

Hocheffiziente und skalierbare Umrichterbausteine für Hochdrehzahl-Antriebe

HoskA

Abschlussbericht

zum Teilvorhaben
Auslegung und Bewertung eines
Hochdrehzahltraktionsantriebs und fahrzeuggerechte
Spezifikation des PowerCores

VOLKSWAGEN

AKTIENGESELLSCHAFT

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt ist mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom
Projektträger VDI/VDE IT GmbH in Berlin betreut worden

Zuwendungsempfänger: Volkswagen AG	Förderkennzeichen: 16EMO0153
Vorhabenbezeichnung:	Hocheffiziente und skalierbare Umrichterbausteine für Hochdrehzahl-Antriebe
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2016 bis 31.12.2018
Berichtszeitraum:	01.01.2016 bis 31.12.2018
Autoren:	Berlinecke, Julian; Mertens, Dr. Christian; Plikat, Dr. Robert; Wetzel, Hermann; Kaufhold, Christoph
Projektleitung:	Dr. Christian Mertens Volkswagen AG Konzernforschung Brieffach 1778 38436 Wolfsburg

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	4
2	Voraussetzungen für das Vorhaben und Zusammenarbeit im Konsortium.....	4
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	5
4	Projektplanung und -ablauf.....	5
5	Projektergebnisse.....	7
5.1	Spezifikation und Konzept zur Umrichter-Architektur.....	7
5.1.1	Skalierungskonzept.....	7
5.1.2	Integrationskonzept.....	8
5.2	Auslegung der E-Maschine für den Automotive Demonstrator.....	8
5.2.1	Randbedingungen und Prämissen.....	9
5.2.2	Elektromagnetische Auslegung und Optimierung.....	9
5.2.3	Mechanische Rotorfestigkeit.....	12
5.2.4	Konstruktive Auslegung.....	12
5.3	Aufbau der E-Maschine für den Automotive Demonstrator.....	14
5.3.1	Voruntersuchungen an Wickelmuster.....	14
5.3.2	Fertigung der Aktivteile.....	15
5.3.3	Fertigung der Passivkomponenten und Zusammenbau.....	15
5.4	Inbetriebnahme und Messungen am Prüfstand.....	15
5.4.1	Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen.....	16
5.4.2	Umrichterintegration und Ansteuerung.....	16
5.4.3	Erstinbetriebnahme und Maschinentests.....	17
5.4.4	Geregelter Betrieb und Messungen im Kennfeld.....	19
6	Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse.....	20
7	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	20
8	Veröffentlichungen.....	21
9	Verwendete Quellen.....	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeit- sowie Arbeitsplan mit Arbeitspaketstruktur	6
Abbildung 2: Projektablaufplan mit zwei Antriebslösungen	6
Abbildung 3: Antriebseinheit des Automotive Demonstrators.....	8
Abbildung 4: Anintegration der Umrichtereinheiten an das E-Maschinengehäuse	8
Abbildung 5: Vorgehen zur elektromagnetischen Auslegung des Automotive-Demonstrators.....	10
Abbildung 6: Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Leistungskennlinien Automotive-Demonstrator	10
Abbildung 7: <i>HoskA</i> Automotive-Demonstrator – Magnetkreis	11
Abbildung 8: Symmetrische Neunphasigkeit mit mehreren Teilsystemen in PowerCore-Architektur.	11
Abbildung 9: Berechnungsergebnisse zur mechanischen Rotorfestigkeit	12
Abbildung 10: Automotive-Demonstrator – CAD-Modell E-Maschine	12
Abbildung 11: Automotive-Demonstrator – Front- und Rückenansicht E-Maschine	13
Abbildung 12: Anintegration der Umrichtereinheiten an das E-Maschinengehäuse	14
Abbildung 13: Automotive-Demonstrator – Statorwickelmuster	14
Abbildung 14: Automotive-Demonstrator (E-Maschine) ohne PowerCores.....	15
Abbildung 15: Automotive-Demonstrator – PowerCore Umrichter	16
Abbildung 16: E-Maschine Automotive-Demonstrator - Leerlaufspannungen	18
Abbildung 17: E-Maschine Automotive-Demonstrator – Kurzschlussversuch.....	18
Abbildung 18: E-Maschine Automotive-Demonstrator – Bestimmung thermischer Widerstand	19
Abbildung 19: Automotive-Demonstrator mit integrierten PowerCores am VW-Antriebsprüfstand..	19
Abbildung 20: Automotive-Demonstrator mit integrierten PowerCores am VW-Antriebsprüfstand..	20

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts *HoskA* ist eine Architektur generischer Umrichtereinheiten entwickelt worden, die eine Leistungsskalierung über ein breites Spektrum an elektrisch betriebenen Fahrzeugen ermöglichen soll. Über die Anzahl der verwendeten Umrichterbausteine, den sogenannten PowerCores, können Antriebsleistungen skaliert werden, sodass die Verwendung einheitlicher Komponenten und Schnittstellen unabhängig von der Applikation und somit eine Kostenreduktion möglich sind. Die technologischen Anforderungen an die Umrichter-Architektur zielen insbesondere auf eine hohe Effizienz sowie eine gute Skalierbarkeit und Bauraumintegration.

Im Teilvorhaben der Volkswagen AG wird die Umrichter- bzw. PowerCore-Architektur im Hinblick auf eine Traktionsanwendung für Elektrofahrzeuge mit hohen Leistungs- und Drehmomentenanforderungen untersucht. Dazu wird ein elektrischer Antriebsmotor spezifiziert, ausgelegt und mittels der zuvor beschriebenen Umrichterarchitektur betrieben sowie untersucht. Ziel ist der Aufbau einer Antriebseinheit mit integriertem PowerCore-Umrichter, anhand derer die vereinfachte Systemintegration der im Projektrahmen entwickelten generischen Architektur des PowerCores, die hohe Leistungsdichte des Gesamtsystems sowie die Vorteile in Bezug auf die Effizienz verdeutlicht werden sollen.

Die dafür notwendigen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsumfänge können dazu in einer Kurzdarstellung wie folgt zusammengefasst werden:

- Definition von Leistungsklassen und Bauraumrestriktionen sowie von Konzeptansätzen zur Modularisierung der Umrichtereinheiten
- Erstellen eines Skalierungs- und Integrationskonzepts entsprechend dem Modularitätsansatz und Konzeptionierung elektrischer, mechanischer und thermischer Schnittstellen
- Spezifikation und Entwurf (elektromagnetisch, thermisch, mechanisch sowie konstruktiv) sowie Optimierung einer Demonstrator-Traktionsmaschine
- Teilebeschaffung und Aufbau der Demonstrator-Traktionsmaschine und mechatronische Umrichterintegration
- Inbetriebnahme von Controlboard und Regelung sowie Erproben und Vermessen des Demonstratorantriebs am Prüfstand
- Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich Zielerreichung

Die Angaben zur Fachliteratur sowie zu eingesetzten Informations- und Dokumentationsdiensten erfolgt jeweils an den dafür relevanten Stellen in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen.

2 Voraussetzungen für das Vorhaben und Zusammenarbeit im Konsortium

Das Projekt ist als Verbundprojekt in einem Konsortium mit vier weiteren Partnern durchgeführt worden (Liebherr Elektronik GmbH, SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG, TDK-EPC Corporation, Fraunhofer IISB). Die Wahl des Konsortiums begründet sich dabei entsprechend der Aufgabenstellung anhand der Kompetenzfelder der einzelnen Konsortialpartner. Die Liebherr Elektronik GmbH verfügt über umfangreiche Expertise im Bereich von Wechselrichtern und High-Speed Motoranwendungen und ist in der Projektkoordination eingesetzt worden. Die SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG ist führend in der Erforschung und anschließender Serien-Umsetzung niederinduktiver Leistungsmodulen, die einen technologischen Schwerpunkt des Projekts ausmachen und die Basis für die generische Umrichter-Architektur darstellen. Gleiches gilt für die TDK-EPC

Corporation, die als Kondensator-hersteller die Verantwortung für die Folienkondensatoren der PowerCores übernommen haben. Das Fraunhofer IISB hat das Thema auf wissenschaftlicher Seite begleitet und bringt insbesondere die Expertise im Bereich Aufbau- und Verbindungstechnik, Bauraumintegration von Leistungselektronik sowie und in der Entwicklung von Umrichterstrukturen höchster Leistungsdichte mit. Insbesondere die Abstimmung hinsichtlich der mechanischen, elektrischen und thermischen Schnittstellen sowie die Anintegration der Umrichtereinheiten an den VW-Antriebsdemonstrator ist in enger Kooperation mit dem Fraunhofer Institut erfolgt.

Die Volkswagen AG als Serienhersteller elektrisch betriebener Fahrzeuge hat im Projekt die Spezifikation sowie das Konzept zusammen mit den Konsortialpartnern erarbeitet. Zudem ist das Arbeitspaket für die Automotive-Antriebsanwendung von Volkswagen koordiniert und entsprechend der beschriebenen Arbeitsumfänge bearbeitet worden. Die Umrichterintegration sowie die Inbetriebnahme der finalen Umrichter-Architektur am Automotive-Demonstrator ist in enger Kooperation und in Begleitung des Fraunhofer Instituts durchgeführt worden. Dabei ist eine Prüfstandsumsetzung sowohl am Fraunhofer-Prüfstand als auch am VW-Prüfstand nachgewiesen worden.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Heutige Antriebsumrichter für Fahrzeuge sind entweder komplett aus Einzelkomponenten wie Leistungsmodul, Kondensator, Kühlkörper usw. in einem wasserdichten Gehäuse aufgebaut oder von Grund auf vom Halbleiter-Chip, den passiven Komponenten bis hin zur Ansteuerelektronik in einer hoch-integrierten, auf eigenen Werkzeugen basierenden, Umrichtereinheit realisiert. Die erste Lösung wird in der Regel für kleine Stückzahlen, z.B. bei Nutzfahrzeugen, und die zweite für hohe Stückzahlen in dedizierten PKW Plattformen verwendet. Nachteil der hoch-integrierten Lösungen ist die geringe Flexibilität, veränderte Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere ist es in der Regel unmöglich andere Kühlkonzepte oder auch Spannungsklassen zu ermöglichen. Nachteil der ersten Lösung ist neben vergleichsweise hohen Kosten (Herstell- und Entwicklungskosten) und großem Bauraumbedarf auch eine hohe Induktivität im Kommutierungskreis, was durch Kontaktierung des Zwischenkreiskondensators über Schraubanschlüsse und Busbars an das Modul und die benötigten Luft- und Kriechstrecken hervorgerufen wird.

Dieser Problemstellung folgend werden im Vorhaben Realisierungsvarianten für modulare und integrierte Umrichterbausteine für den Einsatz in elektrisch betriebenen Fahrzeugen erforscht und realisiert. Die Herausforderung besteht darin, die Balance zwischen hoher Integrationsdichte und einem modularen, flexiblen Einsatz zu finden. Die generischen Umrichter-Architekturen sollen hierbei die Anforderung erfüllen, gleichzeitig für die mechatronische Integration in elektrischen Motoren als auch für stand-alone Geräte geeignet zu sein.

4 Projektplanung und -ablauf

Projektplanung und -ablauf orientieren sich an dem in Abbildung 1 gezeigten Zeit- sowie Arbeitsplan mit der dargestellten Arbeitspaketstruktur aus sieben Arbeitspaketen. Im Teilvorhaben der Volkswagen AG sind dazu vier Meilensteine definiert worden, die den Projektverlauf strukturierten.

Das Arbeitspaket *AP1* ist innerhalb der ersten Quartale mit Meilenstein *M1* abgeschlossen worden und umfasst im Teilvorhaben die Systemspezifikation für die Umrichter-Architektur sowie die Definition dafür nötiger Antriebsleistungen und Bauraumrestriktionen. Des Weiteren sind bereits Anforderungen für den Demonstratorbetrieb und –versuch gesetzt worden. Meilenstein *M2* ist mit

Abschluss der Konzept- und Simulationsphase erreicht. Die erarbeiteten Inhalte beziehen sich auf das Skalierungs- und Integrationskonzept sowie hinsichtlich des Automotive-Demonstrators auf die Auslegung und Berechnung der elektrischen Maschine.

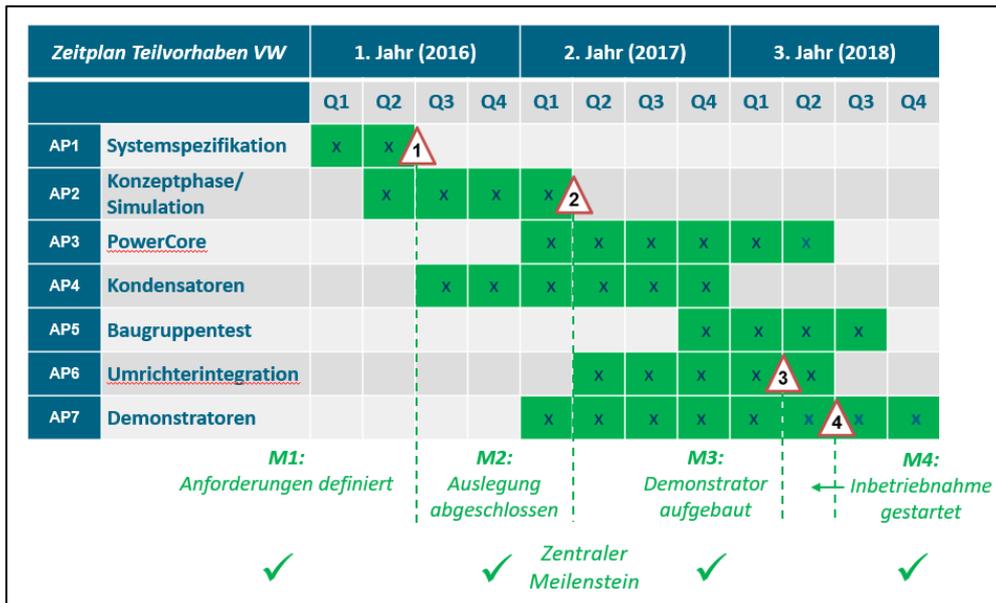


Abbildung 1: Zeit- sowie Arbeitsplan mit Arbeitspaketstruktur

Nach Abschluss der Konzeptphase und der Grobauslegung konnte die Feinauslegung der Maschine und der Schnittstellen abgeschlossen werden, sodass nach der Auskonstruktion und Zeichnungserstellung der Aufbau der Demonstrator E-Maschine startete. Parallel zu diesen Arbeiten sind die Umfänge aus Arbeitspaket AP6 bearbeitet worden, die die Umrichterintegration beinhalten und die Inbetriebnahme der PowerCores zusammen mit dem Automotive-Demonstrator vorbereiteten. Die Inbetriebnahme des Demonstrators ist mit Meilenstein M4 bereits zu Beginn des dritten Projektjahres gestartet worden und konnte planmäßig Ende des dritten Projektjahres abgeschlossen werden. Im Hinblick auf die weiteren Arbeitspakete erfolgte im Austausch mit den Konsortialpartnern stets eine Bewertung der Arbeitsergebnisse hinsichtlich der Fahrzeuganwendung.

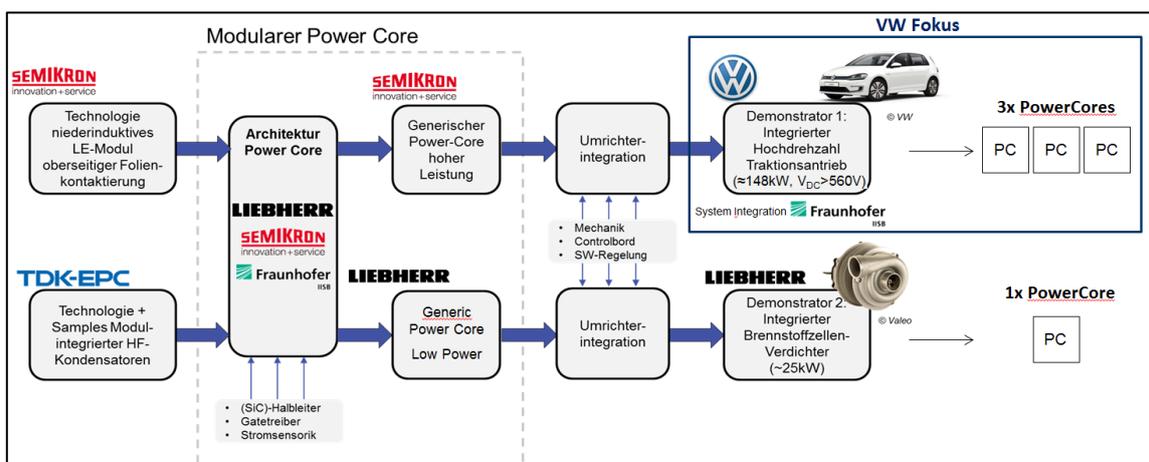


Abbildung 2: Projektlaufplan mit zwei Antriebslösungen

Zum Ablauf des Projekts ist des Weiteren auf den Ablaufplan in Abbildung 2 zu verweisen. In diesem sind die zwei unterschiedlichen Anwendungsszenarien für den Einsatz der PowerCores vorgestellt. Der Demonstratorantrieb, der den Schwerpunkt der Arbeiten bei der Volkswagen AG darstellte, ist

im oberen Pfad hervorgehoben und umfasst einen 150 kW Antrieb mit integrierter PowerCore-Architektur.

5 Projektergebnisse

Im folgenden Kapitel wird eine Zusammenfassung zu den im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnissen gegeben. Die Abfolge der Unterkapitel orientiert sich dazu an der Arbeitspaketstruktur.

5.1 Spezifikation und Konzept zur Umrichter-Architektur

In diesem Unterkapitel wird ein Überblick zu dem erarbeiteten Skalierungskonzept sowie dem Integrationskonzept gegeben. Zudem werden Antriebsleistungen und Bauräume spezifiziert.

5.1.1 Skalierungskonzept

Entsprechend der im Antrag formulierten Zielsetzung der Skalierbarkeit, die den modularen Aufbau von Leistungsmodulen bzw. Umrichterarchitekturen für verschiedene hochintegrierte Antriebsanwendungen ermöglichen soll, ist im Rahmen des Projekts zunächst ein Skalierungsansatz bzw. ein Skalierungskonzept erarbeitet worden. Dieser Ansatz wird im Rahmen des Projekts an zwei unterschiedlichen Antriebslösungen verifiziert. Die im Teilvorhaben der Volkswagen AG beschriebene Antriebslösung bezieht sich auf eine Automotive-Anwendung, die in Abbildung 2 im oberen Pfad dargestellt ist.

Für den Automotive-Demonstrator ist eine maximale Systemleistung von etwa 150 kW bei 560 V spezifiziert worden. Hinsichtlich der Umrichterarchitektur soll diese Systemleistung mit drei einzelnen Umrichtereinheiten, den sogenannten PowerCores (PCs), dargestellt werden. Für weitere Anwendungen ist eine Skalierbarkeit der Systemleistung über die Anzahl der Umrichtereinheiten (PowerCores) vorgesehen. Für die im Projekt spezifizierte zweite Antriebslösung wird auf einen einzelnen PowerCore zurückgegriffen. Um eine Skalierbarkeit im Hinblick auf eine Fahrzeuganwendung darstellen zu können, soll ein möglichst großer Leistungsbereich abgedeckt werden. Es ist beispielsweise eine Skalierbarkeit nach Leistungsklassen und Fahrzeugklassen denkbar. Im Rahmen des Projekts wird dazu eine Leistungsskalierung in 50 kW-Schritten mit maximal vier Umrichtereinheiten und einem maximalen Leistungsberich bis 200 kW vorgesehen. Der Automotive Demonstrator ist mit einer Systemleistung von 150 kW im höheren Leistungsbereich einzuordnen.

Zusätzlich zur Leistungsskalierung erfolgt im Rahmen des Förderprojekts eine Skalierung der Phasenzahl über die Anzahl der Umrichtereinheiten. In Abhängigkeit der Anzahl der Umrichtereinheiten ist somit die Phasenzahl der elektrischen Maschine anzupassen, sodass Vorteile einer mehrphasigen Wicklungsausführung genutzt werden können. Der Automotive Demonstrator ist entsprechend Tabelle 1 neunphasig ausgelegt. Das Drehzahlspektrum des Demonstratorantriebs wurde zugunsten der Vielphasigkeit im höheren Leistungsbereich und entgegen dem ursprünglich vorgesehenen Konzept nur geringfügig gegen den Stand der Technik zu Vorhabensbeginn erhöht. Allerdings ist es bei diesem Skalierungsansatz zielführend, die kleineren Leistungen mit entsprechend wachsender Maximaldrehzahl umzusetzen, damit bei mitskaliertem Phasenstrom und Magnetkreis das verringerte Drehmoment nach Übersetzung wieder für die Fahrzeuganwendung ausreicht.

Anzahl an PowerCores	Phasenzahl	Geschätzte Systemleistung
1	3	≤ 50 kW
2	6	≤ 100 kW
3	9	≤ 150 kW
4	12	≤ 200 kW

Tabelle 1: Konzeptansatz – Leistungsskalierung über Phasenzahl

5.1.2 Integrationskonzept

Für das Teilvorhaben ist insbesondere das Integrationskonzept von Antriebsumrichter und E-Maschine von entscheidender Bedeutung. Nach Betrachtung mehrerer Integrationsmöglichkeiten in axialer Richtung sowie der Berücksichtigung von Umfangsintegrationen, ist das Konzept einer Anintegration der Leistungselektronik ans E-Maschinengehäuse ausgewählt worden. Insbesondere der begrenzte Bauraum in axialer Richtung, die einfache Übertragbarkeit des Konzepts auf E-Maschinen anderer Leistungsklassen mit unterschiedlichen Gehäusedurchmessern sowie ein einfacher Zugriff auf die Komponenten der Leistungselektronik sind Hauptgründe für das gewählte Konzept.

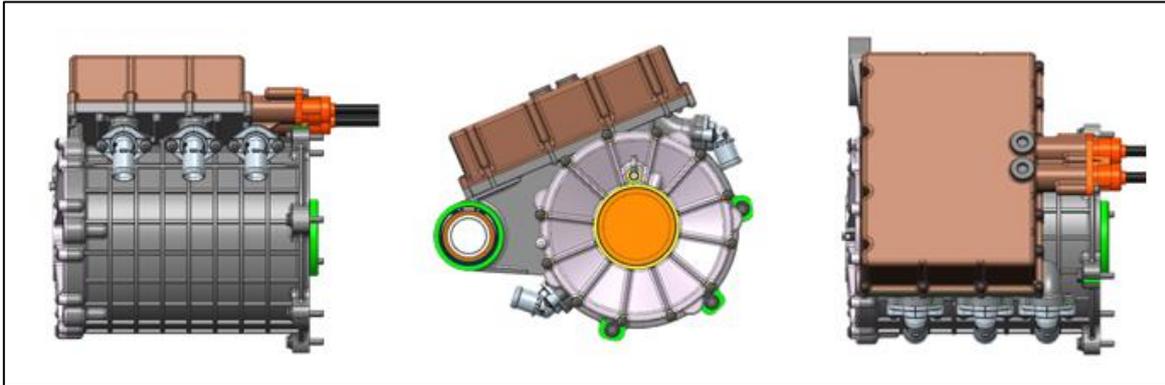


Abbildung 3: Antriebseinheit des Automotive Demonstrators

In Abbildung 3 ist die integrierte Antriebseinheit abgebildet. Dargestellt ist die E-Maschine mit einer Deckelkonstruktion unter der die Umrichtereinheiten platziert sind. In Abbildung 4 ist die Antriebseinheit nochmals ohne Deckel dargestellt. Die Schnittstelle zwischen E-Maschine und Umrichtereinheit bestehend aus drei einzelnen PowerCores ist durch eine Gehäusebodenplatte sowie eine darüber liegende Kühlplatte gegeben.

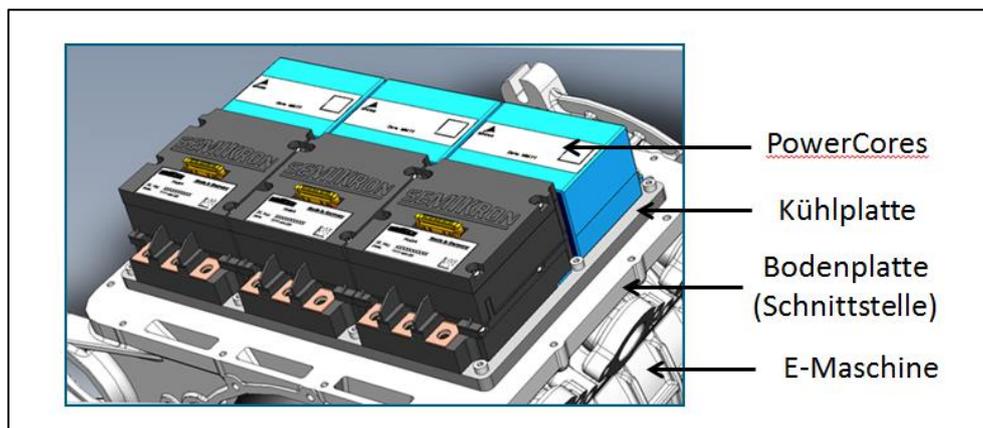


Abbildung 4: Anintegration der Umrichtereinheiten an das E-Maschinengehäuse

5.2 Auslegung der E-Maschine für den Automotive Demonstrator

Die Ergebnisse der Spezifikations- und Konzeptphase sind die Voraussetzung für den Entwurf des Automotive-Demonstrators. In diesem Abschnitt wird daher als nächster Schritt die Auslegung der E-Maschine ausgeführt.

5.2.1 Randbedingungen und Prämissen

Die Randbedingungen leiten sich aus der erarbeiteten Systemspezifikation ab und stellen die Grundlage für die Auslegung des Automotive-Demonstrators dar. Basierend auf den Projektprämissen und zur Darstellung einer hohen Leistungsdichte ist die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) als geeigneter Maschinentyp ausgewählt worden. Zur Konzeptvalidierung der Umrichter-Architektur sollen in dieser Anwendung drei PowerCores verwendet werden, die jeweils parallel an den DC-Zwischenkreis angebunden werden. Die Bauraumrestriktionen für E-Maschine und integrierten Wechselrichter leiten sich aus bekannten Fahrzeuganforderungen ab. Eine Übersicht zu den Randbedingungen für Wechselrichter und E-Maschine ist Tabelle 2 in gegeben.

Randbedingungen Wechselrichter		
Wechselrichtertyp	[-]	2-Level-VSC
Strangzahl pro Powercore	[-]	3 (B6)
Maximaler Phasenstrom	[A _{rms}]	110 A (effektiv)
DC-Minimalspannung	[V]	560
DC-Maximalspannung	[V]	850
DC-Nennspannung	[V]	650
Schaltfrequenz	[kHz]	≤ 20
Randbedingungen E-Maschine		
Strangzahl	[-]	3x3
Aktivdurchmesser	[mm]	190
Axiale Länge (inkl. Wickelköpfe)	[mm]	≤ 280
Maximaldrehzahl	[rpm]	14.000

Tabelle 2: Grobübersicht – Spezifikation

Die auszulegende permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) für den Automotive-Demonstrator soll nach dem in der Systemspezifikation vorgestellten Skalierungskonzept mehrphasig ausgelegt werden. Da der einzelne PowerCore dreiphasig als B6-Brückenschaltung spezifiziert ist, kann bei Verwendung von drei parallel geschalteten PowerCores eine neunphasige Anwendung realisiert werden. Die Maximalleistung des Automotive-Demonstrators soll mit drei PowerCores etwa 150kW betragen, sodass die Möglichkeit zur Skalierung über einen größeren Leistungsbereich mit einer vertretbaren Anzahl an PowerCores besteht. Die Anforderung an das maximale Drehmoment liegt bei ≥ 270 Nm, sodass mit üblichen Getriebeübersetzungen ausreichende Radmomente für Fahrzeuge mit mindestens der Fahrzeugklasse A erreicht werden können. In Tabelle 2 ist die Grobspezifikation vorgegeben, die zu Projektbeginn in Absprache mit den Partnern festgelegt worden ist.

5.2.2 Elektromagnetische Auslegung und Optimierung

Der elektromagnetische Entwurf der elektrischen Maschine des Automotive-Demonstrators orientiert sich grundlegend an drei Teilschritten, die nachfolgend zusammengefasst und in Abbildung 5 veranschaulicht sind:

- 1) *Analytische Grundausslegung*
- 2) *Überprüfung mittels statischer FEM Rechnung*
- 3) *Optimierung mit FEM*

Nach einer analytischen Grundausslegung, die zunächst dazu dient eine Abschätzung zu treffen inwiefern die geforderten Spezifikationen bei gegebenen Randbedingungen eingehalten werden können, folgt die Berechnung und Optimierung mittels numerischer Feldberechnung und Finite-Elemente-Methode (FEM). Die FEM-Berechnungen sind ein Hauptbestandteil der Auslegung, da mit

Hilfe von Finite-Elemente-Modellen für den gewählten Maschinentyp einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) komplexe Magnetkreisstrukturen bei Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in hinreichender Genauigkeit berechnet und optimiert werden können.

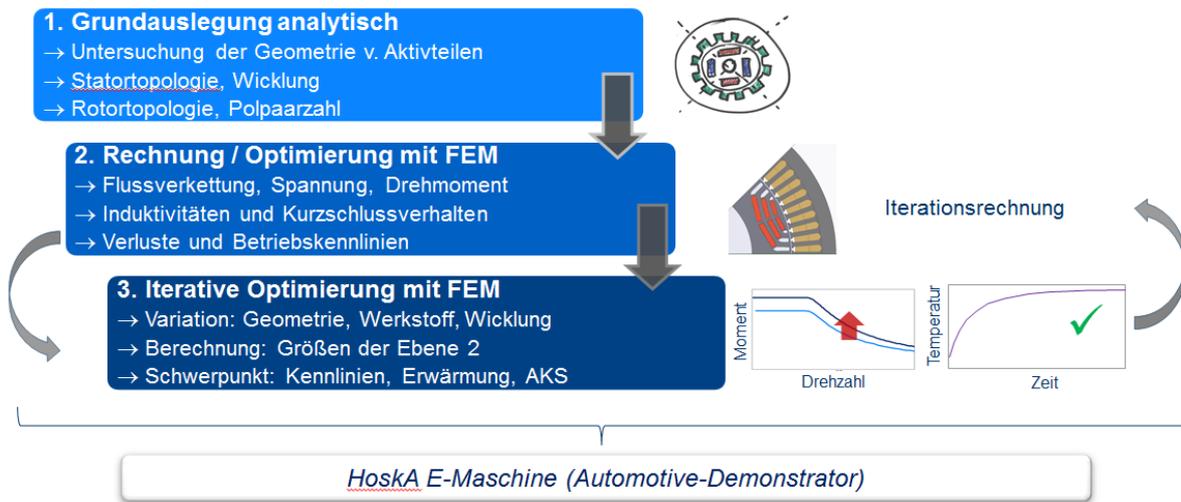


Abbildung 5: Vorgehen zur elektromagnetischen Auslegung des Automotive-Demonstrators

Im Projekt *HoskA* sind aufgrund hoher Drehmomenten- und Leistungsanforderungen komplexe Magnetkrisanordnungen unter Ausnutzung von Reluktanzmomenten nötig, sodass die numerische Feldberechnung zu einem frühen Zeitpunkt der Auslegung erforderlich wird. Die FEM-Berechnungen basieren auf parametrierbaren 2D-FEM-Modellen, die durch gezielte Parametervariation schrittweise optimiert werden. Mit vertretbarem Rechenaufwand können dabei sowohl statische Punkte (Flussdichten im Querschnitt) als auch transiente Vorgänge (Flussverkettungen, induzierte Spannungen) berechnet werden.

Die Erstellung der Betriebs- und Wirkungsgradkennlinien erfolgte im Anschluss an die FEM-Berechnung mit einem separaten Berechnungstool, welches eine gezielte Auswertung unter Vorgabe definierter Randbedingungen vornehmen kann. Die simulierten Maximal- und Dauerkennlinien für Drehmoment und Leistung sind in Abbildung 6 über der Drehzahl dargestellt.

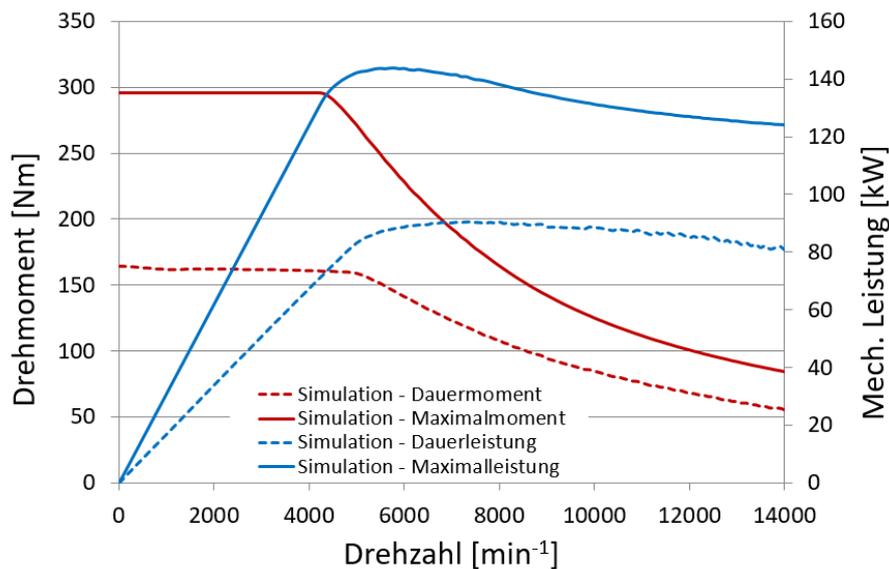


Abbildung 6: Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Leistungskennlinien Automotive-Demonstrator

Mit einem maximalen Drehmoment von 296 Nm sowie einer maximalen Leistung von 155 kW besitzt der Automotive-Demonstrator sowohl eine hohe Drehmomenten- als auch Leistungsdichte (61 Nm/l bzw. 32 kW/l). Dazu ist es nötig eine PMSM mit einer Triple-V Magnetanordnung einzusetzen, die sowohl ein hohes Synchronmoment als auch Reluktanzmoment besitzt. Der Eckpunkt ist nach üblichem Auslegeprozess bei etwa einem Drittel der Maximaldrehzahl angesetzt. Bei einer Polpaarzahl von $p = 4$ und einer Maximaldrehzahl von 14.000 rpm werden Grundfrequenzen in der elektrischen Maschine bis etwa 933 Hz erreicht. Die magnetischen Induktionen in den Statorzähnen, im Statorjoch sowie im Rotor bewegen sich in üblichen Größenordnungen und orientieren sich an den Richtwerten aus [1]. Der magnetische Kreis ist Abbildung 7 gezeigt.

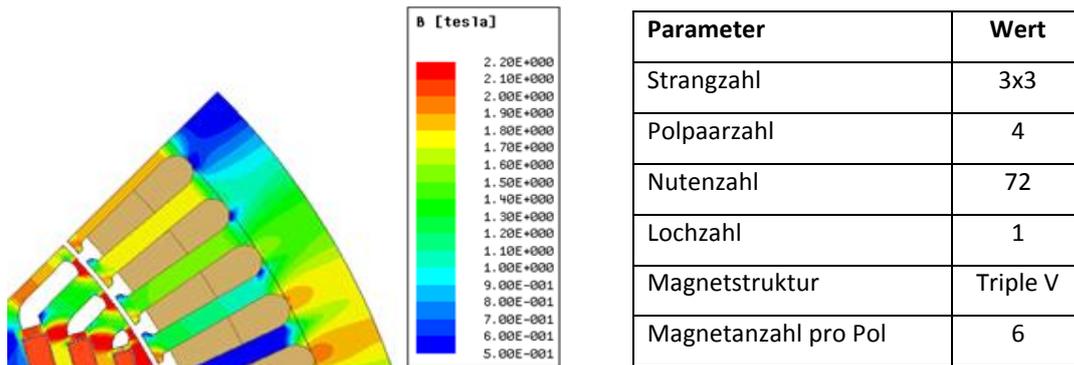


Abbildung 7: HoskA Automotive-Demonstrator – Magnetkreis

Im Hinblick auf die Mehrphasigkeit und die Strangzahl $m = 3 \times 3$ ist im Vergleich zu einer baugleichen und wicklungsangepassten dreisträngigen PMSM ein Drehmomentengewinn von 4,2% aufgrund eines erhöhten Wicklungsfaktors zu erwarten. Zudem ist die Luftspaltstreuung um etwa 12% reduziert. Die Mehrphasigkeit wird innerhalb der Maschine als symmetrische Neunphasigkeit abgebildet, sodass eine gleichmäßige elektrische Phasenverschiebung von 40° vorausgesetzt werden kann. Umrichterseitig wird die Neunphasigkeit mit drei Teilsystemen und somit drei dreiphasigen PowerCores realisiert, wie in Abbildung 8 veranschaulicht ist. Umfangreichere Ausführungen zur Mehrphasigkeit sind ebenso der gemeinsamen Veröffentlichung zu entnehmen [2].

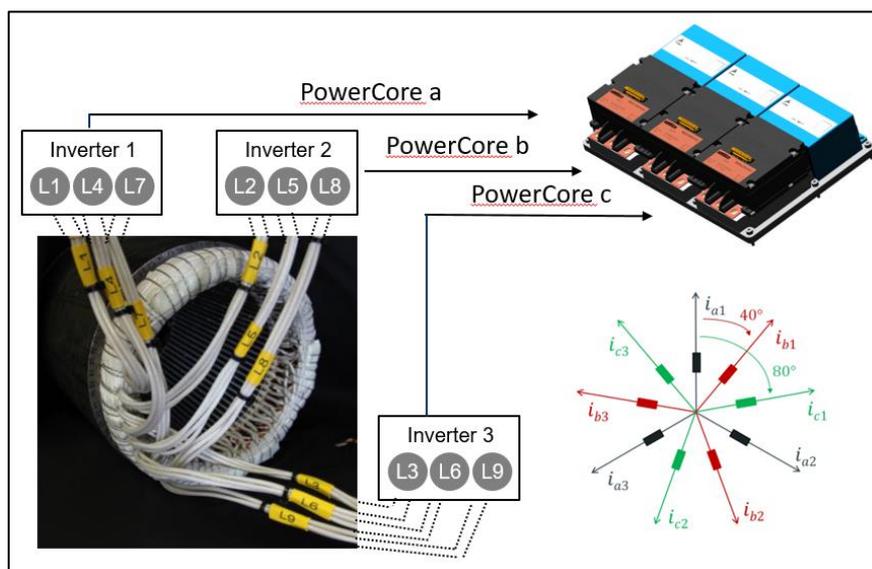


Abbildung 8: Symmetrische Neunphasigkeit mit mehreren Teilsystemen in PowerCore-Architektur

Neben der elektrischen Designoptimierung ist eine thermische und mechanische Feinauslegung und Optimierung durchgeführt worden, die im folgenden Unterabschnitt beschrieben wird.

5.2.3 Mechanische Rotorfestigkeit

Abbildung 9 zeigt Berechnungsergebnisse zur mechanischen Rotorfestigkeit. Dargestellt sind die Von Mises-Spannungen für die Rotortopologie mit Triple-V Struktur für unterschiedliche Drehzahlen. Die Berechnungen zeigen, dass die in der Spezifikation geforderte maximale Rotorgeschwindigkeit von 14.000 Umdrehungen/min unter Einbeziehung ausreichender Sicherheiten möglich ist. Bei dieser Drehzahl werden Umfangsgeschwindigkeiten von etwa 98 m/s erreicht, sodass die elektrische Maschine an der Grenze zur Hochdrehzahlmaschine einzuordnen ist.

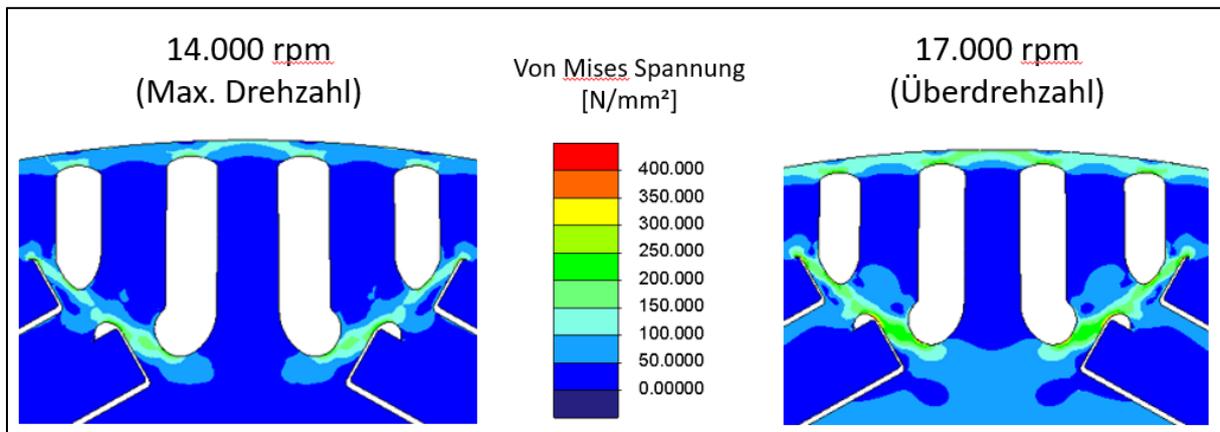


Abbildung 9: Berechnungsergebnisse zur mechanischen Rotorfestigkeit

5.2.4 Konstruktive Auslegung

Die konstruktive Auslegung der elektrischen Maschine umfasst die Konzept- als auch die Fertigungskonstruktion sowie die Zeichnungserstellung. Entsprechend des Integrationskonzepts der Anintegration der PowerCore-Umrichterarchitektur ist die E-Maschine mitsamt der elektrischen, mechanischen und thermischen Schnittstellen auskonstruiert worden. Abbildung 10 zeigt dazu eine CAD-Schnittdarstellung der elektrischen Maschine für den Automotive-Demonstrator ohne die dazugehörigen PowerCore-Umrichterbaugruppen.

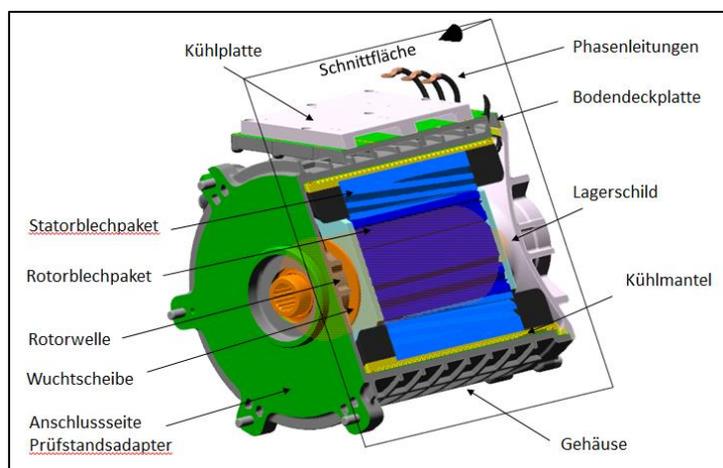


Abbildung 10: Automotive-Demonstrator – CAD-Modell E-Maschine

Dargestellt sind die Phasenleitungen, die am Wickelkopf aus dem Gehäuse geführt werden und die elektrische Schnittstelle zur Umrichter-Architektur abbilden. Die mechanische und thermische Schnittstelle wird über eine maschinengehäusefeste Bodenplatte und eine darüber liegende Kühlplatte mit entsprechender Kühlstruktur realisiert. Die mechanische Adaption der Maschine an den Prüfstand ist an der Anschlussseite zu erkennen. An der Anschlussseite ist für die Inbetriebnahme der E-Maschine eine Adaptervorrichtung vorgesehen, an welcher die E-Maschine verschraubt werden kann. Über eine entsprechende Passverzahnung kann die Maschine dann ihr Drehmoment an den Prüfstand übertragen. Die Passverzahnung ist so ausgelegt, dass auch die Nutzung an einem Fahrzeuggetriebe möglich ist. Für die Prüfstandsumsetzung und Inbetriebnahme der PowerCores steht ein Prüfstandsgetriebe mit entsprechender Drehmomentmesswelle zur Verfügung, welches mit der Lastmaschine gekoppelt wird.

In Abbildung 11 ist eine Front- und Rückseite des CAD-Modells des HoskA Automotive-Demonstrators dargestellt. Die Anintegration der PowerCores *PC1* bis *PC3* erfolgt, wie bereits beschrieben über die Boden- und darüber liegende Kühlplatte unter Anwendung eines geeigneten Dichtkonzepts. Die Position der drei PowerCores ist in der Abbildung entsprechend angedeutet. Zusätzlich sind der Resolver zur Bestimmung der aktuellen Rotorposition sowie Temperatursensoren der E-Maschine konstruktiv eingebunden, deren Signale über einen LEMO-Stecker zu einer Adapterplatine überführt und der übergeordneten Ansteuerung zur Verfügung gestellt werden können.

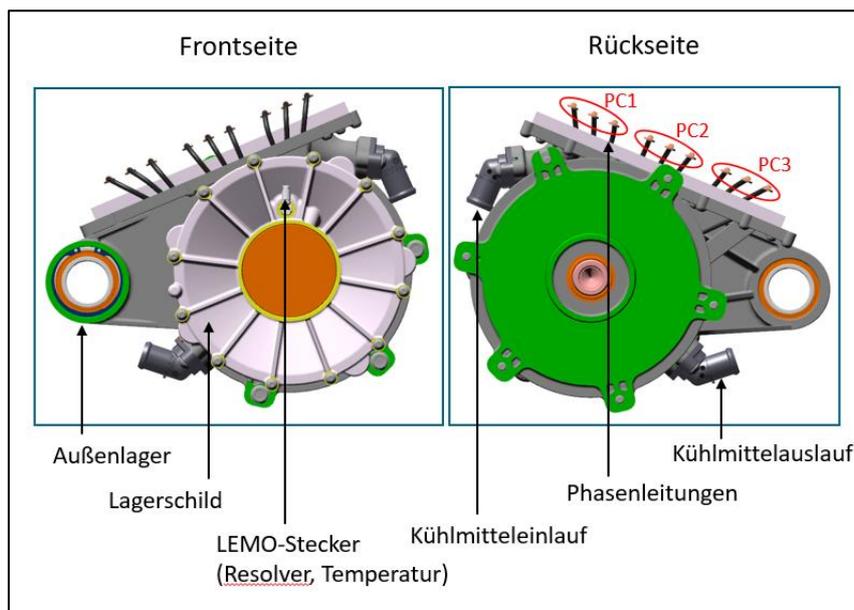


Abbildung 11: Automotive-Demonstrator – Front- und Rückseite E-Maschine

Des Weiteren sind die Kühlmittelanschlüsse (Kühlmittelstutzen) am seitlichen Gehäuse der E-Maschine zu erkennen, die sowohl Leistungselektronik als auch E-Maschine mit einem übergeordneten Kühlkreislauf verbinden. Ein Zusammenschluss der Kühlkreisläufe von Umrichter und E-Maschine ist dabei für Testzwecke nicht zwangsläufig notwendig, kann jedoch über ein außenliegendes U-Rohr erfolgen.

Das Antriebsaggregat ist derart konstruiert, dass die E-Maschine auch ohne die Kühlplatte und der PowerCore-Architektur an einem externen Umrichter betrieben werden kann. Die in Abbildung 12 dargestellte und anintegrierte PowerCore-Architektur kann dazu zusammen mit der Kühlplatte demontiert werden, der Kühlkreislauf für die leistungselektronischen Baugruppen ist entsprechend abzuklemmen. Eine Inbetriebnahme der E-Maschine unabhängig von den Umrichtereinheiten ist somit möglich.

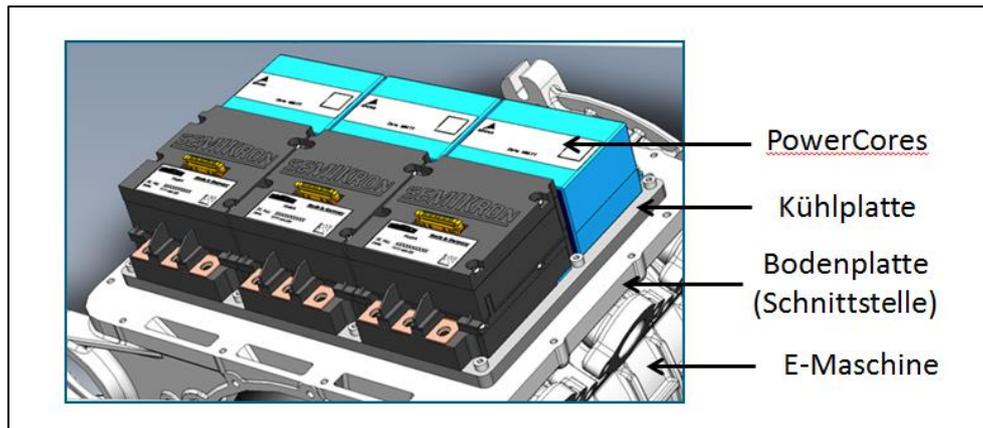


Abbildung 12: Anintegration der Umrichtereinheiten an das E-Maschinengehäuse

5.3 Aufbau der E-Maschine für den Automotive Demonstrator

Im Rahmen des Teilvorhabens „Auslegung und Bewertung eines Hochdrehzahltraktionsantriebs und fahrzeuggerechte Spezifikation des PowerCores“ sind zwei Prototypen für den Automotive-Demonstrator aufgebaut worden. Zusätzlich ist ein Statorwickelmuster erstellt worden, um insbesondere die Isolationseigenschaften in Verbindung mit der mehrphasigen Wicklungsausführung sowie die geometrischen Wickelkopfabmessungen zu überprüfen.

5.3.1 Voruntersuchungen an Wickelmuster

Die Voruntersuchungen am Statorwickelmuster stellen einen ersten Schritt dar, um Isolations- und Wicklungseigenschaften sowie geometrische Wickelkopfabmessungen für eine finale Prototypenumsetzung zu prüfen. Dazu ist im Rahmen des Projekts vor Beginn der Prototypenfertigung ein Statorblechpaket gefertigt und mit der neunphasigen Wicklungsausführung versehen worden. An dem Wickelmuster sind anschließend zunächst erfolgreich Isolations-, Stoßspannungs- sowie Hochspannungsprüfungen gemäß hausinterner Normen durchgeführt worden. In einem zweiten Schritt sind sowohl Kupferfüllfaktor als auch geometrische Abmessungen überprüft worden. Der Kupferfüllfaktor beträgt etwa 43% und liegt somit im prognostizierten Bereich. Die so experimentell ermittelten geometrischen Wickelkopfabmessungen fließen in die Fertigungskonstruktion ein.

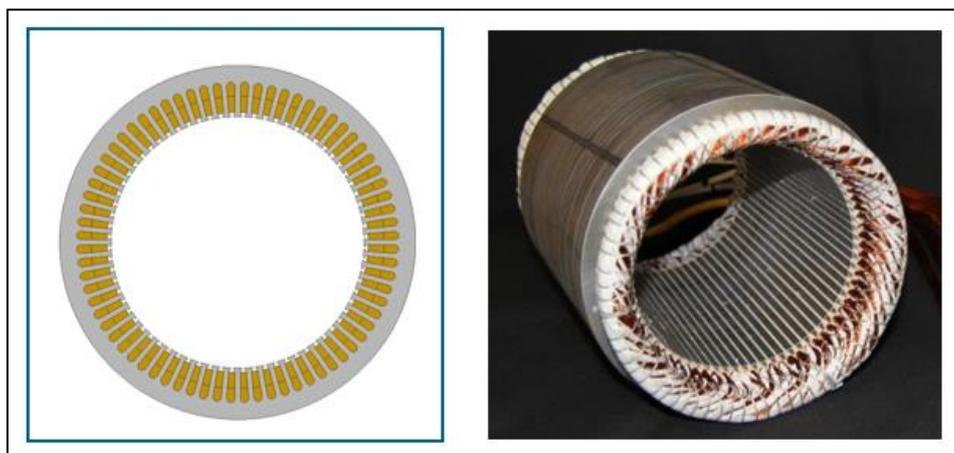


Abbildung 13: Automotive-Demonstrator – Statorwickelmuster

5.3.2 Fertigung der Aktivteile

Die Fertigung der Aktivteile der E-Maschine umfasst das bewickelte Statorblechpaket sowie das Rotorblechpaket mit den eingesetzten Magneten.

Im Wickelkopf der Statorwicklung sind zudem zur Temperaturerfassung drei Temperatursensoren vom Typ *PT1000* positioniert, die jeweils in den Sternpunkten der dreisträngigen Teilsysteme liegen. Der Wickelkopf ist nach Abschluss der Wicklungseinlegung mit einem Vergussharz zu einem Kreisring vollvergossen worden. Gleichzeitig wurde das Rotorblechpaket mit den eingesetzten Magneten aufgebaut.

5.3.3 Fertigung der Passivkomponenten und Zusammenbau

Zusätzlich zu den Aktivteilen sind Passivkomponenten beschafft bzw. gefertigt worden, um für den Demonstratoraufbau zur Verfügung gestellt zu werden. Wesentliche Komponenten dabei sind:

- Kühlmantel mit Kühlstruktur
- Gehäuse mit Wasseranschlüssen
- Rotorwelle
- Lager und Lagerschild
- Rotorlagegeber

Die nach dem Zusammenbau aller Komponenten fertiggestellte E-Maschine für den Automotive-Demonstrator ist in Abbildung 14 zu erkennen.



Abbildung 14: Automotive-Demonstrator (E-Maschine) ohne PowerCores

5.4 Inbetriebnahme und Messungen am Prüfstand

Die Inbetriebnahme des Automotive-Demonstrators erfolgte sowohl am Prüfstand des Projektpartners Fraunhofer IISB als auch am Prüfstand der Volkswagen AG. Im Vorfeld sind zum Testen der Ansteuerung und Regelung des Neunphasensystems Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulationen mit einem SCALEXIO-Simulator der Fa. dSPACE durchgeführt worden. Für die anschließende Ansteuerung der Leistungselektronik wurde im Projekt ein Rapid Control Prototype - System (RCP) mit einer MicroLabBox der Fa. dSPACE eingesetzt.

5.4.1 Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen

Die moderne Entwicklung elektrischer Antriebe erfolgt heutzutage mit Unterstützung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge sowohl während der Auslegungs- als auch zum Beginn der Verifikationsphase.

Nachdem die FEM-basierte Auslegung der E-Maschine abgeschlossen ist, sind die Systemgrenzen zu erweitern und der gesamte Antrieb inklusive Leistungselektronik, Ansteuerung und Regelung zu simulieren. Die herkömmlichen Methoden erfordern für diesen Schritt eine starke Modellvereinfachung und eine Linearisierung der typischerweise nichtlinearen Zusammenhänge im Antrieb, sodass bestimmte Randeffekte bei dieser Modellierung nicht berücksichtigt werden können. Die Reduzierung der Modelltiefe sorgt darüber hinaus dafür, dass nicht alle Antriebsgrößen einbezogen werden. Um diesem Problem zu begegnen, können so genannte Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen auf modernen Rechnersystemen eingesetzt werden. Hierbei wird ein Teil der Regelstrecke durch eine echte Hardware und ein Teil durch ein Software-Modell nachgebildet. Während der Entwicklungsphase kann so die Aufteilung zwischen Software-Modellen und der echten Hardware beliebig geändert und die Entwicklung somit unabhängig von der Verfügbarkeit der Hardware gestaltet werden.

Der im Teilvorhaben eingesetzte SCALEXIO-Simulator verfügt über eine hohe Rechenleistung und ist mit einem FPGA ausgestattet. Der FPGA wird mit sehr hohen Taktraten betrieben, sodass leistungselektronische Schaltvorgänge auf Modellebene nachvollzogen werden können. Im Projektverlauf sind sowohl die neunphasige E-Maschine als HiL-Modell aufgebaut als auch die wesentlichen Teile der Leistungselektronik und Regelung im FPGA nachgebildet worden. Das grundsätzliche Verhalten der E-Maschine bei feldorientierter Regelung konnte getestet werden.

5.4.2 Umrichterintegration und Ansteuerung

Nach Aufbau des Automotive-Demonstrators sowie der Durchführung der HiL-Simulationen konnte die PowerCore-Architektur sowohl mechanisch, thermisch und elektrisch als auch softwareseitig an den Automotive-Demonstrator integriert werden. Die für den Automotive-Demonstrator eingesetzte PowerCore-Architektur bestehend aus drei dreiphasigen Umrichtereinheiten (B6-Brücken) ist dazu in Abbildung 15 gezeigt.

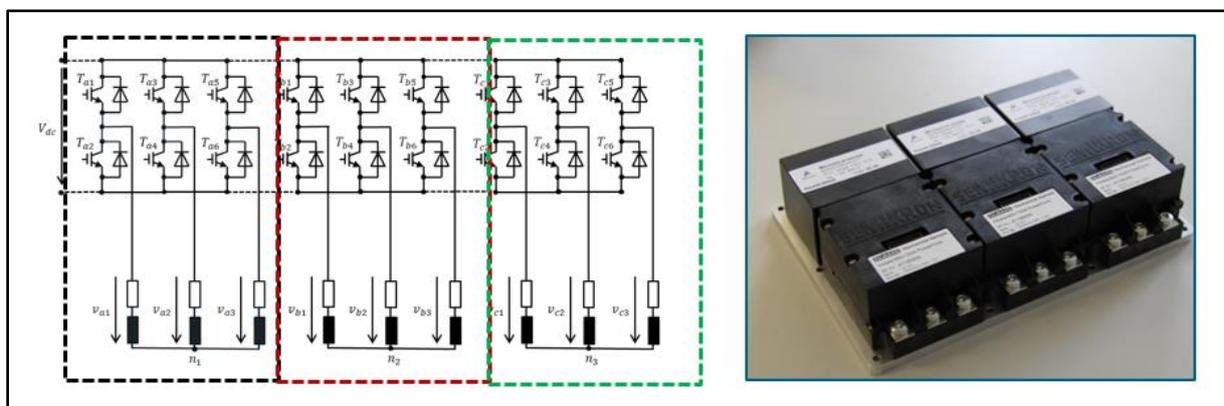


Abbildung 15: Automotive-Demonstrator – PowerCore Umrichter

Für die Ansteuerung des Wechselrichters wurde im Projekt ein Rapid Control Prototype - System (RCP) mit einer MicroLabBox der Fa. dSPACE eingesetzt, die über 48 digitale und 32 analoge

Schnittstellen sowie ein programmierbares FPGA verfügt und im Prüfraum direkt neben dem Prototypen aufgebaut werden kann. Die RCP-Systeme erlauben eine sehr hohe Flexibilität und verfügen über eine moderne Hardware, bestehend aus einem starken Prozessor und einem großen FPGA. Die Signale werden von Motor und PowerCores über ein vom Fraunhofer IISB angefertigtes Adapterboard zur MircoLabBox geführt. Die vom Motor kommenden Signale beschränken sich auf das Resolver-Signal zur Rotorlageermittlung und die Temperatursignale der drei im Wickelkopf positionierten Temperatursensoren (Pt1000).

Die Entwicklung der Regelungssoftware wurde im Projekt federführend vom Fraunhofer IISB übernommen. Die Entwicklung der Regelungssoftware ist von der Volkswagen AG jedoch aktiv begleitet und gezielt unterstützt worden. Zu den Arbeitsinhalten zählen unter anderem die gemeinsame Implementierung der Regler für Stromoberschwingungen mit Vorgabe entsprechender Reglerparameter, die Vorgabe der Regelstrategie und Parametertabellen, die Integration von OEM-spezifischer CAN-Kommunikation sowie eine robuste Anbindung des Rotorlagegebers an das dSPACE-System.

Die Funktion des Rotorlagegebers hat eine besondere Bedeutung für permanentmagneterregte Traktionsantriebe, da eine zuverlässige Drehmomentbildung aus dem Stillstand heraus bei einer feldorientierten Regelung nur mit einem zuverlässigen Rotorlagegeber möglich ist. Aufgrund von EMV-Störungen ist für den Betrieb auf dem VW-Prüfstand daher eine Anpassung der Resolver-Schnittstelle vorgenommen worden, sodass sich eine deutliche Verbesserung der Antriebsregelung (Stabilität etc.) erzielen ließ. Die softwareseitige Einbindung der Resolver-Schnittstelle konnte durch Übertragung bereits vorhandener Module erfolgreich umgesetzt werden.

Im Rahmen der Prüfstandsvorbereitung sind zusätzlich zu hardwareseitigen Schutzmaßnahmen softwareseitig Sicherheits- und Abschaltgrenzen eingebunden worden, die u.a. folgende Aspekte beinhalten:

- Prüflingsschutz E-Maschine: Strom- und Spannungsgrenzen
- Prüflingsschutz E-Maschine: Temperaturgrenzen
- Prüflings- und Prüfstandsschutz: Begrenzung Kühlmitteldurchfluss
- Prüflings- und Prüfstandsschutz: Drehzahl- und Drehmomentgrenzen
- Sicherheitskonzept: Reglerausfall / Störung dSpace
- Sicherheitskonzept: Kommunikation Prüfstand/dSpace

5.4.3 Erstinbetriebnahme und Maschinentests

Die Erstinbetriebnahme der E-Maschine des Automotive-Demonstrators ist ohne PowerCore-Architektur auf dem VW-Prüfstand erfolgt. Nach den nötigen Vorprüfungen (Isolationswiderstand, Spannungsfestigkeit, Potentialausgleich etc.) sind im Rahmen der Einzelprüfung der E-Maschine Phasenfolge, Maschinenparameter, Permanentmagnetflussverkettung, Kurzschlussverhalten sowie thermischer Widerstand überprüft bzw. gemessen worden.

Im Hinblick auf die Phasenfolge und Maschinenparameter sind erwartungsgemäß gute Übereinstimmungen zwischen Berechnung und Messung erzielt worden. Ebenso konnte unter Einbezug einzeln vermessener Magnete nur eine geringe Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Phasenleerlaufspannungen festgestellt werden, wie in Abbildung 16 zu erkennen ist.

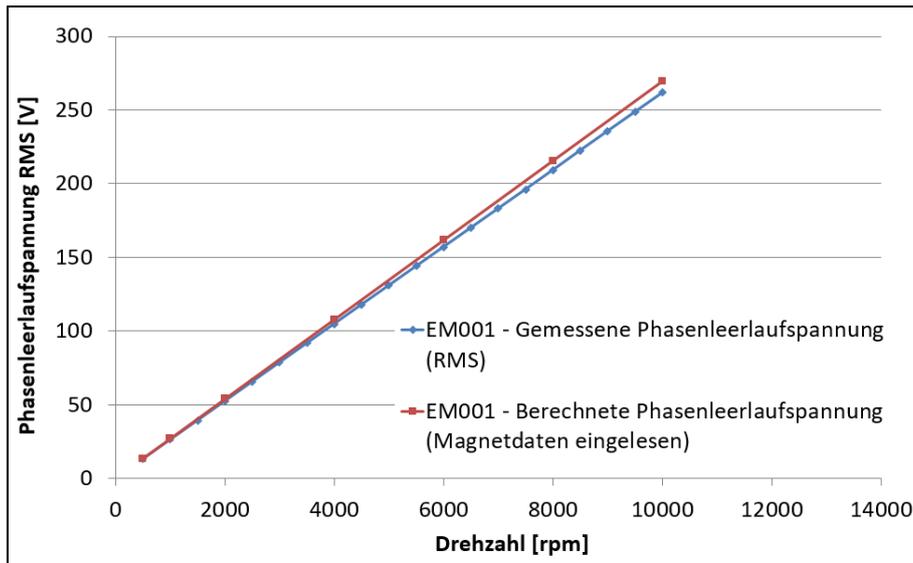


Abbildung 16: E-Maschine Automotive-Demonstrator - Leerlaufspannungen

Die Phasenleerlaufspannungen sind dazu auf dem Prüfstand bis zu einer Drehzahl von 10.000 min^{-1} gemessen worden, wobei bei einer Drehzahl von 10.000 min^{-1} eine Abweichung von 3 % zwischen Simulation und Messung ermittelt werden konnte. Die somit begründete Abweichung in der Permanentmagnetflussverkettung liegt somit in einem Bereich üblicher Fertigungstoleranzen bzw. ist auf Magnettemperaturtoleranzen sowie Auslegungstoleranzen im Hinblick auf Streueffekte zurückzuführen.

Im Anschluss an die Leerlaufmessungen sind Kurzschlussversuche durchgeführt worden, um einerseits Kurzschlussstrom und -moment bestätigen sowie Maschinenparameter (z.B. d-Induktivität oder thermischen Widerstand) verifizieren zu können. Dazu sind, wie in Abbildung 17 dargestellt, die drei dreiphasigen Teilsysteme jeweils kurzgeschlossen worden. Die PowerCore-Architektur wurde dazu teilweise entfernt, um eine Einzelprüfung der Maschine sicherstellen zu können.

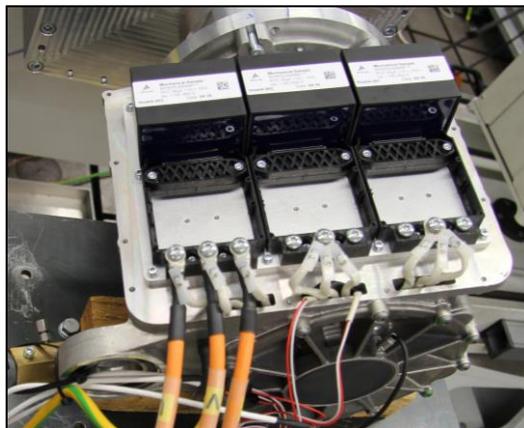


Abbildung 17: E-Maschine Automotive-Demonstrator – Kurzschlussversuch

Die gemessene d-Induktivität beträgt 1126 uH und bestätigt somit näherungsweise die Simulationsergebnisse. Der zu Auslegungsbeginn abgeschätzte thermische Widerstand der elektrischen Maschine von etwa $0,025 - 0,028 \text{ K/W}$ kann ebenso mittels Kurzschlussmessung auf etwa $0,026 \text{ K/W}$ verifiziert werden. Dazu sind im Kurzschluss die stationären

Wickelkopftemperaturen entsprechend Abbildung 18 über der Zeit aufgezeichnet und die Verlustleistung bestimmt worden.

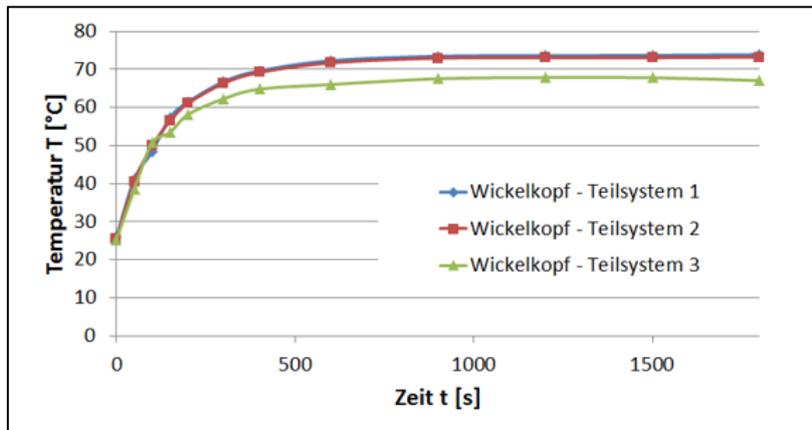


Abbildung 18: E-Maschine Automotive-Demonstrator – Bestimmung thermischer Widerstand

5.4.4 Geregelter Betrieb und Messungen im Kennfeld

In einem nächsten Schritt ist die Anintegration der PowerCores ans Maschinengehäuse erfolgt, um den Umrichterbetrieb und die Umsetzung des erarbeitete Skalierungs- sowie Integrationskonzept (inkl. Schnittstellenkonzept) am Prüfstand nachweisen zu können. In Abbildung 19 ist der Prüfstandsaufbau am VW-Antriebsprüfstand veranschaulicht. Dargestellt sind die Prüfstandslastmaschine, ein zwischengeschaltetes Hochsetzgetriebe mit Maschinenadapter sowie der Automotive-Demonstrator mit integrierter PowerCore Umrichterstruktur.

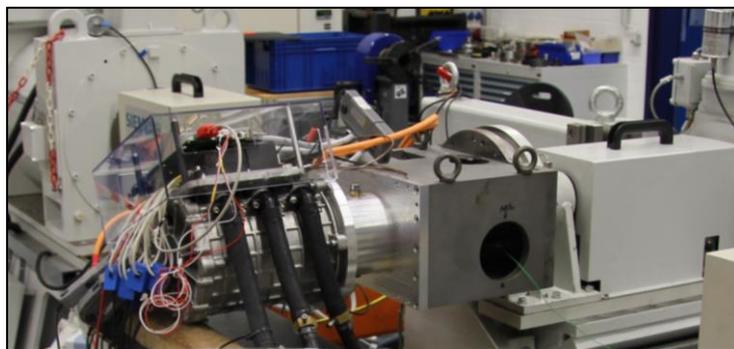


Abbildung 19: Automotive-Demonstrator mit integrierten PowerCores am VW-Antriebsprüfstand

Die Signale der E-Maschine sowie der PowerCores werden über ein Adapterboard an die MicroLabBox der Fa. dSPACE überführt, auf welcher die feldorientierte Regelung implementiert ist. Die mehrphasige Regelung ist ausschließlich als Stromregelung ausgeführt, wobei die Stromsollwerte entsprechend einer MMPA/MMPV (Maximales-Moment-Pro-Ampere/Maximales-Moment-Pro-Volt)-Betriebsstrategie aus Lookup-Tabellen vorgegeben werden. Ein Abgleich zwischen simulierten und gemessenen Maximal- als auch Dauerkennlinien ist bis zu einer Drehzahl von 7.000 min^{-1} in Abbildung 20 gegeben. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung sind einerseits auf die Nichtberücksichtigung von Fertigungstoleranzen sowie nichtlinearem Umrichterverhalten in der Simulation zurückzuführen. Andererseits sind die Temperaturen in den Permanentmagneten zwischen Simulation und Messung aufgrund fehlender Temperatursensoren nicht miteinander abgeglichen. Aufgrund von Prüfstandsgrenzen konnte der Antrieb im Rahmen des Projektes nicht bis zur maximalen Drehzahl betrieben werden.

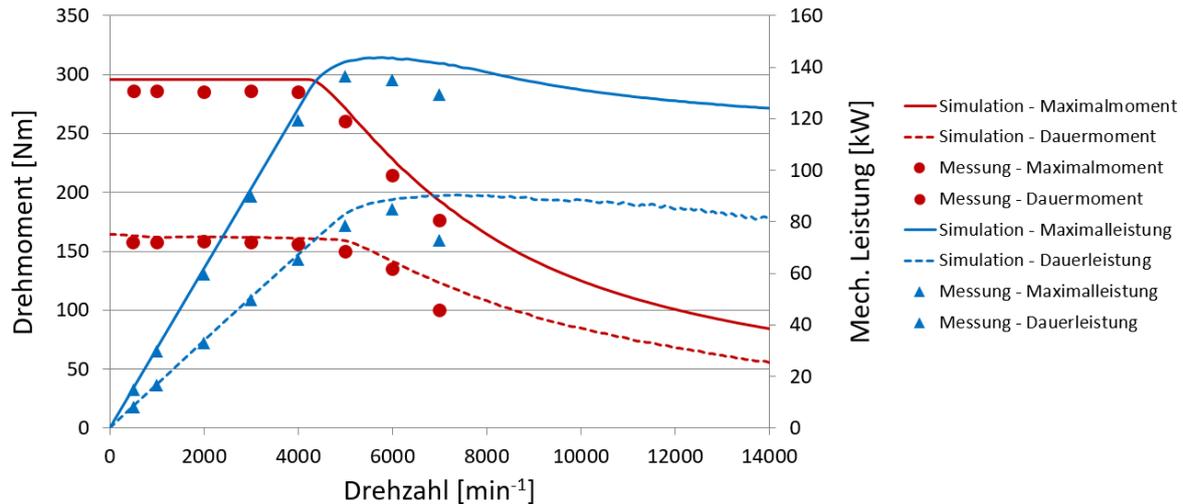


Abbildung 20: Automotive-Demonstrator mit integrierten PowerCores am VW-Antriebsprüfstand

6 Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens ist ein Konzept erarbeitet und umgesetzt worden, welches eine Leistungsskalierung mit Hilfe modularer und generischer Umrichterbaugruppen ermöglicht. Zudem ist ein Ansatz zur Baumraumintegration der skalierbaren PowerCore-Architektur vorgestellt worden. Insbesondere vor dem Hintergrund von Skaleneffekten ist es unter bestimmten Rahmenbedingungen denkbar durch diesen Ansatz Kostenvorteile aufgrund reduzierter Entwicklungsaufwände zu erzielen.

Im Projektrahmen konnten die definierten Potentiale bezogen auf die Technologieschwerpunkte

- Niederinduktives Leistungsmodul (sowie Kommutierungskreis)
- Verlustreduktion und Effizienzsteigerung durch den Einsatz von SiC-Technologie
- Paralleler Betrieb modul-integrierter und niederinduktiv angebundener Zwischenkreis-kondensatoren
- Skalierbarkeit und Integration einer Umrichter-Architektur
- Vorteilhafte Eigenschaften mehrphasiger E-Maschinen

untersucht und nachgewiesen werden. Damit stehen erforderliche Bewertungsgrundlagen und ein Technologiebaukasten für eine mögliche Umsetzung in zukünftigen Serienprodukten zu Verfügung.

7 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ansätze im Hinblick auf skalierbare und modulare Umrichtereinheiten sind in verschiedenen Projekten auch vor dem Hintergrund einer Mehrphasigkeit bereits untersucht worden [3]. Der in diesem Projekt verfolgte Ansatz eines modul-integrierten Zwischenkreiskondensators sowie dessen niederinduktive Anbindung mit Folientechnologie sind bisher nicht bekannt. Durch die niederinduktive Anbindung und den Einsatz von SiC-Leistungshalbleiter ist seitens des Wechselrichters eine Erhöhung der Spannungssteilheit unter Ausnutzung erhöhter Effizienzen möglich.

8 Veröffentlichungen

Im Teilvorhaben der Volkswagen AG ist auf folgenden Veranstaltungen zu Projektergebnissen berichtet worden:

Fachtagung Elektromobilität, <i>Berlin</i>	–	24.04.2018
PCIM Europe 2018, <i>Nürnberg</i>	–	05.07.2018 – 07.07.2018

9 Verwendete Quellen

- [1] G. Müller, K. Vogt und B. Ponick. „Berechnung elektrischer Maschinen – Elektrische Maschinen (Band Nr.2)“, 6. Auflage Oktober 2007.
- [2] S. Piepenbreier, J. Berlinecke, N. Burani, R. Bittner, S. Matichyn, F. Streit, M. Hofmann, R. Plikat. „Analysis of a Multiphase Multi-Star PMSM Drive System with SiC-Based Inverter for an Automotive Application“, PCIM Europe 2018, 5-7 June 2018.
- [3] Steinbrink, J., Heseding, J. und Müller-Deile, F., Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, „Verbundvorhaben: Bezahlbare Elektrische REIchweite durch Modularität: Titel des Teilvorhabens: Kongruenter modularer Baureihenentwurf von elektrischen Antriebssystemen für die Elektromobilität: Schlussbericht: Berichtszeitraum: von 01.01.2013 bis 31.03.2016“, TIB 2016.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Hocheffiziente und skalierbare Umrichterbausteine für Hochdrehzahl-Antriebe (HoskA) - Abschlussbericht zum Teilvorhaben „Auslegung und Bewertung eines Hochdrehzahltraktionsantriebs und fahrzeuggerechte Spezifikation des PowerCores“ der Volkswagen AG	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Julian Berlinecke Christian Mertens Robert Plikat Hermann Wetzel Christoph Kaufhold	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2018
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Volkswagen AG Berliner Ring 2 38440 Wolfsburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EMO0153
	11. Seitenzahl 21
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 20
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TIB Hannover, Hannover, 12.07.2019	
18. Kurzfassung Ein breiter werdendes Spektrum an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verlangt nach elektrischen Antrieben unterschiedlicher Leistungen und Drehmomente. Im Rahmen des Verbundprojektes HoskA ist ein generischer SiC-PowerCore erforscht worden, der durch systemische Verschaltung eine Skalierung der Leistung auf Umrichterseite ermöglicht. Zur Demonstration wurde eine entsprechend über die Phasenzahl skalierbare Traktionsmaschine für Automotivanwendungen im Leistungsbereich von 150kW entworfen, die das Konzept einer zur Skalierung geeigneten mechanischen und elektrischen Schnittstelle zur Integration der Leistungselektronik an die Maschine darstellt. Anhand eines Demonstratorprototypen wurde im Prüfstandssystemtest das erarbeitete Gesamtsystem validiert und hinsichtlich seiner Gesamtperformance verifiziert.	
19. Schlagwörter Elektrofahrzeug, Elektroantrieb, Mehrphasenmaschine, Leistungselektronikintegration, PowerCore	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Hocheffiziente und skalierbare Umrichterbausteine für Hochdrehzahl-Antriebe (HoskA) - Abschlussbericht zum Teilvorhaben „Auslegung und Bewertung eines Hochdrehzahltraktionsantriebs und fahrzeuggerechte Spezifikation des PowerCores“ der Volkswagen AG	
4. author(s) (family name, first name(s)) Julian Berlinecke Christian Mertens Robert Plikat Hermann Wetzel Christoph Kaufhold	5. end of project 31.12.2018
	6. publication date planned
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Volkswagen AG Berliner Ring 2 38440 Wolfsburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 16EMO0153
	11. no. of pages 21
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 3
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 20
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TIB Hannover, Hannover, 12.07.2019	
18. abstract A growing variety of electrical driven cars needs electrical drives of varying power and torque. A generic SiC based power core has been investigated within the joint project HoskA. The power cores enable by combination and system configuration a scaling of power of the inverter unit. To demonstrate the drive concept a traction machine suitable for automotive application has been designed that is in principle scalable in power rating by variation of phase number and that shows the related concept of mechanical and electrical scalable interfaces to integrated power electronics. A drive prototype for test bench operation was realized and validated the system idea and verified the possible system performance.	
19. keywords Electric car electric drive, multiphase machine, power electronic integration, power core	
20. publisher	21. price