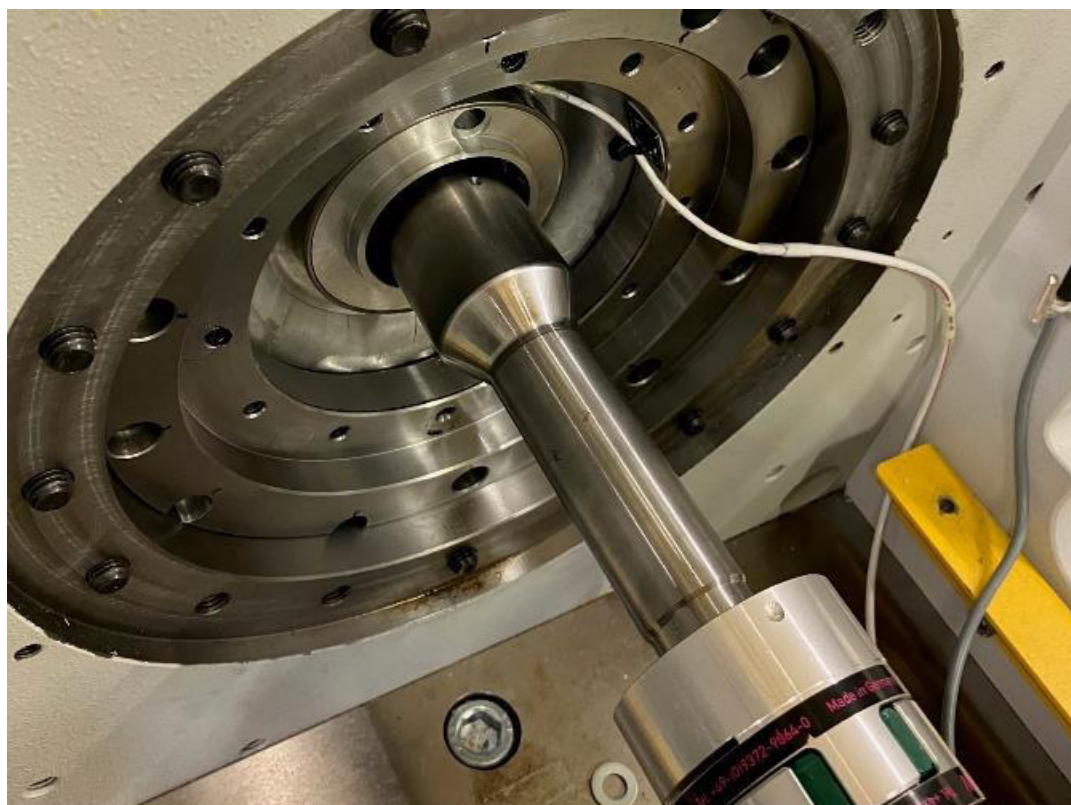


Abbildung 37: Adapterwelle zur Prüfstands-anbindung

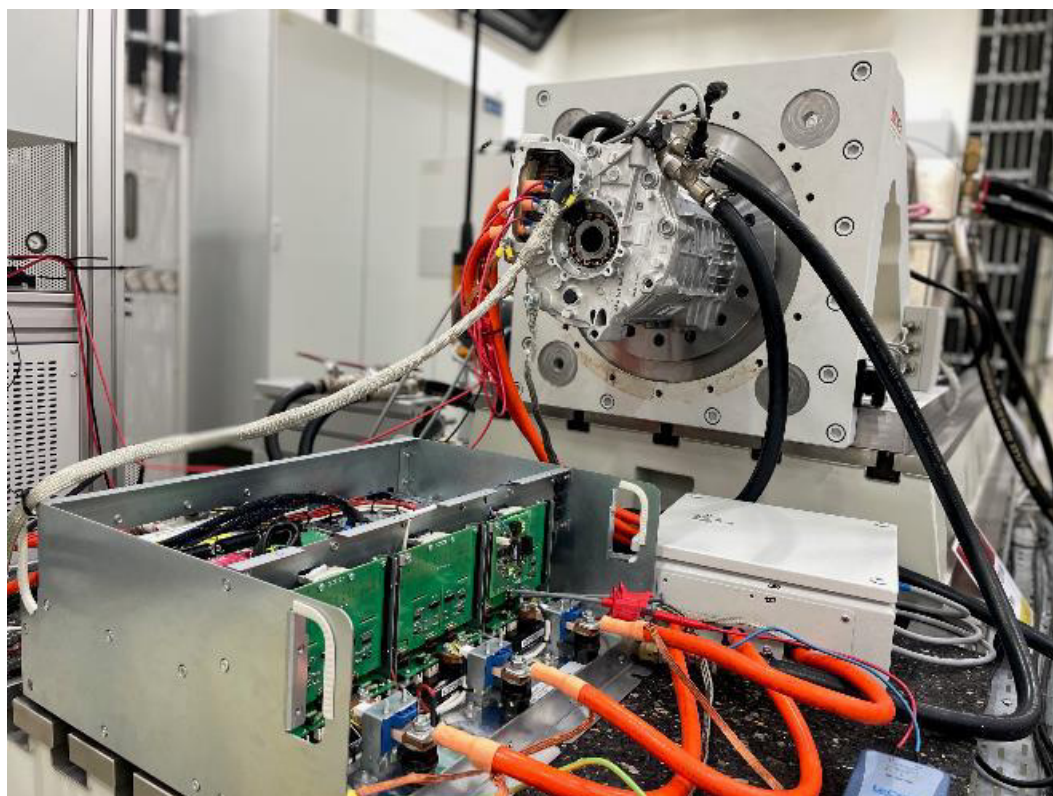


Abbildung 38: Wechselrichter-Prototyp und E-Motor am Prüfstand

Zur Vorbereitung der Inbetriebnahme musste die Software auf das neue Rapid-Prototyping-System (MicroAutobox II von dSPACE) portiert und einzelne Software-Funktionen angepasst werden. Zudem wurden Funktionalitäten zur Auswertung des Rotorlagegebers der elektrischen Maschine ergänzt, um sie an der realen Maschine zu testen. Zu diesen Zwecken wurden in ControlDesk (Experimentier- und Instrumentierungssoftware für Steuergeräte- Entwicklung von dSPACE) entsprechende Bedienoberflächen zur Steuerung der Integrationssoftware und Anzeige aller relevanten Signale erstellt.

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 (Abbildung 39). Parallel hierzu wurden auch die Signale der Prüfstandsautomatisierung aufgezeichnet (z.B. mechanische und elektrische Leistung), siehe Abbildung 41. Weiterhin wurden Temperaturen des Umrichters mitgemessen und überwacht. Zum Abschluss der Messkampagne wurden die Verlustleistungs- und Temperaturmodelle für die Leistungsmodule implementiert und getestet, welche als Basis für die belastungsoptimale Ansteuerung dienen (Abbildung 40).

## Stromregelung: $i_D = -50A$ , Sprünge in $i_Q$

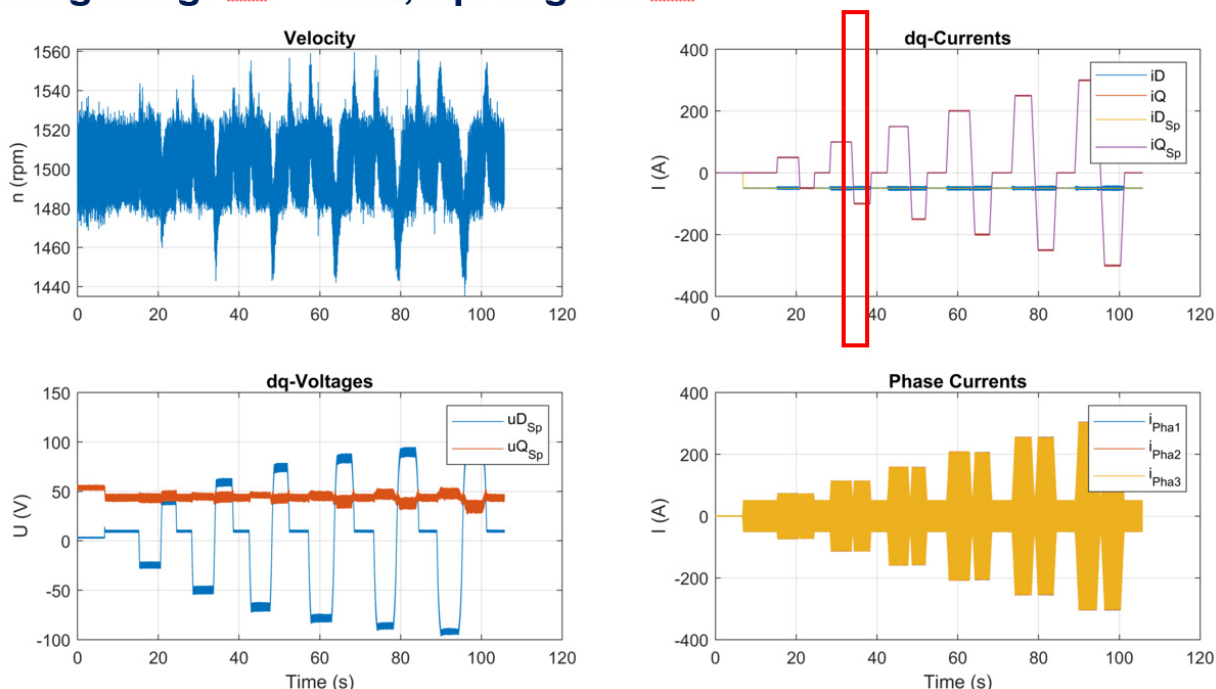


Abbildung 39: Darstellung relevanter Signale der Stromregelung

## Messreihen Parametrierung MOSFET-Modelle

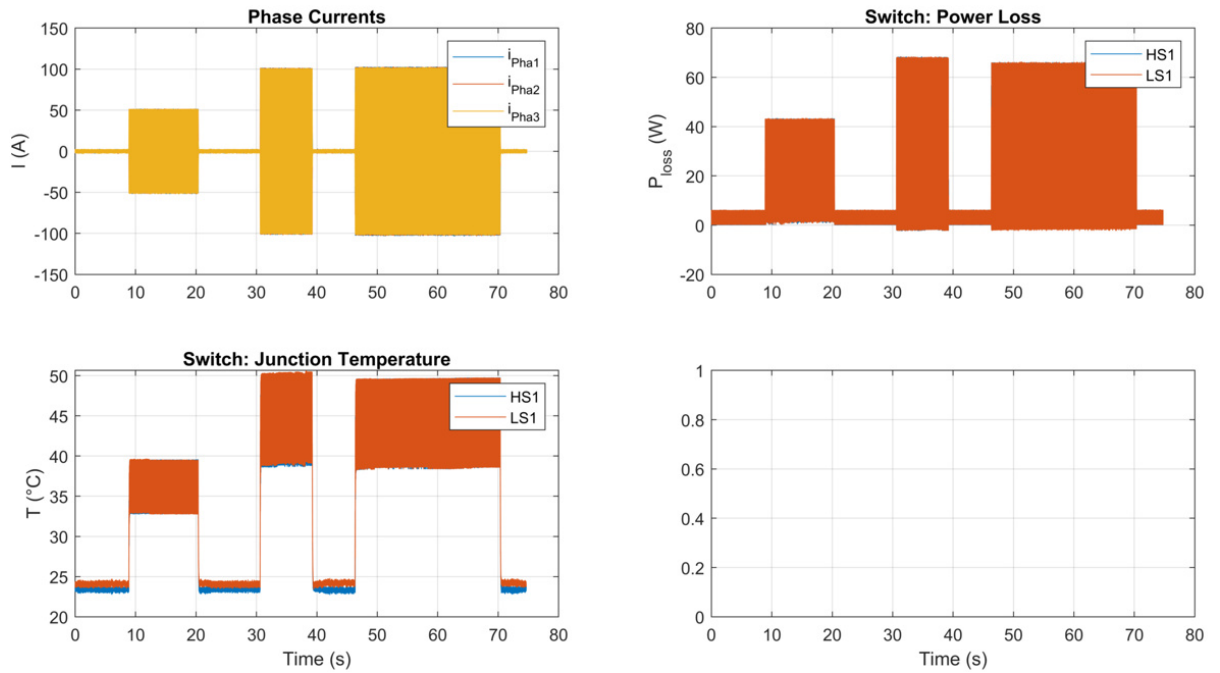


Abbildung 40: Berechnete Verlustleistungen und Temperaturen der SiC-MOSFET-Sperrschichten

## Prüfstand: Messung 01

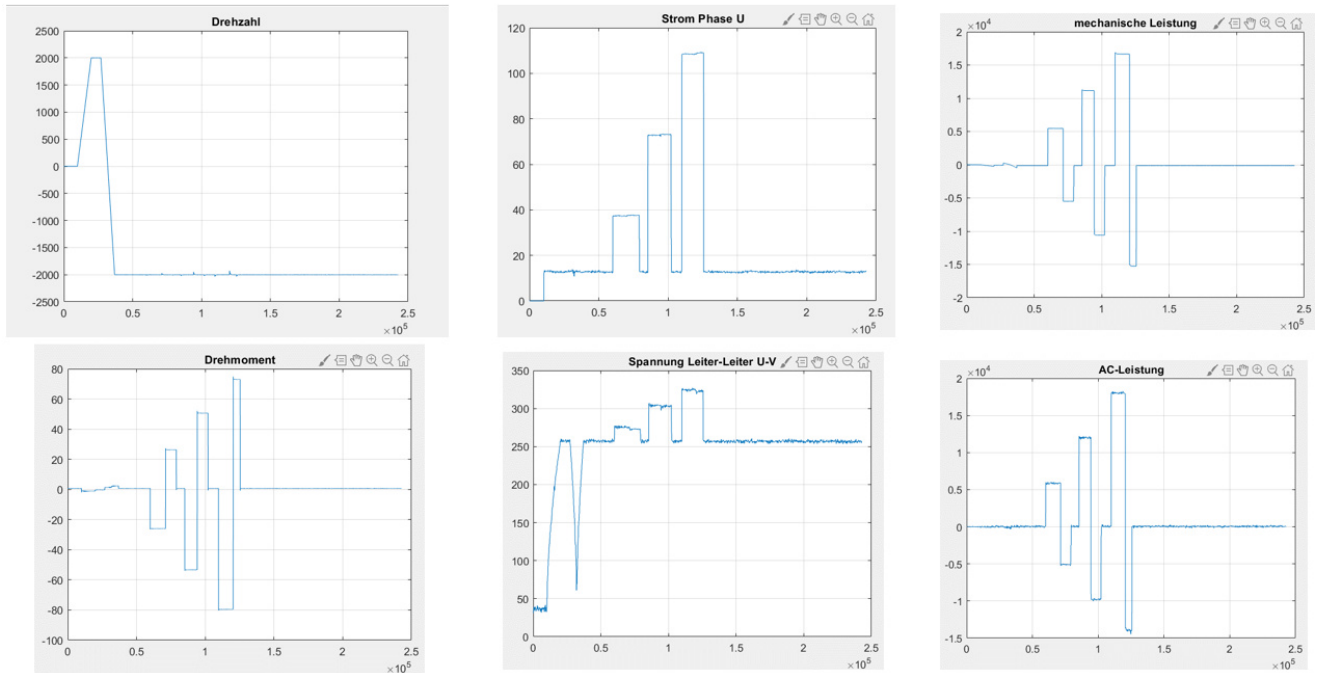


Abbildung 41: Geloggte Signale des Prüfstands

Parallel zur Inbetriebnahme der Ansteuerung, folgte die Inbetriebnahme der Funktionen zur Echtzeitmessung der elektrischen Parameter. Dazu wurde parallel ein Prüfstand für die Schnittstellen- und Softwaretests der Platine aufgebaut (Abbildung 42). 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 Abbildung 43). 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-Signalpegels führte ebenfalls zu einer verbesserten Messgenauigkeit.

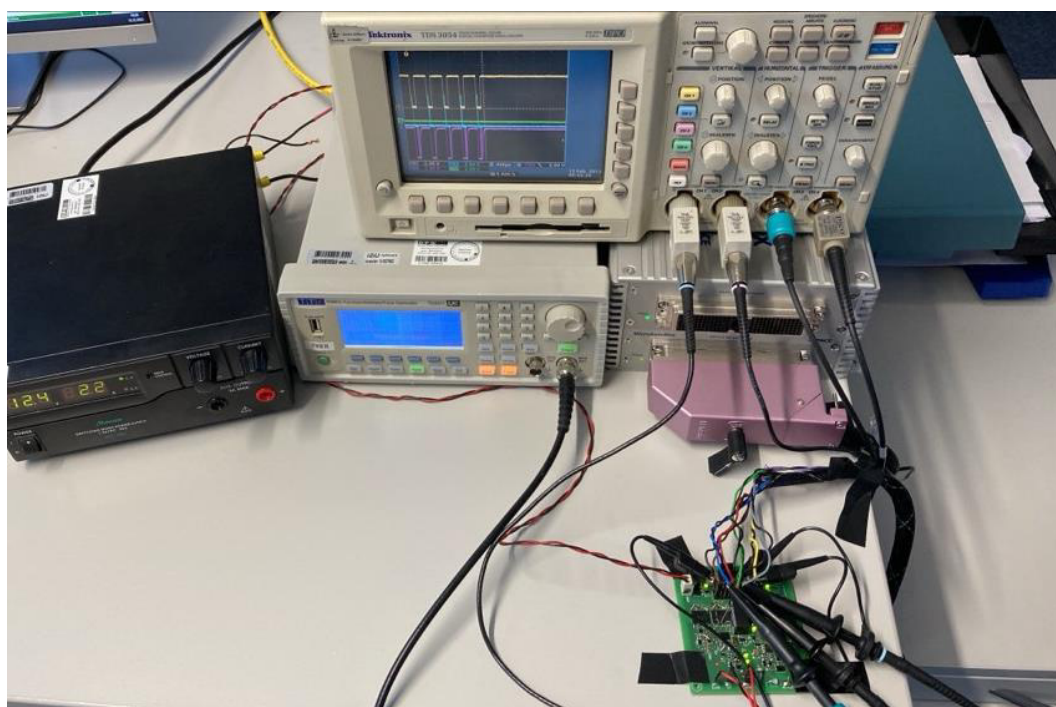


Abbildung 42: Schnittstellen-Test für die Zustandsüberwachung

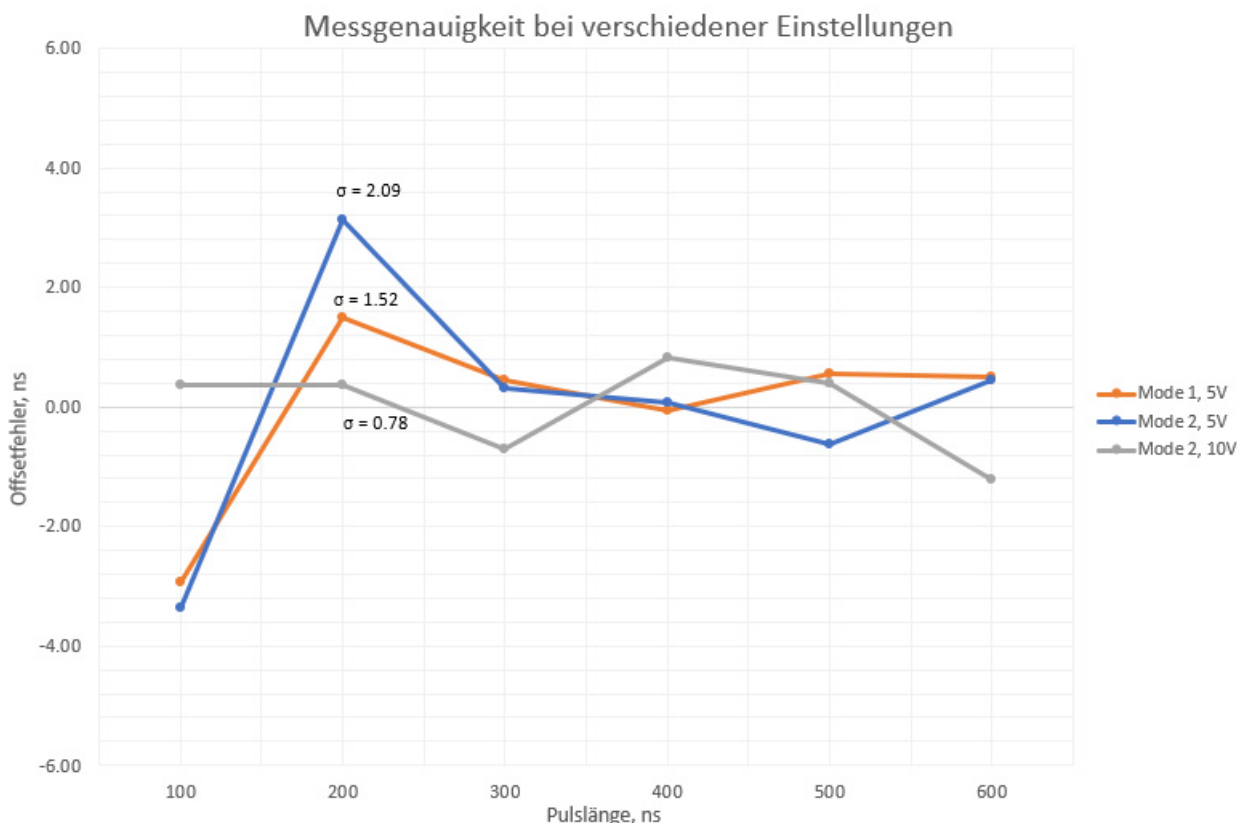


Abbildung 43: Messgenauigkeit der Zeitmessungsschaltung bei verschiedenen Modi und Gate-Spannungen

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

### 1.8.1 AP 7.1 HF-Untersuchungen durch FEM

Da das in TAP 3.7 erstellte Gesamtmodell über alle in TAP 7.3 betrachteten Arbeitspunkte für Vergleiche genutzt wurde, gibt es hinsichtlich der simulierten Störpegel auf den HV-DC Leitungen einen entsprechend großen Fundus an Ergebnissen, der im Kontext des Berichts zu TAP 7.3 für ausgewählte Vergleiche genutzt und somit auch dargestellt wird.

Eine simulative Ermittlung der gestrahlten Emissionen ist mit dem in TAP 3.7 beschriebenen, optimierten Gesamtmodell in Summe möglich, jedoch nicht sinnvoll. Dies liegt daran, dass es nicht möglich ist Daten zur Validierung der exklusiv vom Leistungspfad abgestrahlten Emissionen zu erheben, da in einer entsprechenden Messung immer auch der Niedervoltpfad existiert, der für die Ansteuerung des Inverters zwingend benötigt wird und üblicherweise über Kommunikationssignale im oberen MHz kommuniziert. Dadurch ergeben sich unauflösbare Probleme hinsichtlich der Zuordnung von ermittelten Emissionen, sodass eine Beschränkung auf die geleiteten Störemissionen der einzig sinnvolle Weg ist.

### 1.8.2 AP 7.3 EMV-Untersuchungen und Messungen

Die EMV-Messkampagne erforderte einen Betrieb des Umrichters mit E-Motor am Prüfstand. Zu diesem Zweck wurden sowohl die Integrationssoftware (samt aller Softwaremodule) als auch die Bedienoberfläche von ControlDesk (Experimentier- und Instrumentierungssoftware für Steuergeräte-Entwicklung von dSPACE) überarbeitet. Anschließend wurde der Wechselrichter mit dem E-Motor wieder in Betrieb genommen (Prüfstandsaufbau in Abbildung 44). Hierzu wurden zunächst Softwarefunktionstest außerhalb des EMV-Prüfstands durchgeführt (ohne E-Motor und HV) und anschließend auf dem EMV-Prüfstand, bis beliebige Ströme eingeregelt werden konnten.

Des Weiteren wurde eine Anleitung erstellt, welche alle relevanten Informationen (z.B. Checkliste Ausstattung, Laden der Software auf dSPACE MicroAutobox, Bedienung ControlDesk, Prüfliste) bzgl. der Inbetriebnahme am Prüfstand enthält. Die Prüfliste besteht aus unterschiedlichen Tests zur Verifikation der einzelnen Softwaremodule und deren Funktionen (z.B. korrekte Funktion der Sensoren, der Zustandsmaschine, Fehlerabschaltung, etc.).

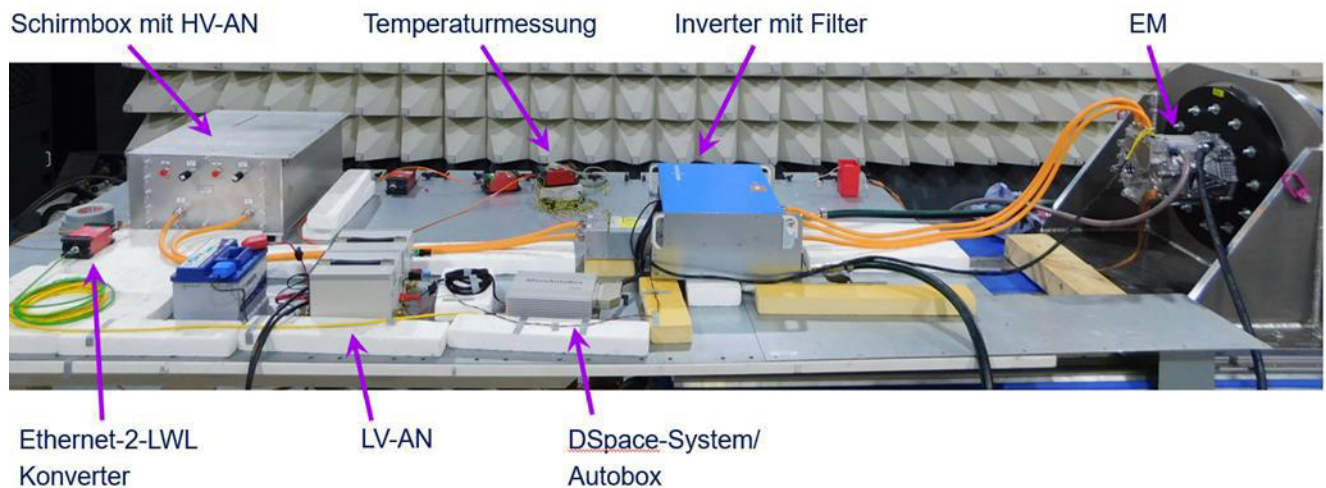


Abbildung 44: Messaufbau im akkreditierten EMV-Labor

Im Zuge der Planung der EMV-Messungen mussten Mechanik-Teile gefertigt werden, nämlich Adapterscheiben und Flansche, die der Montage der E-Maschine auf die EMV-Belastungseinheit „Bluebox“ im EMV-Labor dienen.

Im EMV-Labor wurden sowohl Messungen der geleiteten Störemissionen auf den HV-Leitungen gemäß CISPR 25 als auch Temperaturmessungen an den Ringbandkernen des EMV-Filters realisiert. Da neben den relevanten Arbeitspunkten des Inverters auch verschiedene Permutationen der Ringbandkerne (RBK) im EMV-Filter betrachtet werden mussten (siehe Abbildung 45), umfasste die Messkampagne abzüglich des Einrüstens mehrere Tage. Wie in TAP 3.6 dargestellt, sind im Filter zwei RBK verbaut und es standen je 3 unterschiedliche RBK-Typen zur Verfügung, die sich anhand ihrer Nenn-Permeabilität unterscheiden. Betrachtet wurden nur RBK-Setups, die informativ oder sinnvoll erschienen (gleichartige RBK an beiden Stellen oder wechselweise ein RBK mit höchster und niedrigster Permeabilität). Die unterschiedlichen Arbeitspunkte wurden betrachtet, um eine grundsätzliche Abhängigkeit des Emissionsverhalten von relevanten Einstellgrößen des SiC-Inverters zu ermitteln, nämlich der PWM-Frequenz der Gatesignale sowie Drehmoment und Drehgeschwindigkeit der genutzten E-Maschine (EM).

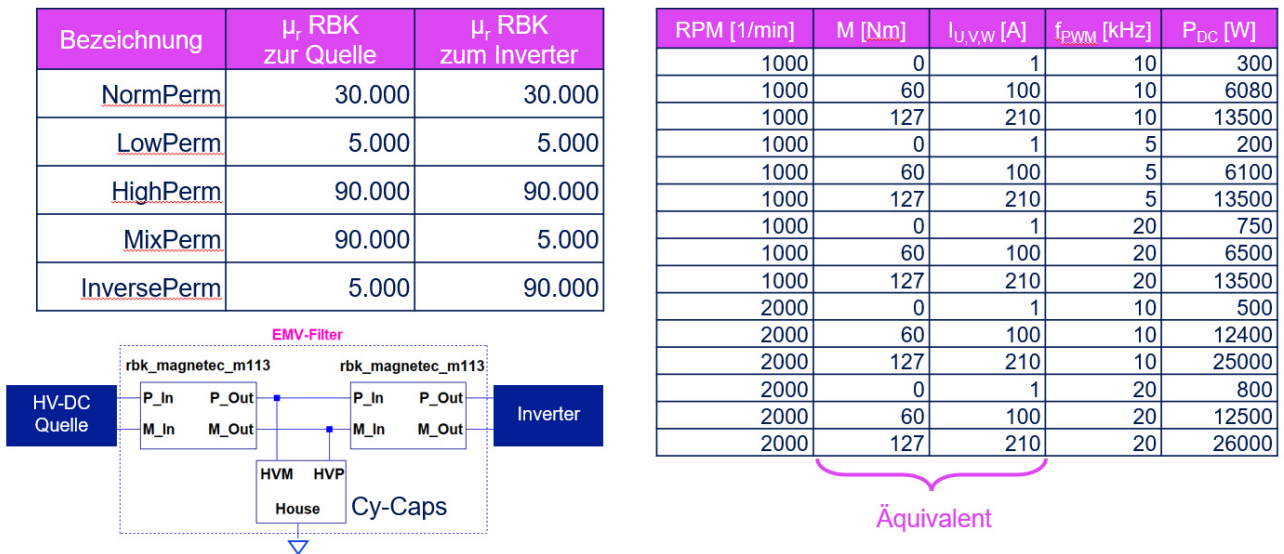


Abbildung 45: Untersuchte Ringbandkernkombinationen (links) und Arbeitspunkte (rechts) der EMV-Messkampagne

Die Störemissionen wurden sowohl mit einem EMV-Messempfänger als auch einem Oszilloskop an den 50-Ohm Messausgängen der HV-Bordnetznachbildungen gemessen. Die Ergebnisse aus der Oszilloskopmessung sind dabei nur bedingt verwertbar, da aufgrund enormer Spannungsspitzen die Auflösung von den restlichen Signalamplituden eher zu grob war.

Für die Temperaturmessung an den im Betrieb befindlichen HV-EMV-Filter in der EMV-Halle wurde eine separate geschirmte Messbox durch IAV aufgebaut und die Datenübertragung zur externen Auswerteeinheit über ein standardisiertes, geschirmtes Ethernetkabel realisiert. Alle relevanten Signale für die Ansteuerung des Inverters wurden durch die sog. Autobox bereitgestellt, wobei deren Kommunikation zum Steuerrechner außerhalb der Messkabine durch eine Lichtwellenleiterstrecke (LWL-Strecke) abgedeckt wurde, um eine Beeinflussung der eigentlichen Messung möglichst zu minimieren.

Nichtsdestotrotz muss angemerkt werden, dass die LV-Leitungen von Autobox zum Control-Board des Inverters durch eine Öffnung in der Inverter-Schirmung geführt werden mussten. Diese Öffnung ist zwar lediglich eine Öffnung zum LV-Teil des Inverters, der seinerseits gegenüber dem HV-Teil weitestgehend abgeschirmt ist (ideale Schirmung nicht möglich), jedoch ist dies de facto eine, wenn auch unvermeidliche, Öffnung des Systems. Was nicht auf dem Foto zu sehen, aber dennoch Bestandteil des Messaufbaus ist, ist die sog. Bluebox des Labors, die als emissionsarme mechanische Abnahme der E-Maschine dient und sowohl motorisch wie generatorisch betrieben werden kann. In den absolvierten Messreihen wurde nur der motorische Betrieb betrachtet, d.h. Leistung wurde über die HV-DC Quelle bereitgestellt und per Inverter an die E-Maschine bzw. die Bluebox durchgereicht, die diese dann umsetzte.

Aufgrund der Vielzahl der erhobenen Messdaten werden nur die für die gewonnenen Erkenntnisse wesentlichen Ergebnisse in diesem Bericht dargestellt. Die Ergebnisse werden dabei dem UN ECE - R10 basierten Grenzwert für den Average-Detektor gegenübergestellt, der im Zuge des TAP 1.2 ermittelt wurde. Wie sich zeigt, hält der Musteraufbau diesen Grenzwert sehr gut und mit etlichen dB Puffer ein.

In Abbildung 46 ist die Abhängigkeit der Emissionen von den Arbeitspunktgrößen PWM-Frequenz und Drehmoment dargestellt. Erwartungsgemäß steigen die Emissionen signifikant mit der PWM-Frequenz an. Bei der Variation des Drehmoments zeigen sich dagegen weniger stark ausgeprägte Unterschiede. Trotzdem gilt auch hier, dass eine Erhöhung des anliegenden Drehmoments tendenziell mit einer Steigerung der Emissionen einhergeht. Insbesondere beim Wechsel vom Zero-Moment-Clocking (Nullmomententaktung) zu einem Arbeitspunkt mit geringer Leistung (60 Nm)

ändert sich der qualitative Verlauf der Emissionen bei ca. 10 MHz. Warum dies so ist, kann derzeit noch nicht gesagt werden, jedoch ist der einzige Unterschied zwischen den Arbeitspunkten, dass bei Anlegen von 60 Nm effektiv ein nennenswerter Strom durch den Inverter fließt, während das Zero-Moment-Clocking faktisch einen vernachlässigbaren DC- wie AC-Strom treibt. Eine Abhängigkeit der Emissionen von der E-Maschinen Drehzahl konnte jedoch nicht festgestellt werden und ist daher auch nicht explizit dargestellt.

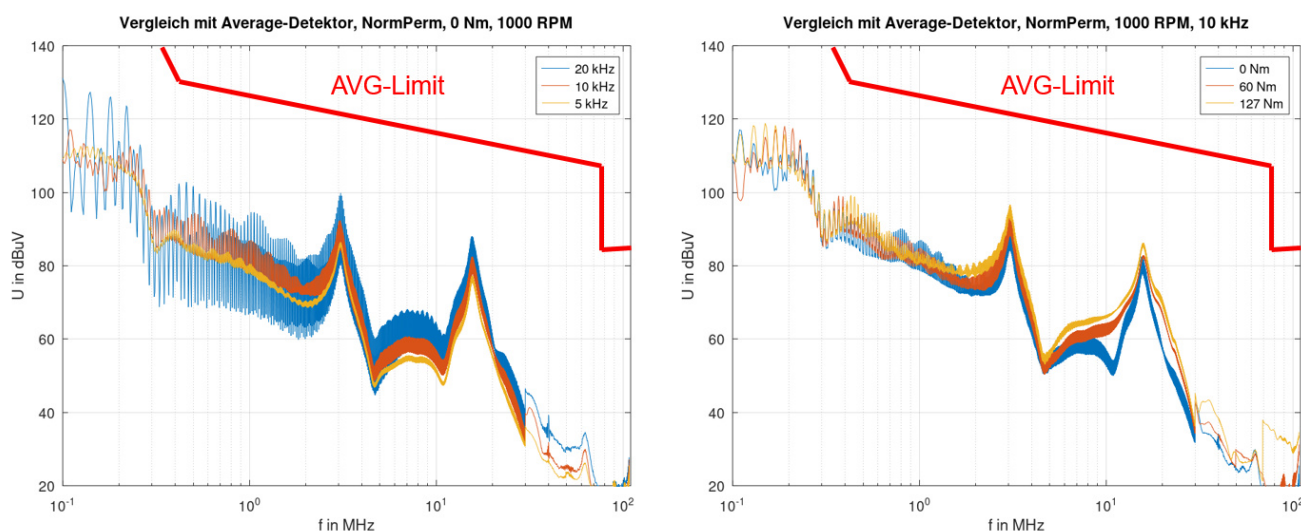


Abbildung 46: Abhängigkeit leitungsgeführte HV-Emissionen von PWM-Frequenz und Drehmoment

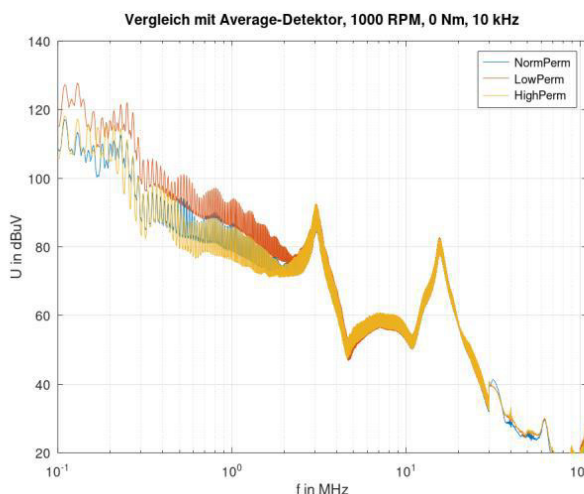


Abbildung 47: Abhängigkeit von RBK-Setup

Ebenso nennenswerte Ergebnisse ergeben sich durch die Permutation der RBK. Wie Abbildung 47 zu entnehmen ist, kann zwar eine Erhöhung der Emissionen festgestellt werden, sobald RBK mit geringer Permeabilität genutzt werden („LowPerm“), jedoch sind die anderen beiden Setups trotz Unterschieden in der Permeabilität nahezu deckungsgleich. Dieser scheinbare Widerspruch zur Filtertheorie deutet auf Sättigungserscheinungen innerhalb der hochpermeablen Ringbandkerne hin, was allerdings anhand dieser Messergebnisse nicht zweifelsfrei nachweisbar ist (keine Information hinsichtlich CM-Stromverlauf auf der HV-DC-Leitung vorliegend). Eine zweite und ebenso relevante Beobachtung ist der Umstand, dass die RBK-Auswahl keinerlei Einfluss mehr auf die Emissionen hat, sobald die Frequenz ca. 2 MHz übersteigt. Da die RBK im betreffenden Frequenzbereich ihr Impedanzmaximum erst noch erreichen, deutet dies darauf hin, dass der Filter als solcher durch

alternative Störausbreitungspfade innerhalb des gesamten Mess-Setups anteilig umgangen wird. Zudem muss berücksichtigt werden, dass sich die Impedanzen der unterschiedlichen Kernvarianten für hohe Frequenz sukzessive annähern, wie in Abbildung 48 dargestellt ist.

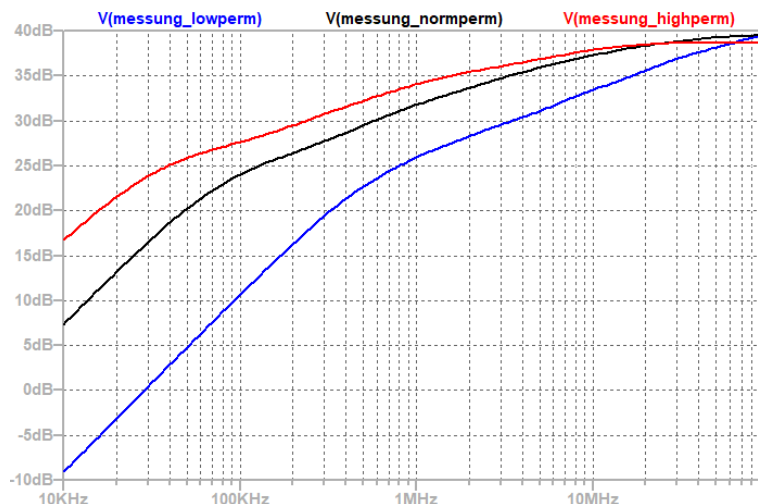


Abbildung 48: Betrag der Impedanz aller Ringbandkernvarianten [Darstellung als impedanzproportionale Spannung]

Zusätzlich zur Auswertung der Messergebnisse, wurden diese zur Validierung des Simulationsmodells des gesamten Umrichters genutzt, wobei in erster Instanz das initiale Gesamtmodell (siehe Abbildung 14) für die Vergleiche herangezogen wurde.

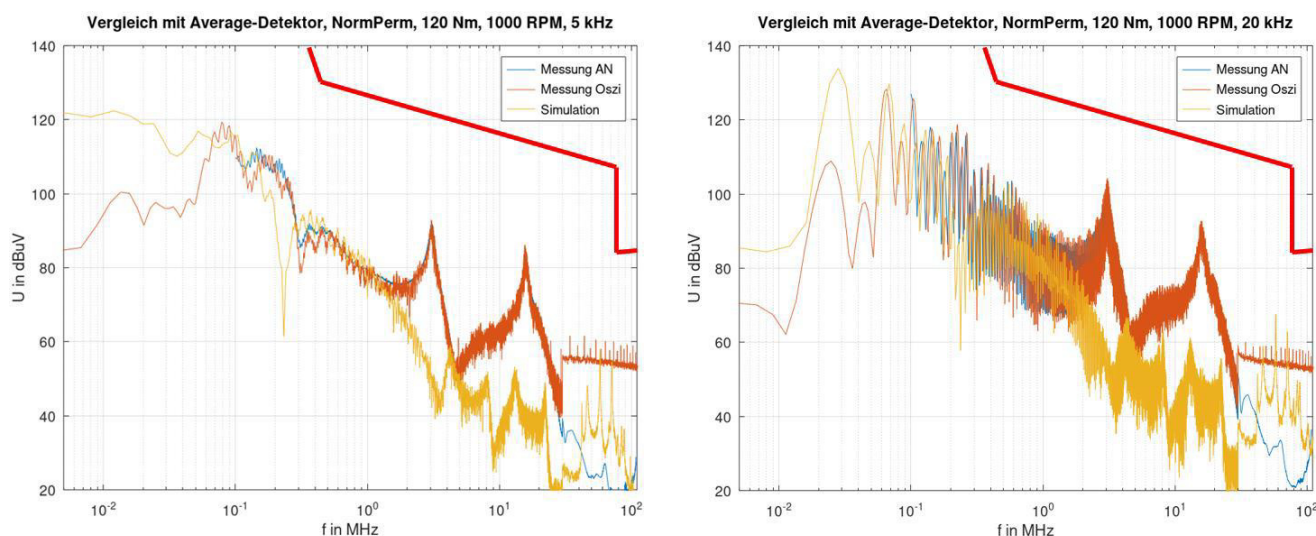


Abbildung 49: Vergleich Messung und Netzwerksimulation Leistungspfad bei unterschiedlichen PWM-Frequenzen

Wie man in Abbildung 49 sieht, ist eine Übereinstimmung der gemessenen Ergebnisse nur bis maximal 2 MHz gegeben, also bis zu dem Punkt, wo nach Abbildung 47 ohnehin ein unerwartetes Verhalten einsetzt, das nicht über die initiale Modellierung des Leistungspfades erklärt werden kann. Zudem zeigen sich, speziell bei Nutzung einer 5 kHz PWM, signifikante Abweichungen für Frequenzen kleiner 100 kHz. Da das Verhalten des Inverters bei derart niedrigen Werten ausreichend durch funktionale Bauteilmodelle wiedergegeben werden kann, liegt aus unserer Sicht eine grundsätzliche Diskrepanz zwischen dem starren PWM-Signal des Simulationsmodells und dem per Regelung erzeugten PWM-Signal aus der realen Messung vor. Leider war eine direkte Ausleitung der vom Inverter real genutzten PWM-Signale nicht möglich.

Nach Anpassungen des Simulationsmodells, wie in TAP 3.7 beschrieben, stellen sich die Ergebnisse deutlich besser dar, denn wie Abbildung 50 zu erkennen ist, passen die Verläufe jetzt qualitativ wie quantitativ im betrachteten Frequenzbereich zusammen. Daher kann an diesem Punkt das entwickelte Halbleitermodell als auch das Gesamtmodell des CISPR-25 Messaufbaus als validiert angesehen werden.

Simulation – weiterentwickeltes Modell

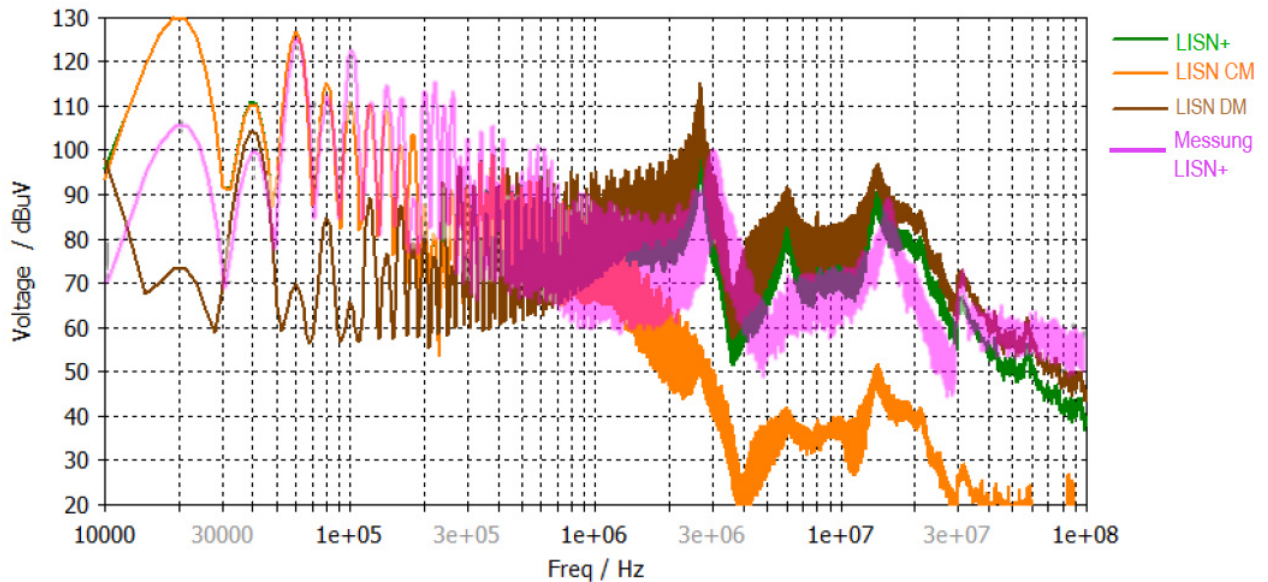


Abbildung 50: Vergleich Störemissionen an HV-Bordnetznachbildung: Messung Vs. optimiertes Simulationsmodell

Neben den Messungen der geleiteten Störemissionen wurde die Messkampagne im EMV-Labor für die parallele Erhebung von Temperaturmessdaten genutzt, um damit das erste Thermiksimulationsmodell gemäß TAP 3.7 zu validieren. Dafür wurde ein CAN-Case sowie eine eigens dafür entwickelte und angefertigte Hardware genutzt, die auf Basis von Messungen an PT1000-Gliedern die Temperatur ermittelt und das Ergebnis für alle Sensoren als CAN-Signal nach außen gibt. Die PT1000-Glieder sind dabei während der Messung mit Klebestreifen an den Ringbandkernen befestigt, die im Filter verbaut wurden (siehe Abbildung 51).

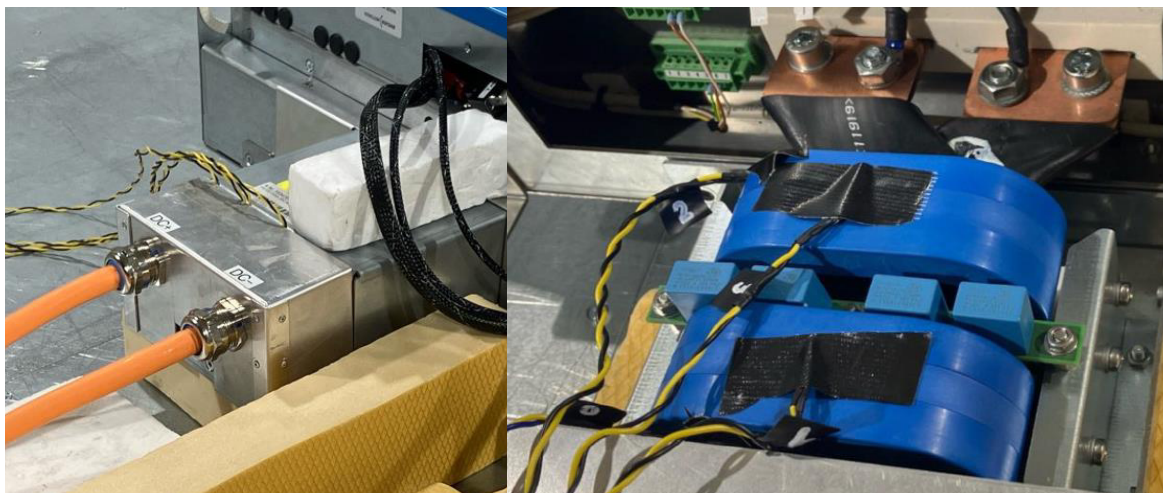


Abbildung 51: EMV-Filter mit ausgeführten Signalleitungen (links) und Befestigung PT1000-Glieder im Filter (rechts)

Leider hat sich im Zuge der Messungen gezeigt, dass die Temperaturen der Ringbandkerne so hoch wurden, dass sich die leicht unter Zugspannung befindlichen PT1000-Glieder mitsamt Klebestreifen abgelöst haben. Dadurch sind die Ergebnisse der erhobenen Temperaturdaten nur teilweise sinnvoll verwertbar. Zudem hat sich im Laufe der Messung herausgestellt, dass die thermischen Zeitkonstanten des Aufbaus unerwartet hoch sind, sodass ein Zeitfenster von 30 Minuten nicht gereicht hat, um die stationäre Temperatur zu erreichen. Trotzdem konnten die erhobenen Daten aus entsprechend langen Messungen genutzt werden, um sie auf eine doppelt exponentielle Funktion zu fitten und somit eine Abschätzung für das zeitliche Verhalten der Erwärmung zu ermitteln. Dieses Verfahren ist exemplarisch für einen der Belastungsfälle mit hohen CM-Strömen bei gleichzeitiger Nutzung hochpermeabler Kerne dargestellt, weswegen die Temperaturen auch deutlich über 100 °C liegen (siehe Abbildung 52).

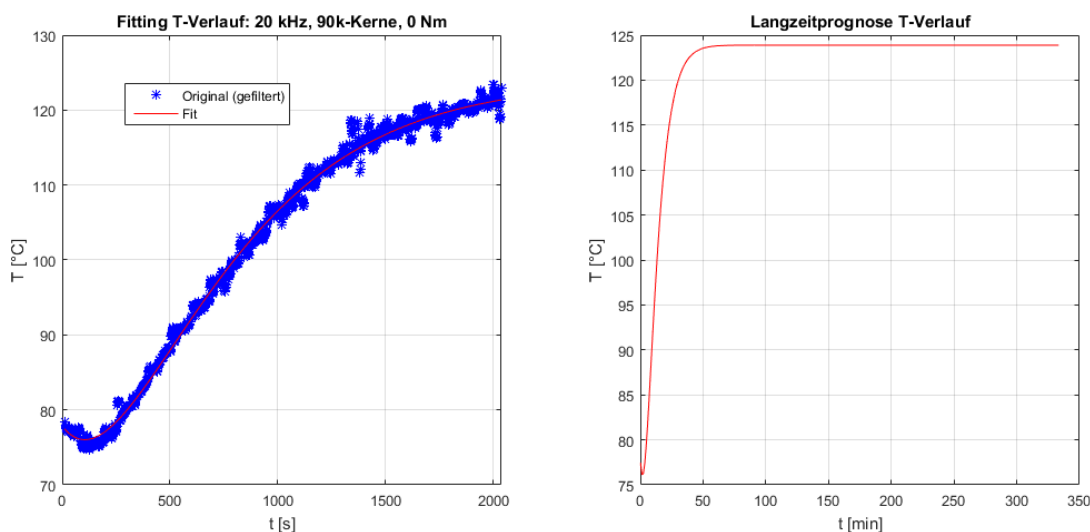


Abbildung 52: Gemessener (links) und erwarteter Temperaturverlauf auf Basis des Fittings (rechts)

Wie im abgebildeten Beispiel dargestellt, konnten in der Messung nicht die hohen Temperaturen reproduziert werden, die vom initialem Thermikmodell prognostiziert wurden, was auch die Motivation zur Erarbeitung des Modells gemäß TAP 3.7 war und ebenfalls den Entwurf der patentierten Messfixtue motiviert hat.

## 1.9 AP 8 Systemoptimierung für Antriebsstrang und Batterieladesystem

### 1.9.1 AP 8.1 Belastungsprüfung SiC-Antriebssystem

Die Belastungsprüfungen des SiC-Umrichters als Traktions-/Antriebsumrichter erfolgten in AP 6.4 und AP 7.3. Weitere Prüfungen waren entweder nicht möglich oder nicht sinnvoll. Nicht möglich war z.B. der Test des Gesamtsystems am Prüfstand mit E-Maschine im Volllastbereich. Dies war bedingt durch die notwendige Adapterwelle für die E-Maschine, welche nur wenige Tausend Umdrehungen pro Minute erlaubte. Maßgeblich für den Umrichter waren jedoch hohe Ströme, welche bei den niedrigen Drehzahlen getestet wurden. Nicht sinnvoll war eine Validierung der in AP 6.2 vorgestellten belastungsoptimalen Betriebsstrategie am Prüfstand. Maßgebliches Ziel dieser Betriebsstrategie war bzw. ist eine Verlängerung der Lebensdauer der SiC-MOSFETs. Dies kann am Prüfstand prinzipiell nicht validiert werden. Die belastungsoptimale Betriebsstrategie basiert auf einer modellbasierten Regelung der Sperrschichttemperatur (Durchschnittstemperatur und Temperaturhub) der SiC-

MOSFETs. Da diese im Umrichter nicht gemessen werden können, war auch hier eine entsprechende Validierung am Prüfstand nicht sinnvoll.

### 1.9.2 AP 8.3 Eigenüberwachung und Selbstdiagnose

Um die Funktionalität des Condition-Monitorings zu untersuchen, wurden zusätzliche Tests durchgeführt. Hierzu wurde die Software weiterentwickelt und optimiert (Abbildung 53) und bietet nun folgende Optionen:

- Erzeugung des Einschaltimpulses an der Gate-Leitung mit einer definierten Pulslänge
- Synchronisieren der Trigger-Signale in Abhängigkeit vom Gate-Puls
- SPI-Schnittstelle für das Programmieren von Messbausteinen
- Messungsstart, Auslesung der Messregister und anschließende Auswertung der Messparameter

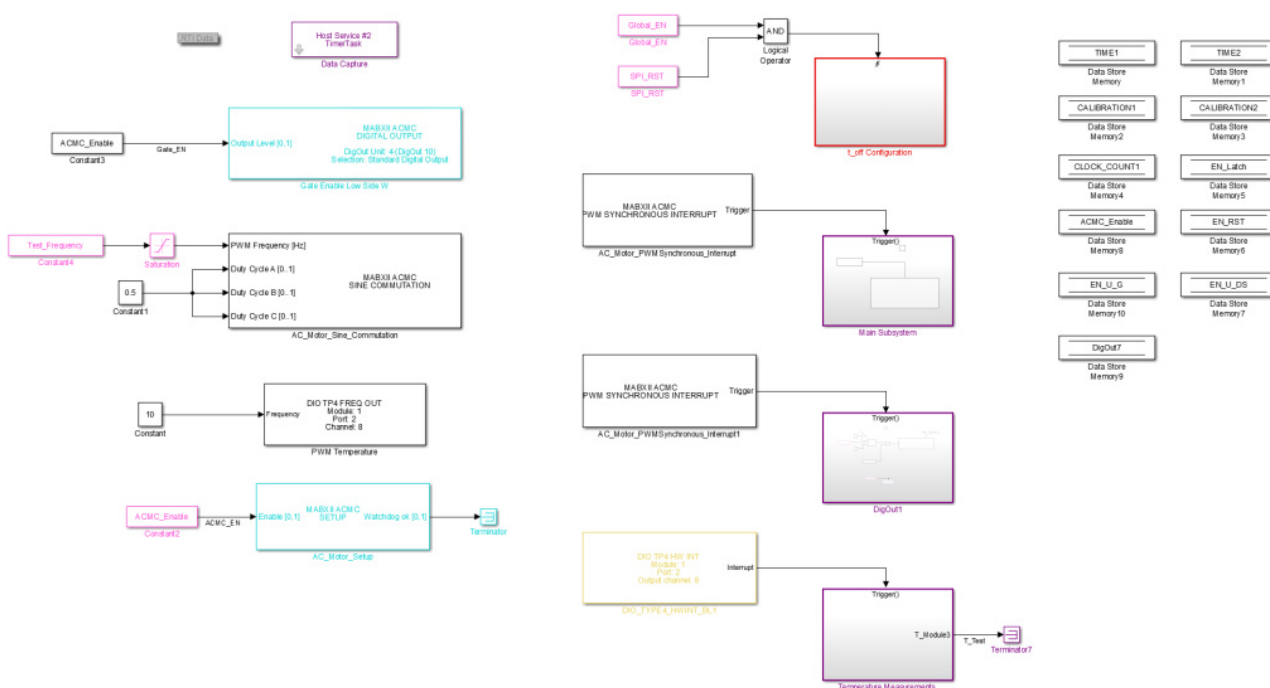


Abbildung 53: Simulink-Software für das Condition-Monitoring

Parallel dazu wurde eine weitere Bedienoberfläche in ControlDesk entwickelt (Abbildung 54), welche das Bedienen und Überwachen der Tests sowie der benötigten Messparameter ermöglicht. Zudem kann die Software an bestimmten Testpunkten überprüft werden.



Variable Array_508_520:		Variable Array_508_520_515_517: Tunable Par...		Variable Array_508_520_515_527: Tuna...	
-1E+300..1E+300 Converted		-1.79769313486232E+308..1.79769313486232E+308 Conver...		0.255 Converted Incr. +-1 / 10	
Variable	Value	Variable	Value	Variable	Value
Tunable Parameters/Global_EN	1	Tunable Parameters/SPL_Trigger_Divider	4	Tunable Parameters/SPL_TX_Byte1	0
Labels/U_DS	0.0	Tunable Parameters/Test_Frequency	7000	Tunable Parameters/SPL_TX_Byte2	0
Labels/U_G	187.1	Tunable Parameters/DutyCycle	0.5	Tunable Parameters/SPL_t_off_CONFIG1_1	6
<b>Variable Array_508_520_515:</b>		Tunable Parameters/SPL_RST	1	Tunable Parameters/SPL_t_off_CONFIG1_2	3
-1E+300..1E+300 Converted		Labels/Divider_Counter	1	<b>Variable Array_531: Labels/Counter_t_off</b>	
Variable	Value	Labels/U_G_Trigger_Check	0	0.65535 Converted Incr. +-1 / 10	
Labels/TDF	624.66E-009	Labels/Mess_Start_Trigger	0	Labels/Counter_t_off_R	0
Labels/SPL_RX_Byte1	0	Labels/t_off_Read_Divider	0	Labels/Counter_t_off_R1	6
Labels/SPL_RX_Byte2	2	Labels/TP1	1	Labels/Counter_t_off_R2	0
Labels/SPL_RX_Byte3	0	Labels/TP2	1	Labels/Counter_t_off_R3	0
Labels/SPL_RX_Byte4	0	Labels/TP3	1	Labels/SPL_TX_Byte_Sent[0]	0
Labels/SPL_RX_t_off	0	Labels/TP4	0	Labels/Switch_Case	0
		Labels/TP5	0		
		Labels/TP6	1		

Abbildung 54: Bedienoberfläche für den Test der Messplatine

Anschließend wurde ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut, wobei interne Test-Räumlichkeiten von IAV genutzt wurden (Abbildung 55). Besonderes Augenmerk lag auf der Sicherheit der Tests, die bei Spannungen über 800 V und Pulsströmen über 400 A durchgeführt wurden. Ein Sicherheitskonzept wurde entwickelt und umgesetzt, welches die Fernbedienung des Prüfstands außerhalb des Prüfraumes ermöglichte.

Für die Tests wurde eine Luftspule für hohe Ströme entwickelt und gefertigt, die als Lastinduktivität während der Tests zum Einsatz kam. Der Prüfstand hat einen ähnlichen Aufbau wie beim Doppelpulstest (Abbildung 56). Zu den wichtigen Bestandteilen gehören:

- PWR mit der integrierten Messplatine für das Condition-Monitoring
- Lastinduktivität
- dSPACE MicroAutoBox II (MABXII) als Steuerung
- HV-Netzteil

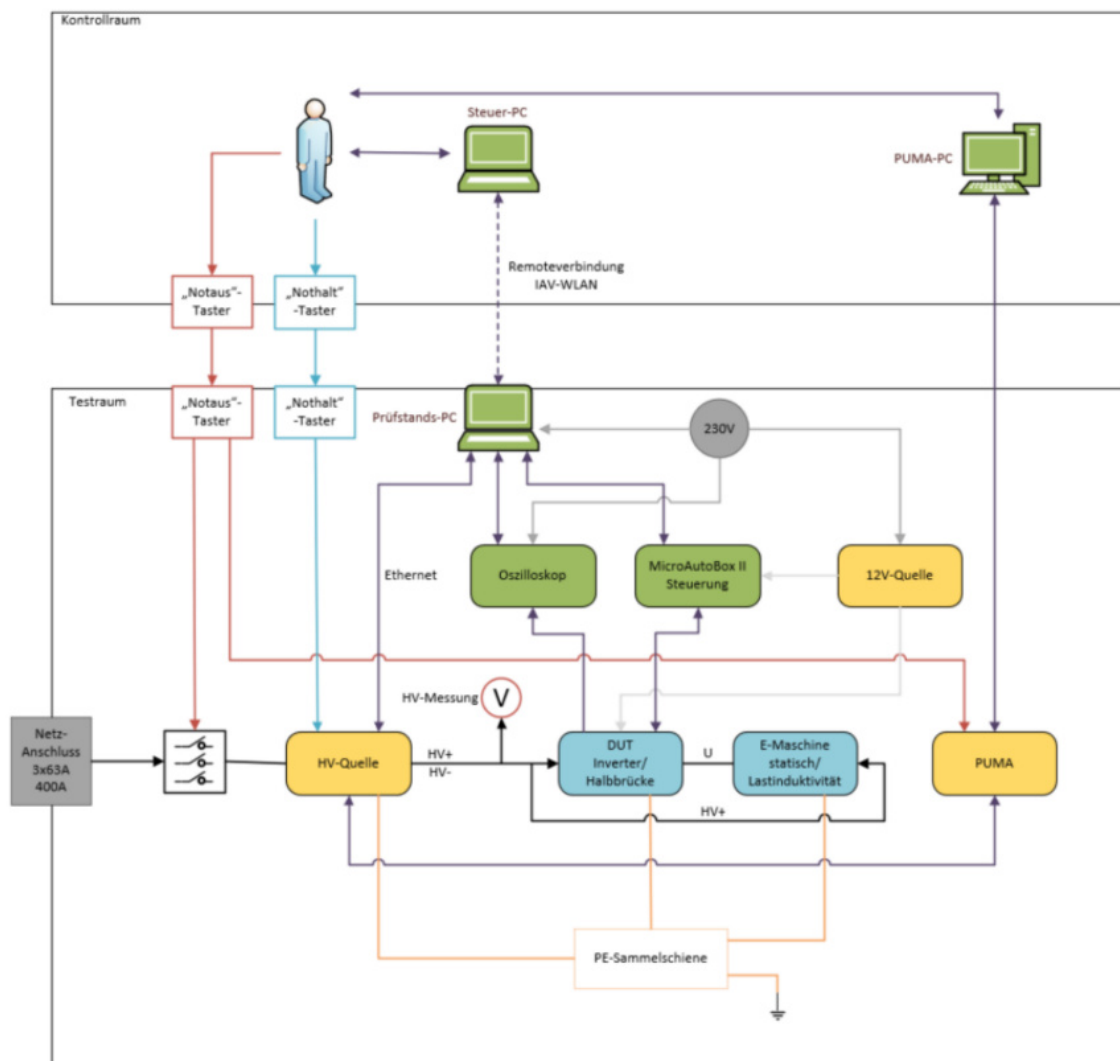


Abbildung 55: Sicherheitskonzept des Prüfstands



Abbildung 56: Prüfandaufbau für das Condition-Monitoring

Die vollständige Integration der Messplatine für das Condition-Monitoring in den Inverter wurde realisiert (Abbildung 57). Dabei wurden die Messparameter der Platine mithilfe der MABXII und parallel mit einem Oszilloskop erfasst und aufgezeichnet (Abbildung 58).

Dabei erfolgte die Auswertung der Hauptmessparameter, insbesondere der Durchlassspannung und der Ausschaltverzögerungszeit. Zur Unterstützung dieser Auswertung wurden Python-Skripte erarbeitet, die eine Aufbereitung und Visualisierung der Messergebnisse ermöglichen. Außerdem wurden Zusammenhänge und Abhängigkeiten analysiert, um die Funktionalität und Genauigkeit der Messplatine zu bewerten.

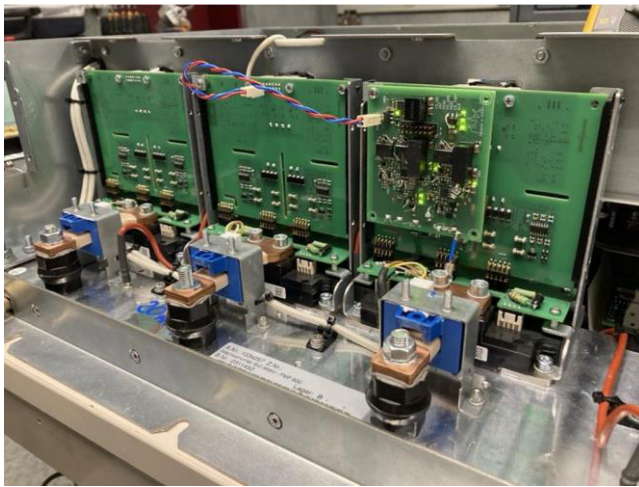


Abbildung 57: Vollintegrierte Messplatine

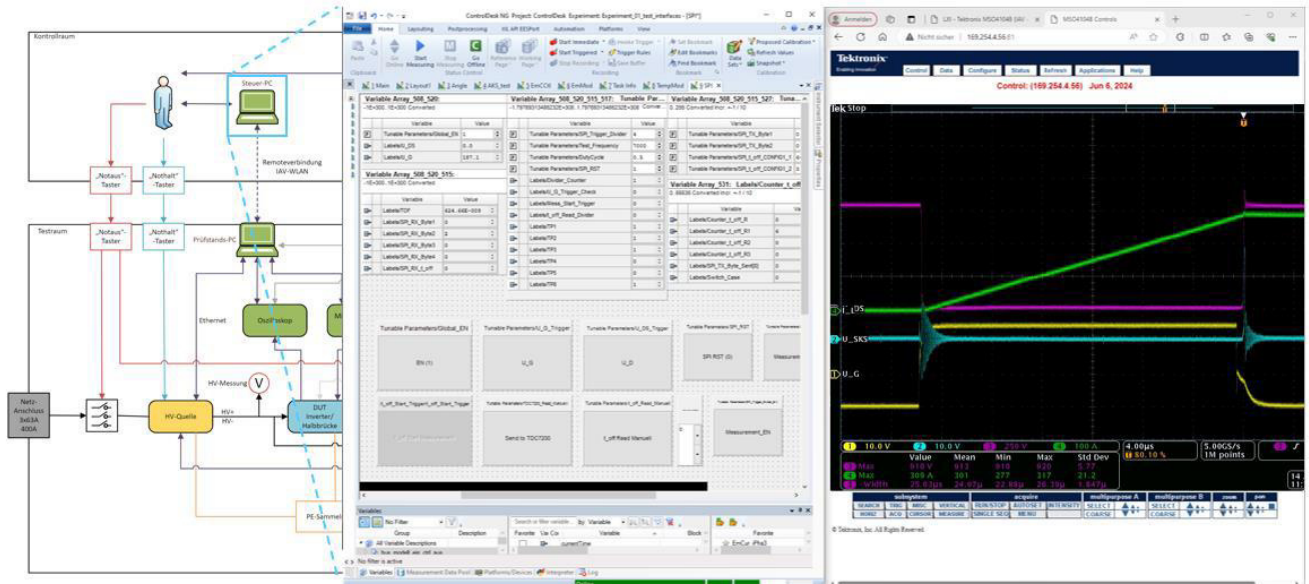


Abbildung 58: Messungen des Condition-Monitorings am Prüfstand

Zunächst wurde die Abhängigkeit der Ausschaltverzögerungszeit der Messplatine vom Drain Strom für verschiedene Zwischenkreisspannungen (300 V bis 800 V) untersucht (Abbildung 59). Dabei ist

ein klarer Trend erkennbar: Mit steigender Stromstärke nimmt die Ausschaltverzögerungszeit ab. Zudem zeigt sich, dass höhere Zwischenkreisspannungen tendenziell längere Ausschaltverzögerungszeiten aufweisen.

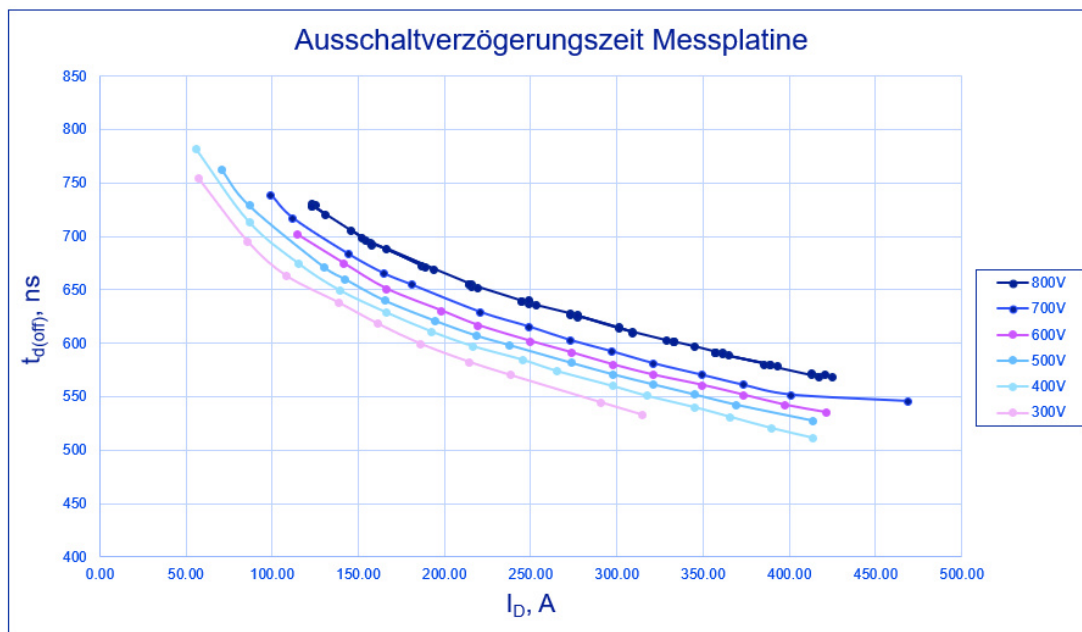


Abbildung 59: Messung der Ausschaltverzögerungszeit mithilfe der Messplatine

Anschließend wurde der Vergleich der Messwerte bei 600 V analysiert. Dabei wurden die Ergebnisse der Messplatine für das Condition-Monitoring mit den Werten eines Oszilloskops sowie den Datenblattangaben gegenübergestellt (Abbildung 60). Es zeigt sich, dass die Werte der Messplatine und des Oszilloskops relativ nah beieinander liegen, wobei die Oszilloskop-Werte durchgehend etwas niedriger ausfallen. Im Gegensatz dazu weist das Datenblatt deutlich geringere Verzögerungszeiten auf, insbesondere bei höheren Strömen. Diese Abweichung könnte auf systematische Unterschiede in der Messmethodik oder auf parasitäre Effekte in der realen Messumgebung zurückzuführen sein.

Anschließend wurde die Durchlassspannung bei einer Zwischenkreisspannung von 600 V analysiert (Abbildung 61). In der Abbildung sind drei Datensätze dargestellt: die Angaben aus dem Datenblatt, die Messungen der Universität Bremen mit einem Curve-Tracer bei 14 V und die kalibrierten Messungen mit der Messplatine. Zusätzlich wurde eine Regressionslinie eingefügt, um den Trend der kalibrierten Messwerte zu verdeutlichen. Es zeigt sich, dass die kalibrierten Messwerte zwischen den Datenblattangaben und den Messungen der Universität Bremen liegen. Die Abweichungen könnten auf unterschiedliche Messbedingungen oder systematische Einflüsse zurückzuführen sein. Die Konsistenz der kalibrierten Messwerte zeigt jedoch, dass die Messplatine nach entsprechender Kalibrierung zuverlässige Ergebnisse liefert.

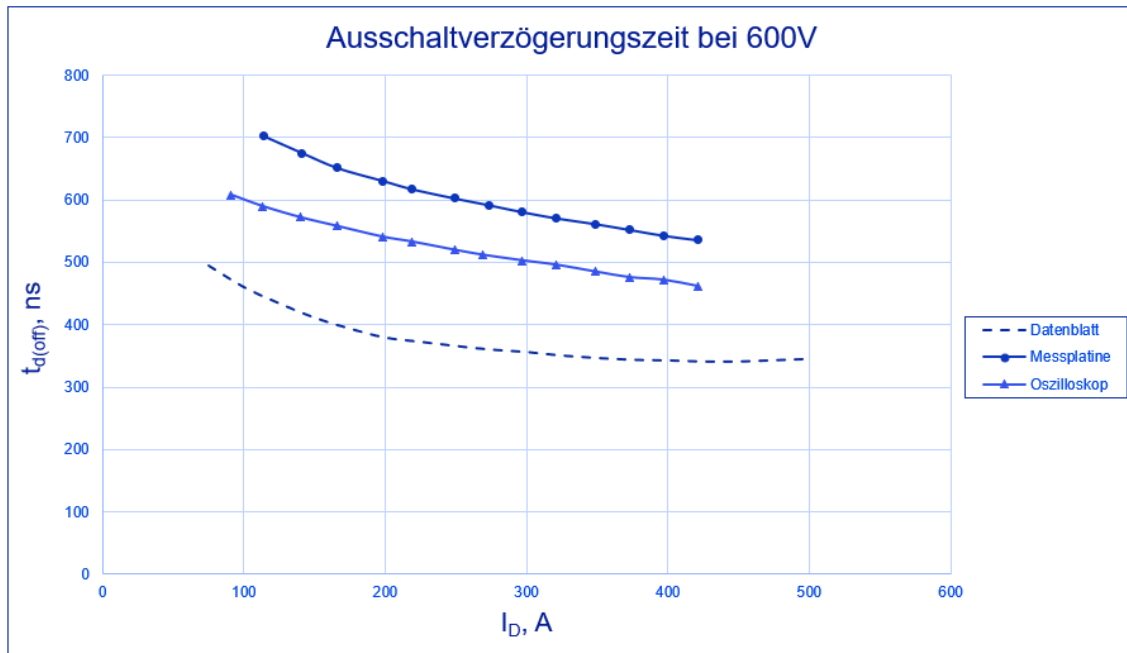


Abbildung 60: Messung der Ausschaltverzögerungszeit bei 600 V

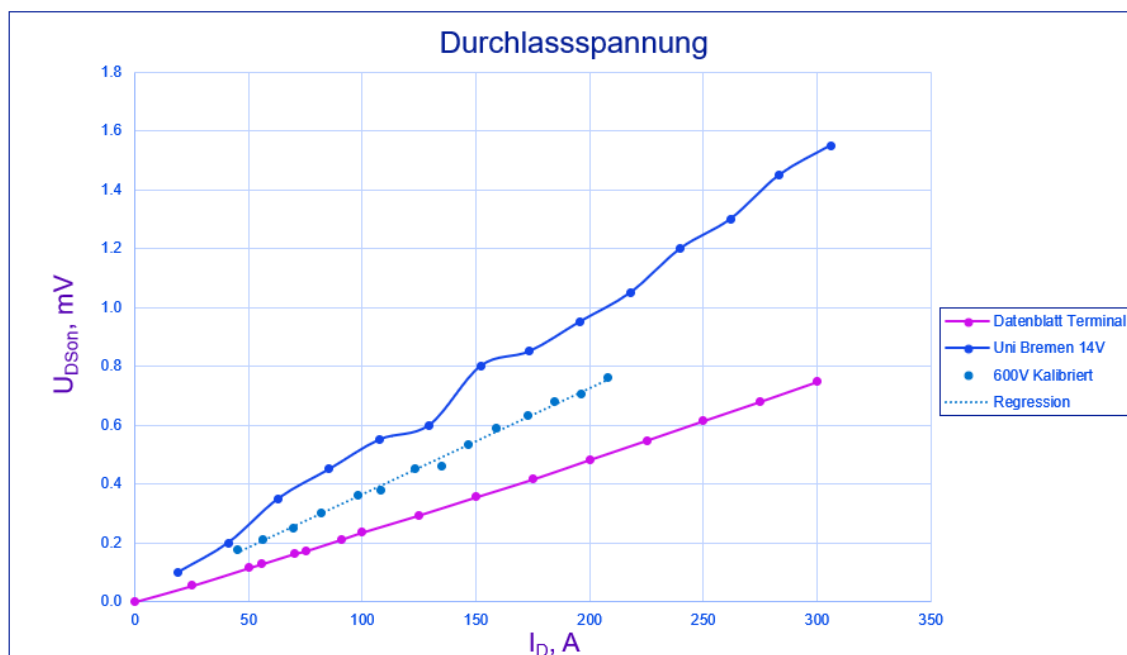


Abbildung 61: Messung der Durchlassspannung

Als letztes wurde das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  untersucht, um die Genauigkeit der Messung der Durchlassspannung mit Hilfe der Messplatine für das Condition Monitoring zu bewerten (Abbildung 62). Das Bestimmtheitsmaß wurde in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung analysiert. Die Abbildung zeigt, dass  $R^2$  bei niedrigeren Spannungen (400 V bis 600 V) sehr hoch ist (über 0,995), was darauf hinweist, dass die Messwerte der Durchlassspannung sehr gut mit der Regressionsfunktion übereinstimmen. Bei höheren Spannungen (ab 700 V) nimmt das

Bestimmtheitsmaß jedoch ab und erreicht bei 800 V einen Wert von 0,976. Dies deutet darauf hin, dass die Messgenauigkeit der Platine bei höheren Zwischenkreisspannungen leicht abnimmt. Dennoch bleibt die Genauigkeit insgesamt auf einem hohen Niveau, was die Eignung der Messplatine für Condition-Monitoring-Anwendungen bestätigt.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die mit der Messplatine ermittelten Werte konsistent und plausibel sind. Daher kann die Messplatine – trotz Abweichungen zu den Datenblattangaben – nach entsprechender Kalibrierung als zuverlässige Methode zur Messung der Ausschaltverzögerungszeit und der Durchlassspannung eingesetzt werden.

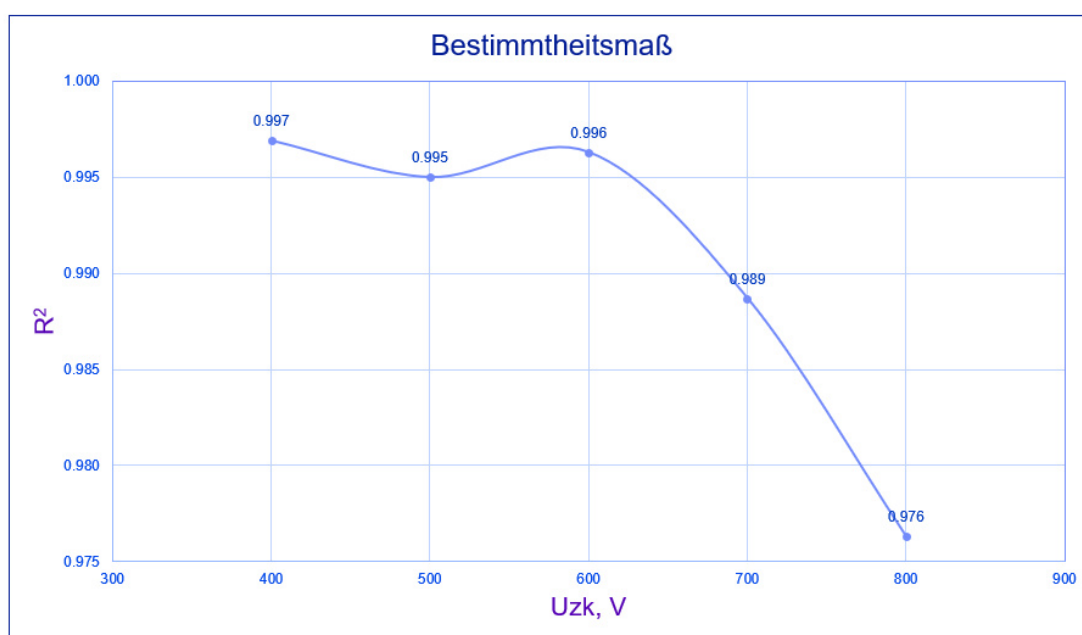


Abbildung 62: Bestimmtheitsmaß der Messung der Durchlassspannung

## 2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projekt SiC-Mobil wurden die bewilligten Fördermittel nahezu in vollem Umfang und entsprechend der ursprünglichen Mittelverwendungsvorgaben (Personal, Reise, Material, sonstige Vorhabenkosten) eingesetzt. Es kam im Projektverlauf zu keinerlei nennenswerten Änderungen in der Mittelverwendung, auch nicht zu relevanten Mittelverschiebungen zwischen den Kostenpositionen.

Die im Zuwendungsbescheid festgelegten finanziellen Rahmenbedingungen wurden eingehalten. Die eingesetzten Eigenmittel sowie die Fördermittel wurden sachgerecht und zweckgebunden verwendet. Die förderfähigen Ausgaben entsprachen dem im Bewilligungsbescheid dargestellten Kostenrahmen.

Lediglich eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit gegen Ende, und zwar um sechs Monate bis zum 28.02.2025 wurde von allen Partnern des Konsortiums in Absprache in Anspruch genommen, um verbleibende Arbeitspakete mit der gebotenen inhaltlichen Sorgfalt abzuschließen. Diese Verlängerung hatte keinen Einfluss auf die Mittelverwendung und wurde in enger Abstimmung mit dem Projektträger vorgenommen.



### 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Projektverlauf bei SiC-Mobil orientierte sich in hohem Maße an der ursprünglich im Antrag dargestellten Planung. Wo notwendig, wurden gezielte Anpassungen vorgenommen, um flexibel und lösungsorientiert auf unvorhergesehene Herausforderungen zu reagieren (Lieferschwierigkeiten von Materialien, drohende Insolvenz eines Projektpartners, Umstrukturierung des Geschäftsbetriebs eines anderen Partners). Die erbrachten Leistungen erwiesen sich als zentral für die erfolgreiche Umsetzung der ambitionierten technischen Zielsetzungen. Sie wurden innerhalb des vorgesehenen bzw. aktualisierten Zeitrahmens und mit den verfügbaren Ressourcen vollständig realisiert.

Fast alle im Arbeitsplan definierten Aufgaben konnten ohne zusätzlichen Ressourceneinsatz erfolgreich bearbeitet werden – ein klarer Beleg für die realistische und durchdachte Projektplanung. Die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit der Projektpartner ermöglichte eine praxisnahe, fachlich fundierte Durchführung aller Arbeitsschritte. Durch die gezielte Einbringung ihrer jeweiligen Expertise trugen die Partner entscheidend dazu bei, komplexe Lösungsansätze effizient umzusetzen.

Diese konstruktive Zusammenarbeit und die durchgängig zielgerichtete Projektarbeit unterstreichen sowohl die Zweckmäßigkeit der gewählten Projektstruktur als auch die Angemessenheit des eingesetzten Ressourceneinsatzes.

### 4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

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.

Die Motivation zum Design der Fixture hat sich unerwartet im Projektverlauf ergeben. Dort wurde seitens der Konsortialpartner berichtet, dass sich die Ringbandkerne des EMV-Filters im regulären Betrieb signifikant erwärmen, und zwar bis hin zu einer deutlichen Verfärbung der Ringbandkerngehäuse. Dies hat nicht nur die Frage aufgeworfen, wie stark sich das eigentliche Kernmaterial erwärmt und welche Konsequenzen diese Erwärmung mit sich bringt, sondern auch eine Indikation dafür geliefert, dass die Ringbandkerne unzulässig hohen Common-Mode Strömen ausgesetzt sind, die letztendlich die Kerne in Sättigung treiben und damit die Filter-Performance negativ beeinflussen können.

Da vollumfängliche Daten zum thermischen Verhalten auch zur Sättigung üblicherweise NICHT von den Ringbandkernherstellern zur Verfügung gestellt werden (können), bestand der Bedarf in einer möglichst einfachen und virtuell reproduzierbaren Umgebung Ringbandkerne elektrisch wie thermisch auszumessen.

Wie dem Bericht zum AP3.7 zu entnehmen ist, können die Daten, die mit der Fixture erhoben werden, für thermische und SPICE-Modelle genutzt werden. Die thermischen Modelle ermöglichen eine Abschätzung hinsichtlich der Frage, ab wann sich der Ringbandkern infolge der eingepprägten Common Mode-Leistung auf ein Niveau erwärmt, das für den Kern unzulässig ist bzw. die Zerstörung des Materials oder eine signifikante Reduktion der Lebenszeit begünstigt. Die elektrischen Modelle hingegen erlauben neben der Berücksichtigung der Dispersion (= Frequenzabhängigkeit von Common Mode Induktivität und Widerstand des Kerns) auch eine parallele Einpreisung des Sättigungsverhaltens.

Das Erstellen derartiger Modelle erlaubt eine viel präzisere Vorhersage des eigentlichen Kernverhaltens im Gegensatz zu einem Standard-Workflow und erlaubt zukünftig eine viel grenzwertigere und damit auch effizientere Auslegung von Ringbandkernen für EMV-Filter. Gerade

im Kontext immer schneller schaltender Halbleitertechnologien wie SiC- oder GaN-FETs ist dies auch mehr als relevant.

## **5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem ZE keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

## **6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Folgende Publikationen hat IAV im Laufe des Projektes veröffentlicht:

1. 03/2023 - ATZ live paper, "System optimization of SiC inverters regarding efficiency, cost and reliability", Dr. Thomas Orlik, Dr. Michael Maiworm, Dr. Mathias Lindner, Dr. Christoph Danzer, Heiko Rabba, and Matthias Schultalbers ([https://sic-mobil.de/wp-content/uploads/2024/11/20230217\\_ATZlive\\_Paper\\_Systemoptimierung-SiC\\_IAV.pdf](https://sic-mobil.de/wp-content/uploads/2024/11/20230217_ATZlive_Paper_Systemoptimierung-SiC_IAV.pdf))

Dieses Papier, erstellt für den ATZ-Kongress in Berlin, beschreibt wie das entwickelte, belastungsoptimale Ansteuerungsverfahren für den Antriebswechselrichter anhand von Systemsimulationen im Zusammenspiel mit dem Elektromotor untersucht und für den Einsatz im elektrischen Antrieb bewertet wird. Dazu wurden Verlustleistungs- und Lebensdauermodelle für die SiC-Halbleiter erstellt und mit einer FEM-Simulation einer elektrischen Maschine gekoppelt. Das neue Ansteuerungsverfahren wurde gegen den Stand der Technik hinsichtlich des Wirkungsgrads und des relativen Lebensdauerverbrauchs verglichen. Die Vorteile konnten auch im Zusammenspiel mit der E-Maschine demonstriert werden. So ergaben sich ein um etwa 4% kleinerer Energieverbrauch und 60% kleinerer Lebensdauerverbrauch im WLTP-Zyklus. Gleichzeitig zeigte die Untersuchung auch die Herausforderungen im Gesamtsystem. So führt eine Variation der Schaltfrequenz neben der positiven Beeinflussung der Verluste und der Lebensdauer des Wechselrichters auch zu einer Verschiebung der Verlustanteile innerhalb der Maschine. Insbesondere Oberschwingungsverluste in den Permanentmagneten der Maschine können dadurch erhöht werden und dadurch wiederum die Lebensdauer der E-Maschine beeinträchtigen. Aktuell werden aus diesen Ergebnissen Randbedingungen für die Ansteuerung im Wechselrichter abgeleitet.

2. 05/2023 – PCIM Europe, Nürnberg, (<https://ieeexplore.ieee.org/document/10173229>)

Im Mai 2023 wurde auf dem internationalen Fachkongress PCIM Europe das damals aktuelle Konzept für die Zustandsüberwachung vorgestellt. Es basiert auf der Messung von drei verschiedenen spezifischen elektrischen Parametern im Leistungsmodul, die eine Abhängigkeit von der Temperatur und der Lebensdauer aufweisen. Konkret wurde die Ausschaltverzögerungszeit des Moduls, die Durchlassspannung und die Gate-Spannung untersucht. Durch die Messung mehrerer Parameter soll die Robustheit der Messung erhöht und die Abhängigkeit von der Betriebstemperatur verringert werden.



**7 Technische Anlagen**

keine

## **IV      Berichtsblätter**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -----	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  SiC-Mobil - Teilprojekt: SiC-Drive. Steuerung, Systemdaten, Schaltungsintegration	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Alexander Hoffmann	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>28.02.2025</b>
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  IAV GmbH Carnotstr. 1 10587 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 19I21024A
	11. Seitenzahl ... (ohne Anlagen)
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen .....
	15. Abbildungen .....
16. Zusätzliche Angaben -----	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -----	
18. Kurzfassung 1. <b>Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik:</b> Siliziumcarbid (SiC) basierte Leistungshalbleiter ermöglichen hohe Umrichterleistungen mit geringerem Bauraum und Gewicht sowie höherem Wirkungsgrad im Vergleich zu traditionellen Silizium-basierten Schaltern. Diese Technologie ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt in der Automobilbranche. 2. <b>Begründung/Zielsetzung der Untersuchung:</b> Ziel des Projektes SiC-Mobil war es, Traktionsantriebe und Ladesysteme von Elektrofahrzeugen kleiner, leichter und effizienter zu gestalten. Dabei sollten Lebensdauer- und EMV-Effekte berücksichtigt werden, um eine wirtschaftlich erfolgreiche Nutzung von SiC-Umrichtern zu ermöglichen. 3. <b>Methode:</b> Das Projekt umfasste die Entwicklung und Erprobung eines Pulswechselrichters, der als Antriebs-/Traktionsumrichter, Ladeumrichter und Active-Front-End verwendet werden kann. Die Arbeitspakete umfassten, Applikationsentwicklung, Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Systemoptimierung und Test. 4. <b>Ergebnis:</b> Es wurde eine modulare Systemarchitektur entwickelt, bestehend aus einem Active Front End, einem Interleaved DC-DC-Wandler und einem Antriebsumrichter. Die EMV-Untersuchungen und die Optimierung der Betriebsstrategien führten zu einer verbesserten Leistungselektronik. 5. <b>Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten:</b> Die gewonnenen Erkenntnisse fördern die Entwicklung hocheffizienter Leistungselektronik und fließen in interdisziplinäre Projekte ein. Die SiC-Technologie bietet Potenzial für höhere Leistungen auf gleichem Bauraum und wird in zukünftige Entwicklungen integriert.	
19. Schlagwörter SiC, Elektromobilität, Frequenzumrichter, Traktionsantrieb, Ladeumrichter, Active Front End, EMV, Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Systemoptimierung, Leistungselektronik, modulare Systemarchitektur.	
20. Verlag -----	21. Preis -----

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. Title SiC-Mobil - Sub-project: SiC-Drive. Control, system data, circuit integration	
4. Author(s) (family name, first name(s)) Dr. Alexander Hoffmann	5. End of project 28.02.2025
	6. Publication date
	7. Form of publication Final Report
8. Performing organization(s) (name, address)  IAV GmbH Carnotstr. 1 10587 Berlin	9. Originator's report no.
	10. Reference no. 19I21024A
	11. No. of pages
12. Sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53170 Bonn	13. No. of references
	14. No. of tables
	15. No. of figures
16. Supplementary notes	
17. Presented at (title, place, date)	
18. Abstract <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Current State of Science and Technology:</b> Silicon carbide (SiC) based power semiconductors enable high inverter performance with reduced space and weight, as well as higher efficiency compared to traditional silicon-based switches. This technology is a current research focus in the automotive industry.</li> <li>2. <b>Justification/Objectives of the Investigation:</b> The goal of the SiC-Mobil project was to make traction drives and charging systems of electric vehicles smaller, lighter, and more efficient. Lifetime and EMC effects were to be considered to enable the successful economic use of SiC inverters.</li> <li>3. <b>Method:</b> The project involved the development and testing of a pulse inverter that can be used as a drive/traction inverter, charging inverter, and active front end. The work packages included application development, reliability studies, system optimization, and test.</li> <li>4. <b>Result:</b> A modular system architecture was developed, consisting of an active front end, an interleaved DC-DC converter, and a drive inverter. EMC investigations and optimization of operating strategies led to improved power electronics.</li> <li>5. <b>Conclusion/Application Possibilities:</b> The insights gained promote the development of highly efficient power electronics and are incorporated into interdisciplinary projects. SiC technology offers potential for higher performance in the same space and will be integrated into future developments.</li> </ol>	
19. Keywords SiC, electromobility, frequency inverter, traction drive, charging inverter, active front end, EMC, reliability studies, system optimization, power electronics, modular system architecture.	
20. Publisher -----	21. Price -----