

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht 3Ccar

Zuwendungsempfänger: Daimler AG 70546 Stuttgart	Förderkennzeichen: 16EMOE009
Vorhabensbezeichnung: "Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars – 3Ccar"	
Teilvorhaben der Daimler AG: Sicherheits- und Sensorkomponenten für elektrische Antriebssysteme	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2015 bis 31.10.2018	
Berichtszeitraum: 01.01.2018 bis 31.12.2018	
Datum: 30.04.2019	
Vorgelegt beim Projektträger: Simon Brunner VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Steinplatz 1 10623 Berlin	
Vorgelegt durch: Dr. Wolfgang Wondrak Daimler AG Hanns-Klemm-Str. 45 71034 Böblingen Email: wolfgang.wondrak@daimler.com	

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16EMOE009 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

1.	Kurze Darstellung	3
1.1.	Aufgabenstellung für das Projekt 3Ccar.....	3
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4.	Stand von Wissenschaft und Technik	5
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2.	Eingehende Darstellung.....	10
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
2.1.1.	WP1: Requirements	10
2.1.2.	WP2: System Level Design.....	14
2.1.3.	WP4: Embedded Systems and Computing Algorithms	24
2.1.4.	WP6: Validation and Tests	25
2.1.4.1.	Untersuchungen an Stromsensoren	25
2.1.4.2.	Aufbau eines Getriebeanschauungsmusters	27
2.1.4.3.	Vermessung von E-Maschine und Inverter	28
2.1.5.	WP7: Dissemination, Exploitation and Standardization	34
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	35
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	35
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	36
2.5.	Während der Durchführung bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	36
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	37
3.	Abbildungsverzeichnis.....	38

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung für das Projekt 3Ccar

Das Projekt 3Ccar hatte zum Ziel, neuartige integrierte Komponenten zur Komplexitätskontrolle in erschwinglichen intelligenten Elektroautos bereitzustellen.

Die Daimler AG beteiligte sich hierbei schwerpunktmäßig in den Supply Chains SC2 „Automotive Powertrain“, SC3 „Smart Semiconductors for Fuel Cell“ und SC6 „Embedded Power Modules“.

Bezogen auf die Arbeitspakete wirkte Daimler als Systemhersteller vor allem in der Anfangsphase im Rahmen des AP1 „Spezifikation“ und AP2 „Design“ und gegen Ende des Projektes, in der Test- und Beurteilungsphase, im Rahmen der APs 3 und 5 mit. Neben der Erarbeitung der Anforderungen an Antriebsstrang und Leistungselektronik betrafen die speziellen Arbeitsumfänge Spezifikation und Test neuer Sicherheitsschalter für HV Anwendungen. Wesentliche Beiträge waren die Untersuchung neuer, mehrphasiger Elektromotoren, diese hinsichtlich Sicherheit und Fail-Safe Verhaltens zu beschreiben und zu regeln. Darüber hinaus war die Mitarbeit beim Integrationskonzept für die Antriebskomponenten und die Ausarbeitung der Getriebeauslegung Gegenstand der Arbeitsumfänge.

Daimler hatte in dem Projekt die Leitung des Arbeitspakets WP1 sowie die Leitung der Supply Chain 3 „Smart Semiconductors for Fuel Cell“ inne.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde im Rahmen eines Projektkonsortiums, zusammengesetzt aus mehreren Partnern aus Industrie und Forschung, durchgeführt. Grundlage für die Zusammenarbeit war der entsprechende Konsortialvertrag.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben umfasste einen Zeitraum von ursprünglich 36 Monaten, der um 5 Monate auf 41 Monate verlängert wurde. Die Aktivitäten im Projekt waren unterteilt in mehrere Arbeitspakete (APs bzw. WPs = work packages), die sich grob am V-Entwicklungsmodell (s. Abbildung 1) orientieren:

- AP1: Requirements
- AP2: System Level Integration
- AP3: Nanoelectronic devices and modules
- AP4: Embedded systems and computing algorithms
- AP5: System integration and demonstration
- AP6: Validation and Test

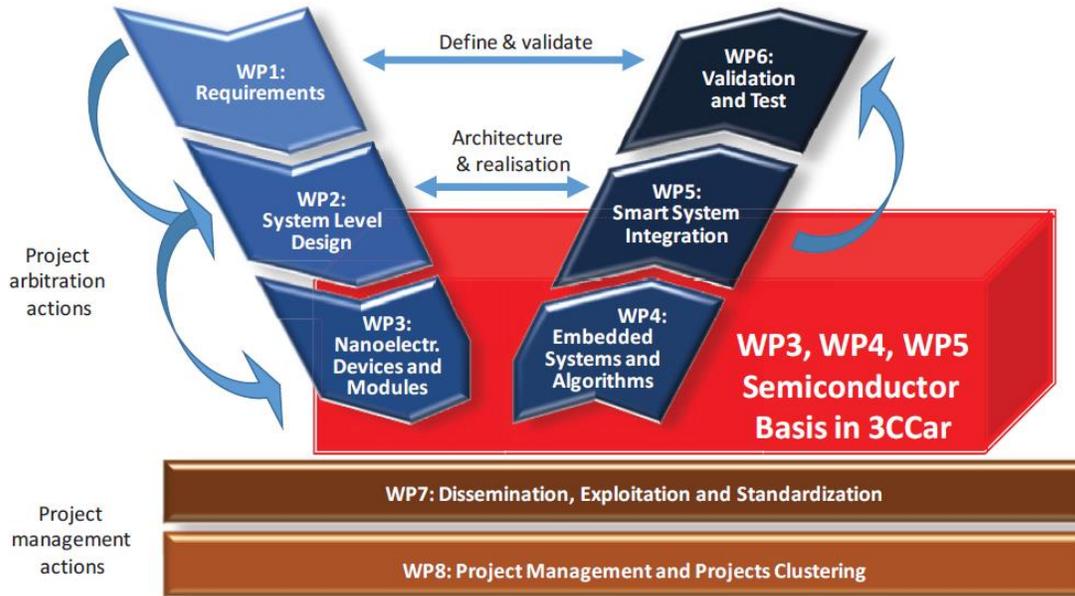


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur in 3Ccar

Zusätzlich beinhaltet das Projekt zwei weitere Arbeitspakete, die sich mit der Veröffentlichung, Verwertung und Standardisierung der Arbeitsergebnisse (AP7) sowie dem übergreifenden Projektmanagement (WP8) befassen. Die zeitliche Einordnung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Gantt Chart		Task leader	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
WP1	Requirements	Daimler																																						
WP2	System level design	VIF																																						
WP3	Nanoelectronic devices and modules	IFAG																																						
WP4	Embedded systems and computing algorithms	IXION																																						
WP5	System integration and demonstration	Siemens																																						
WP6	Validation and test	Valeo																																						
WP7	Dissemination, exploitation and standardisation	MB																																						
WP8	Project management	IFAG																																						

Abbildung 2: Projektplan 3Ccar

Die Beiträge der Daimler AG umfassten dabei die Arbeitspakete 1, 2, 4 und 6, sowie 7:

Tabelle 1: Beiträge der Daimler AG

Aufgabe	Arbeitsinhalte	PM	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
AP1	Spezifikation der Halbleiterbauelemente, der Module und der Inverter für den integrierten Antriebsstrang sowie der HV Spannungswandler und Entladeschaltung für SC3. Ableitung von Anforderungen an eine 6-phasige elektrische Antriebsmaschine	5												
AP2	Ausdetaillierung der Systemanforderungen an den Antrieb und die elektrische Maschine (z.. Sicherheit) sowie an Komponenten für den sicheren Betrieb von Brennstoffzellen unterstützt durch Simulationen. Untersuchung von Leistungsmodulen mit integrierter Sensorik	10												
AP4	Entwicklung von Regelungsverfahren für mehrphasige Elektromotoren, sowie Aufbau einer entsprechenden Entwicklungs- und Prüfumgebung.	5												
AP6	Validierung und Test der Maschinenregelung, der Brennstoffzelle mit Halbleiterschaltenelementen und Spannungswandler sowie der Sensorik in intelligenten Leistungsmodulen und Antriebskomponenten	7												
AP7	Veröffentlichung der Ergebnisse	1												
	Gesamt	28												

1.4. Stand von Wissenschaft und Technik

Für Elektrotraktion und die zugehörige Sensorik ist die Reduzierung der Herstellungskosten ein ganz bedeutendes Ziel. Mit den derzeitigen Kostenstrukturen lassen sich die ehrgeizigen CO2 Einsparpotenziale nur schwer in die Realität umsetzen, da mit einem zu geringen Kaufinteresse gerechnet werden muss.

In Zukunft ist mit einer Erhöhung der Systemreichweiten und Systemleistungen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen zu rechnen. Einflussfaktoren sind internationale Anforderungen an alternative Antriebe. Für den Einsatz nach 2020 ist damit zu rechnen, dass aufgrund der Bauraumrestriktionen bei Hybridfahrzeugen Leistungsdichten bei Invertern auf ca. 100kW/Liter anwachsen werden, was mehr als einer Verdopplung des heutigen Stands der Technik entspricht.

Technische Herausforderungen bestehen in der Verbesserung der Hochvolt-Leistungsbaulemente in den Wechselrichtern zur Verbesserung des Wirkungsgrades, der Einsatz von Bauelementen mit integrierter Sensorik für schnelleres und sicheres Abschalten im Kurzschlussfall, und robuster Sensorik zur Sicherstellung stabiler Fahrzustände mit deutlich verringertem Aufwand. Ebenso würden neue Leistungsbaulemente mit sehr hoher Stromtragfähigkeit bei minimalen Durchlassverlusten neue Lösungen im Bereich der Absicherung der HV Bordnetze

ermöglichen. Zur Zeit werden Schmelzsicherungen und mechanische Relais an der Batterieseite der HV Netzte eingesetzt. Diese sind besonders bezüglich der abschaltbaren Ströme, Spannungen (unter 450V) und in Bezug auf ihre mechanische Robustheit und Baugrößen unvorteilhaft.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund des großen inhaltlichen Umfangs des Projekts sowie der großen Anzahl von Projektpartnern wurde eine weitere Unterteilung des Projekts in thematisch zusammenhängende Teilprojekte (supply chains, SCs) vorgenommen (Abbildung 3):

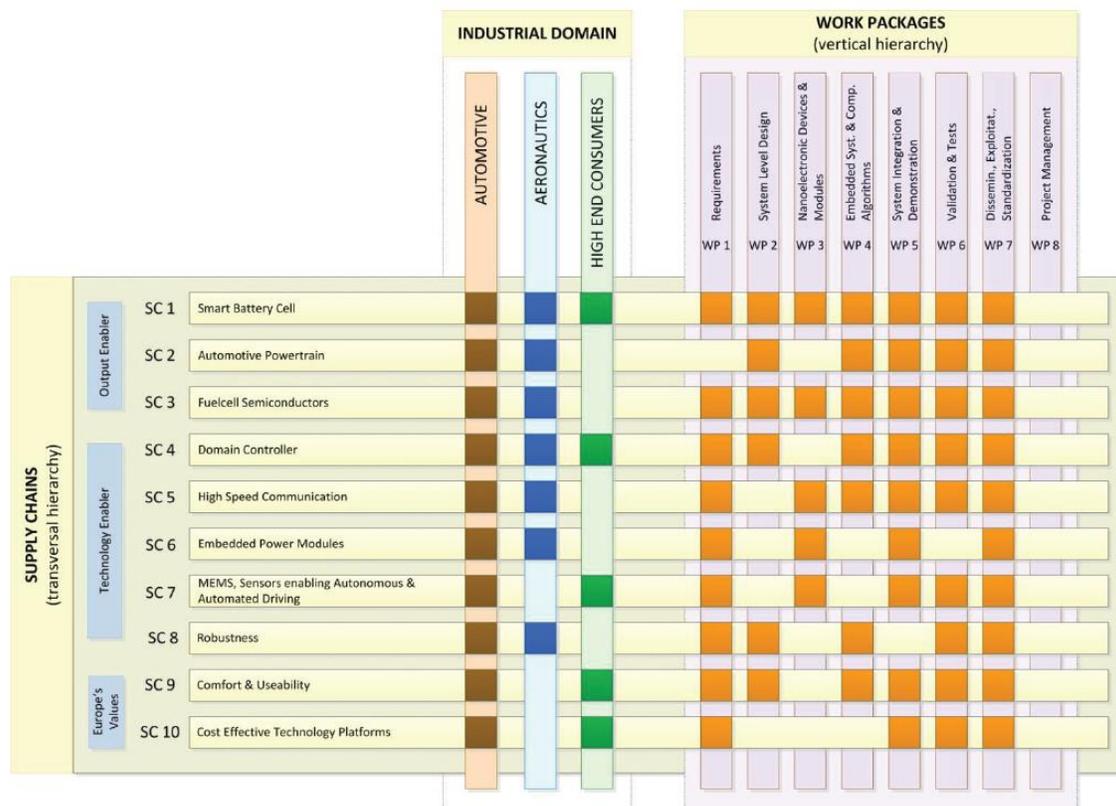
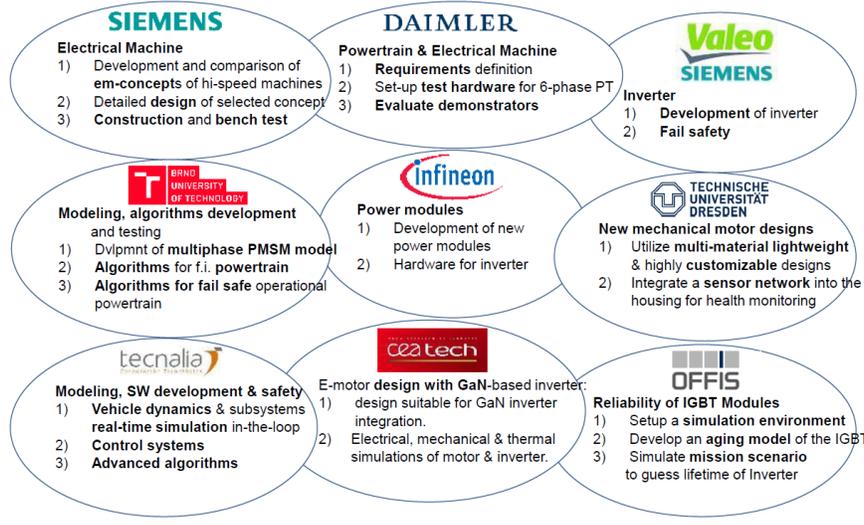


Abbildung 3: Projektstruktur mit Supply Chains

Die Daimler AG war dabei im Wesentlichen in den Supply Chains 2 (Automotive Powertrain) und 3 (Fuel Cell Semiconductors) aktiv. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die in diesen Supply Chains teilnehmenden Projektpartner sowie deren Arbeitsinhalte:

SC 2: Who are we?

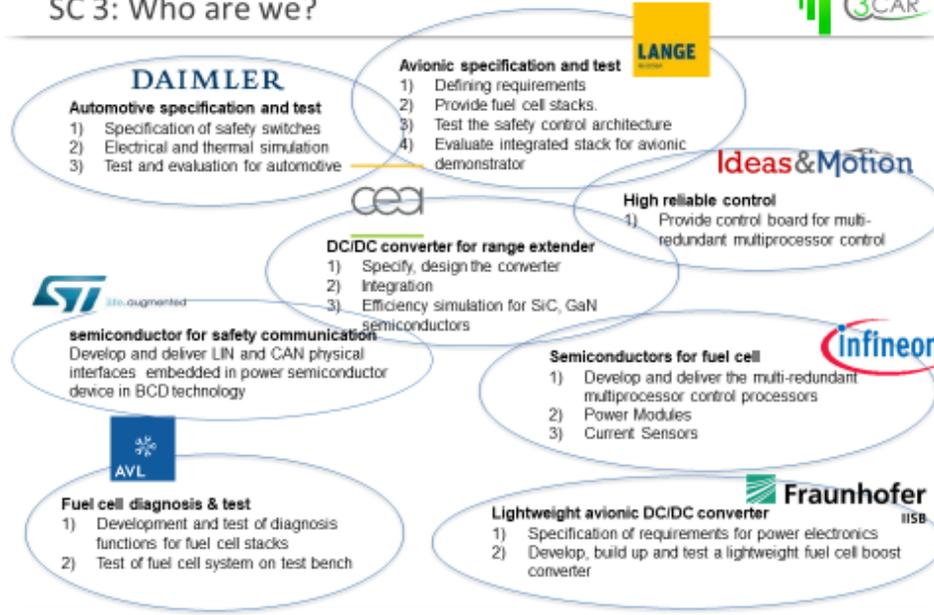


3Ccar

4

Abbildung 4: Supply Chain 2 - Partner und Inhalte

SC 3: Who are we?



5/3/2019

3Ccar

16

Abbildung 5: Supply Chain 3 - Partner und Inhalte

Eine vollständige Übersicht der zu Projektbeginn beteiligten Projektpartner ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Liste der Projektpartner in 3CCar

Vollständiger Name des Partners	Kürzel	Länderkürzel
Infineon Technologies AG	IFAG	GE
AVL List GMBH	AVL	AT
AVL-SFR	AVL SFR	GE
Brno University of Technology	BUT	CZ
Daimler AG	Daimler	GE
Fraunhofer IISB Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB	Fraunhofer	GE
Hutchinson	HUTCH	FR
Infineon Technologies Austria AG	IFAT	AT
Infineon Technologies Romania	IFRO	RO
ON Semiconductor Belgium BVBA	OnSemi-BE	BE
QinetiQ Ltd.	Qinetiq	UK
BMW	BMW	GE
Siemens AG	Siemens	GE
TU Dresden	TUD	GE
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden	OTH	GE
Valeo S.A.	Valeo	FR
Institut mikroelektronických aplikací s.r.o.	IMA	CZ
Institutul National de Cercetare-devoltare Pentru Microtehnologie	IMT	RO
STMicroelectronics N.V.	STMicro	FR
Tenneco Automotive Europe BVBA	Tenneco	BE
NXP Semiconductors	NXP-NL	NL
NXP Semiconductors Germany GmbH	NXP-DE	GE
Technische Universitat Eindhoven	TUE	NL
TTTech Computertechnik AG	TTTech	AT
Institute of Electronics and Computer Science	EDI	LV
Teknologian tutkimuskeskus VTT	VTT	FI
Murata Electronics Oy	muRata	FI
Okmetic silicon solutions	Okmetic	FI
OFFIS e.V.	OFFIS	GE
CoSynth GmbH & Co. KG	CoSynth	GE

Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH	VIF	AT
TNO	TNO	NL
Thales	Thales	FR
Tecnalia	Tecnalia	ES
FICOSA (Administrative Team)	AAA	ES
FICOSA TRIAD	TRIAD	ES
IXION	IXION	ES
Tyndall National Institute	TNI	IR
Torino e-district	TOED	IT
Vilnius Gediminas Technical University	VGTU	LT
Metis Baltic	MB	LT
Solbian Energie Alternative Srl	Solbian	IT
Consiglio Nazionale delle Ricerche	CNR	IT
Technical University Graz	TUG	AT
IFEVS	IFEVS	IT
University of Pisa	UPI	IT
CEA LETI	CEA	FR
ITRI	ITRI	TW
ON Design Czech s.r.o	ONSemi-CZ	CZ

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1. WP1: Requirements

Das WP1 wurde von Daimler geleitet. WP1 wurde mit einem Kick-off Workshop am 9.-10. Juni 2015 in München gestartet. In 9 Tasks wurden die Anforderungen an Systeme, Komponenten und Demonstratoren in 3Ccar spezifiziert.

In 9 Tasks wurden die Anforderungen an Systeme, Komponenten und Demonstratoren in 3Ccar spezifiziert.

Tabelle 3: Übersicht über die Deliverables in WP1

D1.1	Specification of the battery system and its components (T1.1)	AVL SFR	Thomas Wolf Thomas.wolf@avl.com					M3 01.09.2015
D1.2	Specification of the battery cell and the cell-integrated components (T1.1)	Fraunhofer IISB	Vincent Lorentz vincent.lorentz@iisb.fraunhofer.de					M6 31.01.2016
D1.3	Requirements for integrated powertrain and power modules (T1.2)	Siemens	Dirk Diehl Dirk.Diehl@siemens.com					M9 01.07.2016
D1.4	Requirements for the high-efficiency fuel cell system (T1.3)	Daimler AG	Wolfgang Wondrak wolfgang.wondrak@daimler.com					M12 17.10.2016
D1.5	Domain controller: Benchmark analysis and multi-domain applications criteria (T1.4)	IXION	Jorge Villagra jvillagra@ixion.es				Sub mit d	M9 01.09.2016
D1.6	Domain controller: SoA, evolution and future outlook of micro-controller/processor, FPGA and SoC platforms (T1.4)	TECNALIA	Martin Dendaluce martin.dendaluce@tecnalia.com					M6 01.06.2016
D1.7	Requirements for Communications (T1.5)	TTTECH	Andreas Eckel andreas.eckel@tttech.com					M12 17.10.2016
D1.8	Description of concept and compliance report on target specification (T1.5)	NXP	Jaap Veerhoek Jaap.veerhoek@nxp.com				Sub mit d	M12 01.11.2016
D1.9	Semiconductor technology requirements and implementation strategy (T1.6)	Murata	Altti Torkkeli altti.torkkeli@murata.com					M6 15.02.2016
D1.10	On Board Charger: Requirement analysis (T1.7)	FICO TRIAD	Raúl Durán & Marc Deumal raul.duran@dneo.es					M6 01.04.2016
D1.11	Requirements and specifications for smart actuator (T1.8)	TENNECO	Miguel Dhaens MDhaens@Tenneco.com					M9 01.03.2016
D1.12	Requirements for system Integration (T1.9)	Siemens	Kai Kriegel kai.kriegel@siemens.com					M12 17.10.2016

Die meisten Arbeiten konnten planmäßig im ersten Projektjahr abgeschlossen werden, der Meilenstein MS1 wurde mit der Verfügbarkeit des Deliverables D1.8 erreicht, so dass das WP am Ende des 18. Projektmonats erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Ziele in WP1

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollten die Anforderungen an die im Projekt zu entwickelnden Technologien, Komponenten und Systemen definiert werden. Dies sollte auf Basis des aktuellen Stands der Technik und der aktuellen Normen geschehen, die auf die zu erwarteten Leistungssteigerungen, Baugröße, und Umgebungsanforderungen in der Zukunft erweitert werden sollten.

Der Beitrag der Daimler AG zum Arbeitspaket 1 betraf die Spezifikation der Halbleiterbauelemente und Inverter sowie der HV-Schaltelemente für künftige Bordnetze. Dabei wurde auf die Synergie zwischen Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenantrieben besonderer Wert gelegt. Die entsprechenden Ergebnisse der Daimler AG sind in den

Deliverables 1.3, 1.4 und 1.12 dokumentiert. Im Laufe der Arbeiten stellte sich heraus, dass die anspruchsvollen Anforderungen an den spezifizierten elektrischen Hinterachsantrieb erheblichen Abstimmungsaufwand und mehrere Iterationen erforderten.

Ergebnisse in WP1

A) Elektrischer Antrieb:

A1) Spezifikation der Leistungsdaten:

Für zukünftige Antriebsstränge im Kraftfahrzeugbereich ist mit einer weiteren Integration und steigender Leistungsdichte zu rechnen. Deswegen wurde als Entwicklungsziel beschlossen, eine Leistung von 500 kW bei einer Batteriespannung von ca. 800 V zu realisieren. Diese Werte sind für künftige elektrische Fahrzeuge im Vergleich zur internationalen Konkurrenz im Sinne Wettbewerbsfähigkeit als realistische Zielsetzung absehbar.

Im Unterschied zum Projektproposal stellte sich heraus, dass ein Radnabenantrieb für die spätere wirtschaftliche Umsetzung weniger aussichtsreich ist als ein radnaher Antrieb. Deswegen legten die Projektpartner in SC2 einen hochzuverlässigen Multiphasen-Elektromotor fest, der zusätzliche Vorteile wie verbesserte Rekuperation und skalierbares Design ermöglicht. Das Integrationskonzept soll das Kühlsystem und die Montage vereinfachen.

Die Leistungsdaten wurden an einem Sportwagen orientiert, so dass hohe Leistungsdichte und eine herausfordernde kompakte Bauweise spezifiziert wurden. Mit diesen Leistungsdaten wird eine solide Basis für künftige batteriebetriebene Fahrzeuge auch im SUV-Segment und in der Oberklasse gelegt. Die angenommenen Fahrzeugdaten sind wie folgt:

Tabelle 4: Fahrzeugdaten für die Auslegung des Antriebs

Vehicle Mass:,	1,950 – 2,250 kg
Maximum Speed:	250 km/h
Peak Motor Power:	250 kW for ≥ 20 s
Continuous Motor Power:	100 kW
Peak System Power:	475 kW for ≥ 20 s
Continuous System Power:	190 kW
Peak Torque at Axle:	6105 Nm
Continuous Torque at Axle:	2442 Nm
Tire Diameter:	703 mm
Tire circumference:	2,208.54 mm
Der Getriebewirkungsgrad wurde zu 95% angenommen	

A2) Spezifikation der Bauraumanforderungen:

Der spezifizierte Bauraum (Abb. 1a) orientiert sich an einem Premium-Sportwagen, der als anspruchsvollste Anwendung für einen E-Antrieb gesehen wird. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Antrieb aus zwei kompletten Teilsystemen bestehend aus Motor,

Getriebe, Inverter und elektrischen Anschlüssen besteht. Aus mehreren Konzeptvarianten wurde dabei das in Abbildung 3b dargestellte Konzept IIIv3 weiterverfolgt.

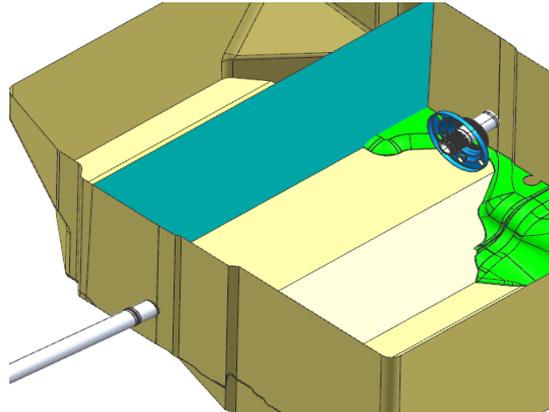
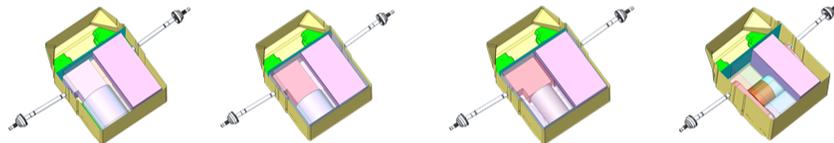


Abbildung 6a: 3D Ansicht des avisierten Bauraums

	Concept III-v1 2 x Torque motors in driving direction	Concept III-v2 2 x Torque motors in driving direction	Concept III v3 2 x High speed motors in driving direction	Concept IV 2 x High speed motors staged in axial direction
--	--	--	--	---



Volume Usage	80%	78%	78%	72%
Volume Motor [l]	17,75	14,31	10,05	13,82
Volume Stator [l]	11,15	7,6	5,85	9,04
Power/Volume Stator [kW/l]	22,43 / 8,97	32,89 / 13,16	42,74 / 17,09	27,65/11,06
Volume Inverter [l]	15,53	16,05	22,05	20,76
Power/Volume Inverter [kW/l]	16,10 / 6,44	15,58 / 6,23	11,34 / 4,54	12,04/4,82
Volume Gearing [l]	10,59	12,7	11,06	9,99
Total Volume	87,74	86,13	86,33	79,16

Abbildung 7b: Darstellung verschiedener Varianten des ausgewählten Konzepts III

B) HV Sicherheitselemente auf Halbleiterbasis:

B1) HV-Trennschalter:

In Hochvolt-Bordnetzen werden elektrische Unterbrecher benötigt, die alle Energiequellen (wie z.B. Brennstoffzellen und HV Batterien) auch unter Last abschalten können. In SC3 wurde eine Trennschaltung auf Halbleiterbasis entworfen und spezifiziert, die es erlaubt, die Anforderungen an die eingesetzten konventionellen Relais deutlich zu reduzieren. Obwohl die aus Sicherheitsgründen erforderliche galvanische Trennung nicht komplett entfallen kann, ermöglicht das neue Konzept ein Schalten im stromlosen Zustand,

wodurch die Relais keinen Lichtbögen beim Schalten mehr ausgesetzt werden. Dadurch werden Lebensdauer und Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Größen- und Kostenreduktion erhöht. Dadurch werden folgende Vorteile erreicht:

- Vermeidung elektrischer Lichtbögen
- Einsatz kleiner, kostengünstiger Relais
- Diagnosefähigkeit
- Geringere Wartungskosten

Zusätzlich erlaubt dieses neue Konzept, die Hauptsicherungen zu integrieren und eine zusätzliche Reservesicherung vorzusehen, die die Weiterfahrt eines Fahrzeugs bei Sicherungsausfall ermöglicht. Die Schaltung ist in Abb. 3 vereinfacht dargestellt.

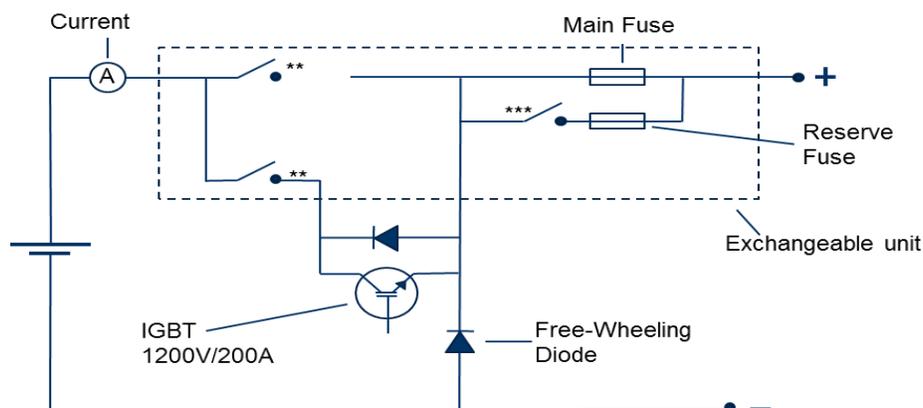


Abbildung 8: Schematische Darstellung des neuen Trennschalterkonzepts

B2) Entladeeinheit:

Ein Trennschalter kann zwar die Energiequelle vom HV-Bordnetz abtrennen, im Schadensfall kann es aber erforderlich sein, die Energiequelle zu entladen, um ein Gefährdungsrisiko zu eliminieren. Der Abbau der gespeicherten Energie im Falle eines Unfalls gehört zu einer Grundanforderung an Brennstoffzellensysteme.

Messungen des Entladevorgangs an realen Brennstoffzellensystemen ergeben Spitzenströme im Bereich 3-4 kA, die nach ca. 200 ms auf Werte um 300 A abfallen. Der Gesamtenergieinhalt des ausgewählten Referenzsystems wurde mit 40 kJ angesetzt, damit deckt es sowohl Automobil- als auch Luftfahrtanwendungen ab.

Tabelle 5: Grobspezifikation der elektrischen Anforderungen an eine Entladeeinheit

Value	Symbol	Unit	Min.	Typ.	Max.	Comment
<u>surge current</u>	I_{sc}	A			5000 <u>tbc</u>	
<u>short term current</u>	I_{st}	A			<u>Tbd</u>	
<u>Continuous current</u>	I_D	A			500 <u>tbc</u>	Max. operating current of the fuel cell system
Load integral	I^2t	kA ² s		100		
Trigger voltage (threshold) (HV1-HV2)	U_{th}	V		20	< 60	
Voltage between HV1 – HV2 = stack idle voltage	U_{max}	V			540	540V for aviation tbc, for automotive 500V would be sufficient
<u>Withstand voltage HV-LV</u>	U_{ES}	V	2500			
<u>ambient temperature</u>	T_{amb}	°C	-40		95	85°C optional, up top 180°C for aviation
<u>bus bar temperature</u>	T_{bb}	°C	-40		95	85°C optional, up top 180°C for aviation

2.1.2. WP2: System Level Design

Ziele in WP2

Die Arbeitsschwerpunkte der Daimler AG in diesem Arbeitspaket konzentrierten sich auf die Detaillierung der Anforderungen an die Komponenten (Multiphasen-Maschine, halbleiterbasierte Schaltelemente, Trennschalter, Entladeschaltung), die sich aus Systemsicht, d.h. unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorgaben (z.B. ISO 26262) und der Reaktion im Fehlerfall ergeben, sowie den Entwurf von Lösungen, die in den Demonstratoren umgesetzt werden sollten. Es wurden elektrische und thermische Abschätzungen für die Auslegung der Entladeeinheit vorgenommen und Untersuchungen zum Ausfallverhalten der Multiphasen-Maschine durchgeführt. Die elektrischen und thermischen Simulationen für die Halbleiteraufbauten sowie die experimentellen Untersuchungen zu verschiedenen Aufbautechniken sind Deliverable D2.7 zu entnehmen.

Ergebnisse in WP2

A) Elektrische Simulation von Brennstoffzellen-Entladevorgängen in SC3:

In Abbildung 6 ist das verwendete Ersatzschaltbild für das in WP1 gewählte Referenzsystem dargestellt, das zur Festlegung der worst-case Bedingungen herangezogen wurde, die dann in den Entwurf für den experimentellen Aufbau für die Modultests einbezogen wurden. Die Stromverläufe für verschiedene Ladespannungen zeigt Abbildung 7, die zugehörigen Maximalströme, Gesamtenergien und „Stromintegrale“ sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass mit der Ersatzschaltung die realen Belastungen des Entladeschalters nachgebildet werden können. Entsprechend der Festlegung in WP1 wurden 4,5kA mit einem Wert für I^2t von 90kA²s als Grenzwerte gefordert.

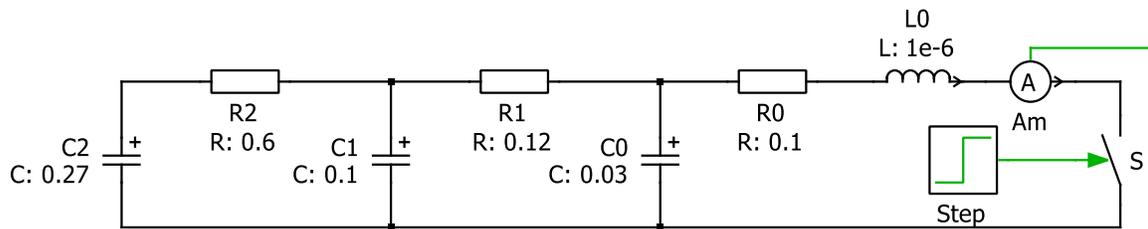


Abbildung 9: Ersatzschaltbild für einen Brennstoffzellenstack zur Ermittlung der worst-case Anforderungen

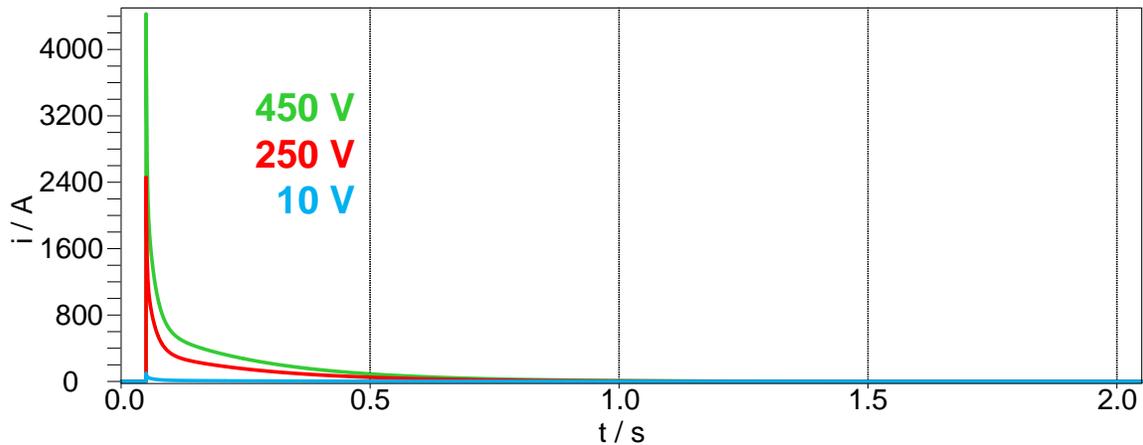


Abbildung 10: Simulierte Entladestromverläufe für Kurzschlussentladungen des Stacks

Tabelle 6: Simulierte Strom- und Leistungswerte für Kurzschlussentladungen des Stacks

Initial voltage	Stored energy capacitor	Maximum current peak	I^2t
10 V	0,02 kJ	0,09 kA	0,06 kA ² s
250 V	12,5 kJ	2,5 kA	38,6 kA ² s
450 V	40,5 kJ	4,4 kA	125,2 kA ² s

B) Thermische Abschätzungen für die Auswahl von Halbleitern für Entladeeinheiten

Die kritische Grenze für die Zerstörung eines Si Bauelements kann aus der Wärmekapazität und der kritischen Temperatur abgeschätzt werden. Die maßgeblichen Materialeigenschaften von Silizium sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 7: Materialeigenschaften von Silizium

Volumetric mass density $\rho / \text{kg m}^{-3}$	Specific heat capacity $c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Melting temperature $T_{\text{melt}} / ^\circ\text{C}$	Boiling temperature $T_{\text{boil}} / ^\circ\text{C}$
2329	705	1414	3265

Die Energie, die benötigt wird, einen Si Chip mit $d = 200 \mu\text{m}$ and $A = 1 \text{ cm}^2$ auf die kritische Temperatur von 400°C aufzuheizen, kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$E = m \cdot c \cdot (T_{\text{crit}} - T_{\text{amb}}) = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot 705 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot (400^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 12,5 \text{ J}$$

Damit liegt die Zerstörungsenergie für typische Chipgrößen im Bereich von 10J. Dieser Bereich wird mit den vorgesehenen Brennstoffzellensystemen erreicht, so dass davon ausgegangen werden muss, dass es zur Zerstörung der Schalter kommen kann.

C) Experimentelle Untersuchungen an Halbleitermodulen

Für experimentelle Untersuchungen zum Ausfallverhalten von Leistungsmodulen wurde ein Prüfstand an der Universität Bayreuth aufgebaut, bei dem eine Kondensatorbank gezielt entladen werden kann. Mit diesem Aufbau konnten die geforderten Werte für den Spitzenstrom (4,5kA) und das Stromintegral I^2t (90kA²s) sogar übertroffen werden. An diesem Prüfstand wurden die in Tabelle 6 aufgeführten Halbleitermodule mit unterschiedlichen Gehäusetypen geprüft.

Es ergab sich, dass drahtgebundene Module nicht für die Kurzschlussentladung geeignet sind, da sie nicht in einen definierten niederohmigen Zustand übergehen. Bei hohen Energien ist eine Explosion der Module möglich.

Die Sandwich-Module von Mitsubishi und Infineon stellten sich als geeignete Kandidaten heraus, die zwar zerstört wurden, aber in einem stabilen Kurzschluss endeten. Trotzdem bleibt die Isolationsfestigkeit der Gehäuse erhalten. Somit kann eine sichere Entladung der Brennstoffzelle gewährleistet werden. Bei kleinen Ladungsmengen (Werkstattmode) ist auch ein reversibler Betrieb möglich.

Die untersuchten Thyristoren hielten weit höheren Energien stand und zeigten nach Ausfall auch einen stabilen Kurzschluss. Sie sind daher auch mögliche Kandidaten für die beabsichtigte Anwendung.

Tabelle 8: Übersicht über die untersuchten Halbleitermodule

Package	Manufacturer	Product	Status	Semi-conductor	voltage	current	I_{eff} (10 m
sandwich-structure	Mitsubishi	Transfer Molded Power Module CT300DJH060	sample	IGBT	$V_{\text{CES}} = 650 \text{ V}$	$I_{\text{C}} = 300 \text{ A}^*$	n.a.
sandwich-structure	Infineon	HybridPACK™ COOL S FF400R07A01E3 S6	sample	IGBT	$V_{\text{CES}} = 700 \text{ V}$	$I_{\text{C}} = 400 \text{ A}$	n.a.
wire-bonded module	Infineon	FF300R07ME4 B11	series	IGBT	$V_{\text{CES}} = 650 \text{ V}$	$I_{\text{C}} = 390 \text{ A}^*$	Diode 8,8 kA ²
stud screw	Semikron	SKT 100/08 D	series	thyristor	$V_{\text{RSM}} = 900 \text{ V}$	$I_{\text{TAV}} = 100 \text{ A}^{**}$	20 kA ²
stud screw	Semikron	SKT 250/08 D	series	thyristor	$V_{\text{RSM}} = 900 \text{ V}$	$I_{\text{TAV}} = 250 \text{ A}^{**}$	245 kA
press-pack	Semikron	SKT 493/08 E	series	thyristor	$V_{\text{RSM}} = 900 \text{ V}$	$I_{\text{TAV}} = 490 \text{ A}^{***}$	320 kA

* $T_{\text{C}} = 25 \text{ °C}$ ** $T_{\text{C}} = 85 \text{ °C}$ *** $T_{\text{C}} = 125 \text{ °C}$

D) Systemanforderungen an die E-Maschine und den elektrischen Antriebsstrang

Ein weiterer Beitrag von Daimler im Arbeitspaket 2 betraf die Definition von Systemanforderungen an die E-Maschine und den elektrischen Antriebsstrang im Ganzen, darunter insbesondere die Anforderungen an die funktionale Sicherheit und dazugehörige Use Cases sowie den „fail-safe“-Betrieb.

Zu diesem Thema wurden mit den Partnern entsprechende Workshops durchgeführt, die zu einer Einstufung des Antriebsstrangs in „ASIL D“ führten. Wesentlicher Aspekt dabei ist die Vermeidung eines ungewollten Drehmoments an den angetriebenen Rädern, da dieses das Fahrzeug destabilisieren und dadurch unbeherrschbare Fahrsituationen verursachen kann. Tritt ein einzelner Fehler in einem dreiphasigen System auf, wird das System in einen sicheren Zustand überführt, in dem das System keinerlei Drehmoment mehr stellen kann.

In sechsphasigen System (siehe Abb. 5) ergeben sich diesbezüglich neue Möglichkeiten bezüglich von Ausfällen im Traktionsinverter, so lassen sich zum Beispiel Ausfälle/Fehler eines Stromsensors oder sonstige Fehler eines (dreiphasigen) Subsystems kompensieren.

Während des Berichtszeitraums wurden die entsprechenden Reaktionen auf verschiedene Fehlerereignisse erarbeitet, die in Tabelle 7 gelistet sind.

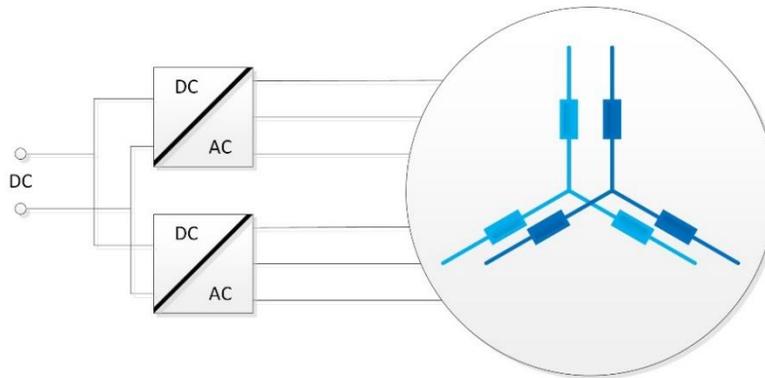


Abbildung 11: Darstellung eines 6-phasigen Systems, gesteuert durch zwei 3-phasige Subsysteme

Tabelle 9: Fehlerereignisse des Inverters und Reaktionsstrategie

Operation Condition	Inverter Failure Mode		
	No control	Control working	
	No communication	Inverter switch Open failure in set 1	Inverter switch short failure in set 1
High speed	Active Short Circuit (6ph)	Set 1: open Set2 normal (control of back-EMF) EMF < UBatt	Set1 open Set 2 normal (to be tested)
Low speed	Active Short Circuit (6ph)	Same as above	Same as above

Weitere offene Fragen, die dann in den Arbeitspaketen 4 und 6 weiterbehandelt werden, wurden identifiziert:

- Wie kann das Drehmoment im abgeschalteten Teil der Maschine gemessen werden?
- Besteht eine Möglichkeit, das tatsächliche Fehlerereignis zu erkennen um korrekt darauf zu reagieren?

E) Konzeptstudie bezüglich eines integrierten Getriebes

Da die Darstellung eines realistischen Antriebssystems im Bauraum ohne Getriebe nicht möglich ist, wurde im Projekt beschlossen, auch die Auslegung eines geeigneten Getriebes zu untersuchen, das die geforderten Leistungsdaten erfüllen kann. Aus diesem Grund wurde eine Konzeptstudie bezüglich eines integrierten Getriebes für eine realitätsnahe Umsetzung des elektrischen Antriebstrangs durchgeführt. Die für die Auslegung herangezogenen Fahrzeuggeckdaten sind Tabelle 9 zu entnehmen, die Daten für die elektrische Maschine zeigt Tabelle 9. Die Drehmoment- und Leistungsdaten sind in Abb. 6 graphisch dargestellt.

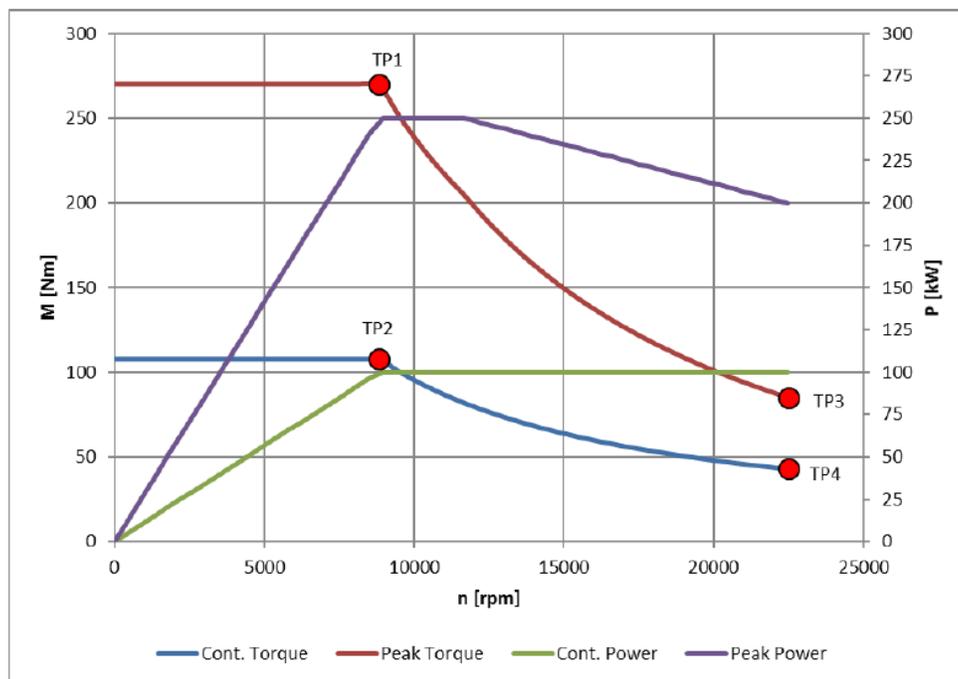
Tabelle 10: Fahrzeugprämissen

Summendrehmoment	5000-6000 Nm
Fahrzeugendgeschwindigkeit	250 km/h
Fahrzeugmasse	2300kg
Dynamischer Radhalbmesser	0,3515
Frontfläche	2,289m ²
cw-Wert	0,313

Die von den Projektpartnern bereitgestellten Maschinendaten sind in Tabelle 10 aufgelistet:

Tabelle 11: Maschinendaten

P_dauer	100,00	kW	TP1	270	Nm	M_TP4	43	Nm
P_peak	250,00	kW	TP2	108	Nm	M_TP3	85	Nm
V_max	250	km/h	n_TP1	8842	rpm	n_TP4	22500	rpm
D_Rad	0,703	m	n_TP2	8842	rpm	n_TP3	22500	rpm
eta_Getriebe	0,95		n_AP3	8630	rpm	M_AP3	21	Nm

**Abbildung 12: Motorcharakteristik**

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurde zunächst eine grobe Auslegung der Getriebestufen sowie der Fahrdynamik durchgeführt, sowie im Anschluss eine Auslegung der Zahnräder in einem geeigneten Berechnungstool wie auch die Berechnung der Lager und Wellen. Die Ergebnisse wurden dann in ein geometrisches Getriebemodell überführt und darauf aufbauend schließlich ein Gehäusekonzept erarbeitet. Die für verschiedene Auslegungen erhaltenen Charakteristika sind in Abb. 7 dargestellt.

Im Rahmen der Entwicklung wurde deutlich, dass der Lösungsraum für die Getriebeübersetzung im Bereich von $i = 9,8 \dots 11,7$ liegt.

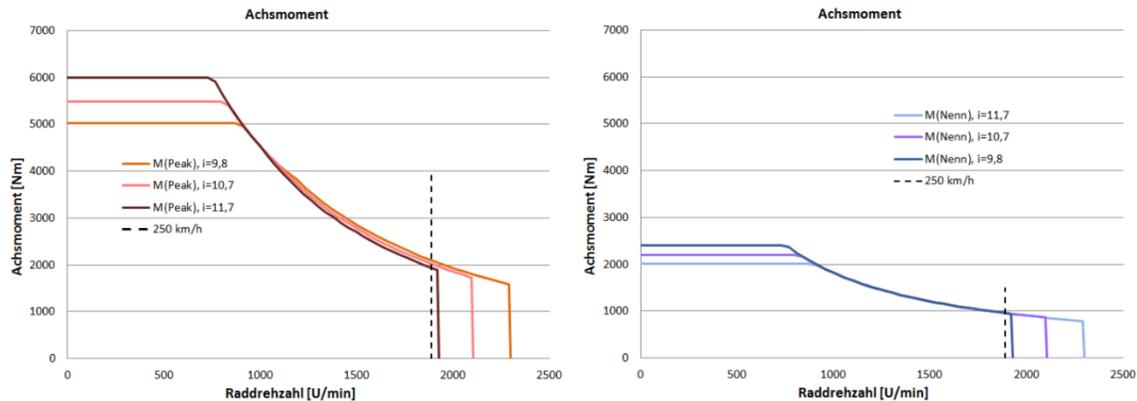


Abbildung 13: Getriebecharakteristik

Ausgehend von diesen Untersuchungen wurden zwei Getriebevarianten konzipiert:

- Variante 1: zweistufiges Kombinationsgetriebe mit 1. Stufe: Kegelradstufe und 2. Stufe: Planetenradsatz
- Variante 2: zweistufiges Kombinationsgetriebe mit 1. Stufe: Planetenradsatz und 2. Stufe: Kegelradstufe

Für keine der beiden Varianten ließ sich dabei eine Lösung finden, die in der vorgegebenen Bauraumhülle integrierbar gewesen wäre. Darüber hinaus ergaben sich je nach Wahl des Übersetzungsverhältnisses und Getriebevariante weitere Schwierigkeiten. Unter Abwägung sämtlicher Aspekte wurde schließlich eine Übersetzung von $i=10,7$ als Kompromiss aus technischem Entwicklungsrisiko einerseits und Erfüllung der Fahrzeugvorgaben andererseits für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Die abschließende Bewertung ergab, dass für Variante 1 aufgrund der Ausführung der ersten Übersetzungsstufe als Kegelradstufe bei den angestrebten hohen Maschinendrehzahlen ein hohes Umsetzungsrisiko besteht, da für die hohen Umlaufgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Querkräften keine Lager verfügbar sind. Als einzig verbleibende umsetzbare Getriebevariante bleibt daher Variante 2, da dessen Eingangsstufe als Planetenradsatz ausgeführt ist, entfallen bei gleichbleibend hoher Eingangsdrehzahl die Querkräfte, so dass hier eher geeignete Lager verfügbar sein dürften. Allerdings stellt diese Variante auch diejenige dar, die die größten Bauraumverletzungen mit sich bringt und die die Integration der weiteren Antriebskomponenten im gegebenen Bauraum unmöglich macht:

Das Konzept eines Getriebes mit Kegelradstufe musste insofern als nicht umsetzbar verworfen werden. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden daher die Anordnung der Komponenten sowie der verbleibende Bauraum für das Getriebe neu bewertet.

Die erforderliche Neubewertung des Getriebes wurde überdies zum Anlass genommen, die Bauraumvorgabe zu hinterfragen und an aktuelle Entwicklung anzugleichen. Es wurde eine aktualisierte, realitätsnähere Bauraumhülle erzeugt, die als Grundlage für die Weiterentwicklung des Getriebekonzepts verwendet wurde (s. Abbildung 11).



Abbildung 14: Aktualisierte Bauraumhülle

Unter Weiterverwendung der bereits vorgegebenen Komponenten E-Maschine und Inverter wurden unter Berücksichtigung der neuen Gegebenheiten wiederum mehrere Lösungsvorschläge erstellt (s. Abbildung 12)

	V1.1	V1.2	V1.3.1	V1.3.2	V1.4	V2	V3
	Achsparell Getriebe mit konz. EM Anordnung	Achsparell Getriebe mit Achspareller EM Anordnung	Konz. Getriebe mit EM				
Bauraum	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Lagerung EGW	-	-	0	0	0	+	+
Robustheit	0	0	0	0	0	+	+
Effizienz	0	0	0	0	-/0	0/+	+
Bewertung	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD

Abbildung 15: Lösungsansätze Getriebe

Aus diesen Ansätzen wurde Variante 2 als zielführende Variante ausgewählt und weiterverfolgt. Weitere Untersuchungen betrafen ggf. erforderliche Anpassungen an der E-Maschine, um eine nahtlose Integration und einen späteren Prüfstandsbetrieb mit dem fertigen Getriebeprototyp zu ermöglichen. Es stellte sich heraus, dass sowohl die Rotorwelle angepasst werden muss (Abbildung 13), um eine ausreichend dimensionierte

Steckverzahnung aufnehmen zu können, sowie das A-Lagerschild der E-Maschine (Abbildung 14), um unter Berücksichtigung der begrenzten Platzverhältnisse eine öldichte Kapselung des Getriebes zu erreichen. In diesem Konzept stellt das Lagerschild gleichzeitig den Gehäuseaußenteil des Getriebes dar.

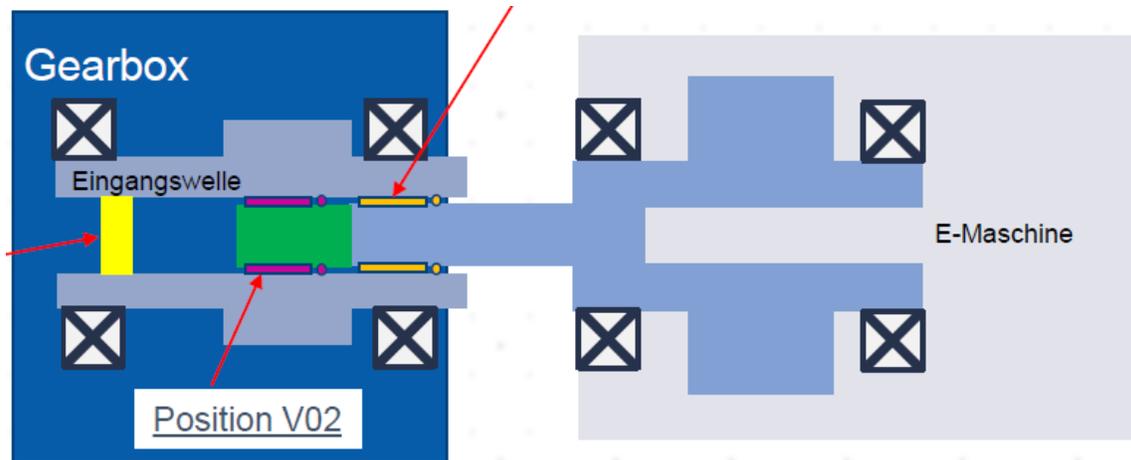


Abbildung 16: Anpassung an der Rotorwelle

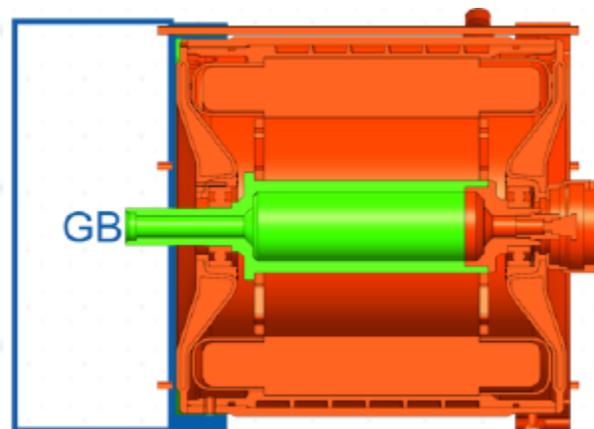


Abbildung 17: Anpassung am Motorlagerschild

Ausgehend von diesen Untersuchungen wurde die Entwicklung des Getriebeprototypen weiter vorangetrieben. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

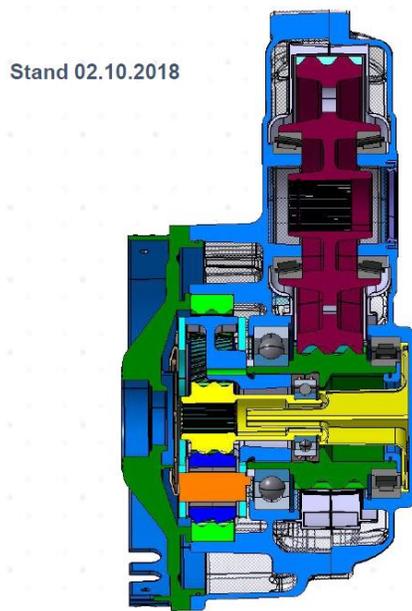


Abbildung 18: Finales Getriebedesign

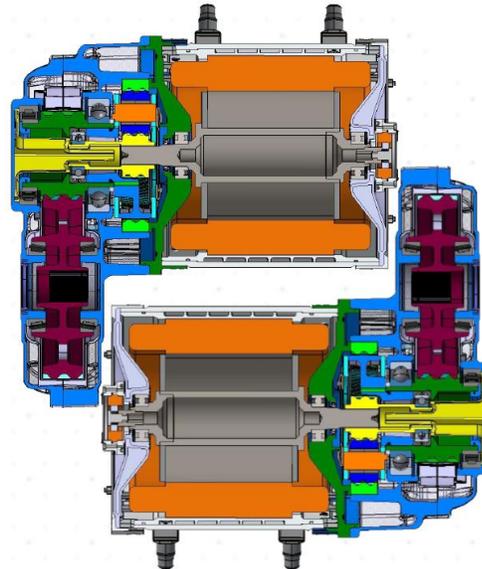


Abbildung 19: Darstellung des Triebstrangs mit zwei E-Maschinen und Getrieben

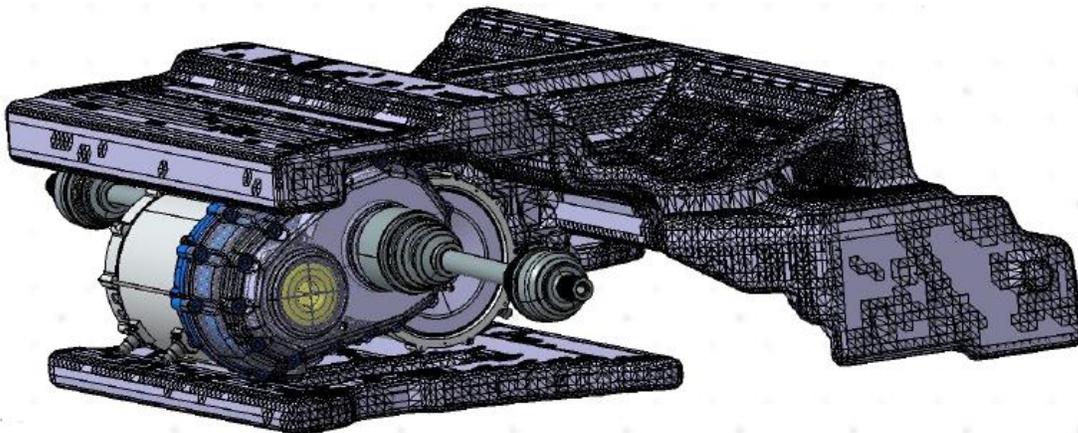


Abbildung 20: Räumliche Darstellung des Triebstrangs im Bauraum

Die Arbeiten werden von der Daimler AG in Eigeninitiative nach Projektende weitergeführt, um einen funktionalen Prototypen aufzubauen.

2.1.3. WP4: Embedded Systems and Computing Algorithms

Ziele in WP4

Der Schwerpunkt in WP4 beinhaltet die Entwicklung von Regelungsverfahren für mehrphasige Elektromotoren zusammen mit der Universität Brno sowie eine Auslegung für das Fail-Safe Verhalten von 6-phasigen elektrischen Maschinen. Weiterhin ist die Integration von Inverter und Elektromotor auf dem Prüfstand vorgesehen, um die Regelung zu entwickeln.

Ergebnisse in WP4

WP4 wurde im 5. Quartal des Projektes gestartet. Zunächst wurde untersucht, wie eine wirkungsgradoptimierte Betriebsstrategie für eine 6-phasige PSM Maschine aussehen könnte.

Neben der fehlertoleranten Funktion ist der Wirkungsgrad ein entscheidendes Bewertungskriterium für den Antrieb mit einer Multiphasen-Maschine. Deshalb wurden die auftretenden Verluste genauer analysiert.

Die vorgesehene Konfiguration besteht aus zwei dreiphasigen Invertern und zwei getrennten Windungssystemen der Maschine. Ausgehend vom verbreiteten „Maximum Torque per Ampere“ (MTPA) Verfahren zur Optimierung der Sollstromwerte, wurde eine „Maximum Torque per Overall Losses“ (MTOL) Strategie entwickelt, mit dem Ziel, die Ströme $\{i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}\}$ innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte zu optimieren. Dabei wurden alle auftretenden Verluste nach ihren Stromabhängigkeiten klassifiziert, wie in Tabelle 7 eingetragen, und es wurde untersucht, inwieweit sich eine ungleiche Stromverteilung in beiden Teilinvertern bis hin zur Abschaltung eines Inverters auf die Gesamtverluste auswirkt. Das Abschalten wirkt sich nur auf stromunabhängige Verlustarten aus, diese eher geringen Einsparungen werden schnell durch quadratisch ansteigende ohm'sche Verluste kompensiert. Eine gleichmäßige Ausnutzung beider Inverter stellt daher das Optimum dar, die separate Untersuchung der Abschaltung eines Inverters ist nicht weiter notwendig.

Tabelle 12: Stromabhängigkeit der verschiedenen Leistungsverluste im Elektroantrieb

Dependency to current	Loss example	Effect on system efficiency
Quadratic	Ohmic Losses	Lead to lower efficiency
Linear	Semiconductor losses due to threshold voltage	Lead to same efficiency
Independent	Control system of inverter, non-current-switching-losses	Lead to higher Efficiency

Zusammen mit der Universität Brno wurden des Weiteren die Hardware- und Softwareschnittstellen für den Testbetrieb beschlossen. Ein 6-phasiger Testinverter wurde aufgebaut und ein erster Test mit einer vorhandenen 3-phasigen Maschine erfolgreich durchgeführt. Der Inverter wurde so dimensioniert, dass er im weiteren Verlauf für den Test der von Siemens entwickelten 6-phasigen Maschine verwendet werden konnte.



Abbildung 21: 6-phasiger Testinverter

2.1.4. WP6: Validation and Tests

Ziele WP6

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die integrierten Lösungen und Teilsysteme zu testen und zu validieren, vor allem die aufzubauenden Demonstratoren (Inverter, Elektromotor, Schutzelemente) zum Nachweis der Tauglichkeit der entwickelten Komponenten. Diese sollen mit Benchmarktests verglichen werden.

Ergebnisse WP6

2.1.4.1. Untersuchungen an Stromsensoren

Für die Vermessung von Stromsensoren wurde ein Prüfaufbau errichtet, mit dem Stromsensoren mit Messbereichen über 200A charakterisiert werden können:

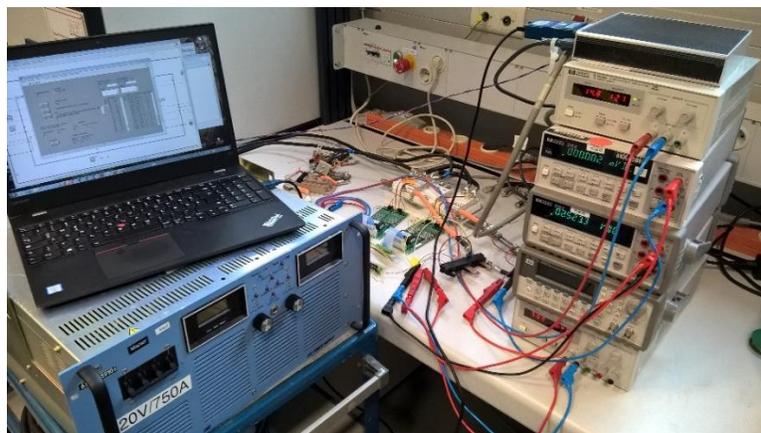


Abbildung 22: Prüfaufbau für Stromsensoren

Um eine Vergleichsbasis für spätere Untersuchungen zu schaffen, wurde ein Stromsensormodul, wie es in aktuellen Traktionsumrichtern im Automobilbereich zur Anwendung kommt, vermessen:

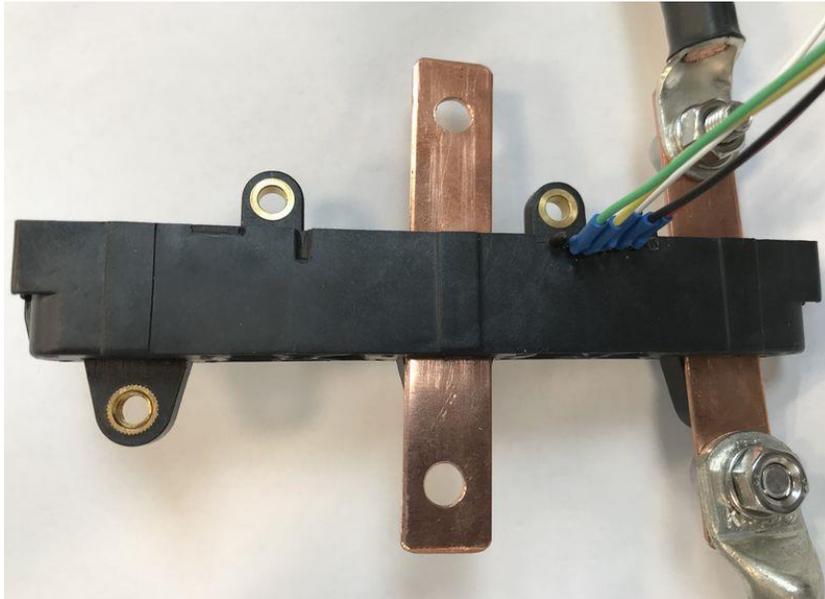


Abbildung 23: Stromsensormodul Typ HAH3DR800S07 als Referenz

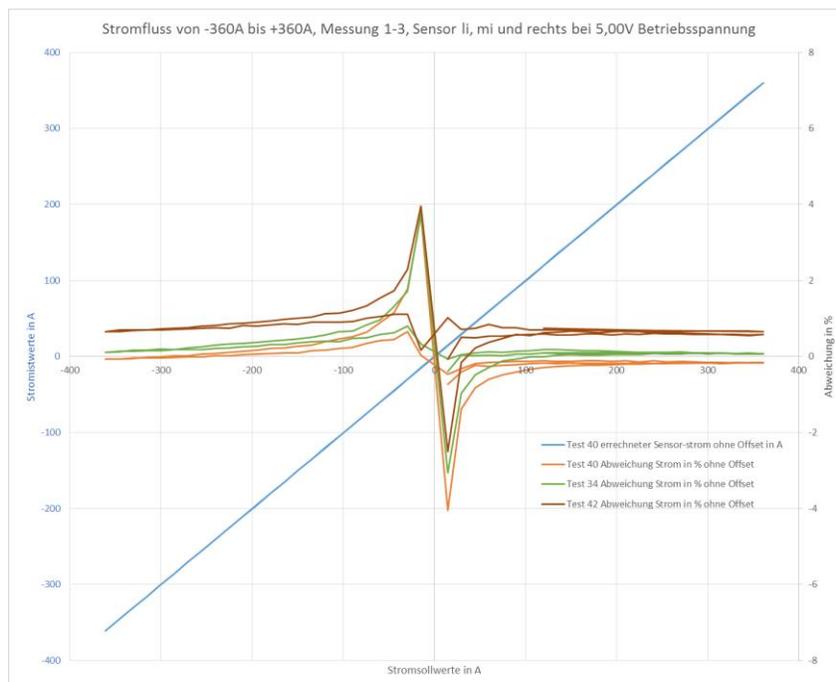


Abbildung 24: Charakterisierung Stromsensor Typ HAH3DR800S07

2.1.4.2. Aufbau eines Getriebeanschauungsmusters

Von dem in WP2 entwickelten Getriebe wurde ein maßstabsgetreues Anschauungsmodell hergestellt, das auf dem 3CCar-Abschlußtreffen am 9. Oktober in Graz zusammen mit den weiteren Entwicklungen der Supply Chain 2 vorgestellt wurde.



Abbildung 25: Präsentation des SC2-Antriebsstrangs mit Getriebemodell auf dem Abschlusstreffen in Graz am 9.10.2018

2.1.4.3. Vermessung von E-Maschine und Inverter

Testaufbau:

Für die Vermessung von E-Maschine und Inverter wurde ein Prüfstand vorbereitet, mit dem die Leistungskennndaten der Komponenten möglichst weit ausgefahren werden können. Das maximale Drehmoment beträgt 200Nm, während die höchste erreichbare Drehzahl 15000 min^{-1} beträgt. Der zulässige Betriebsbereich des Prüfstands im Vergleich zu den Maschinenparametern ist Abbildung 23 zu entnehmen:

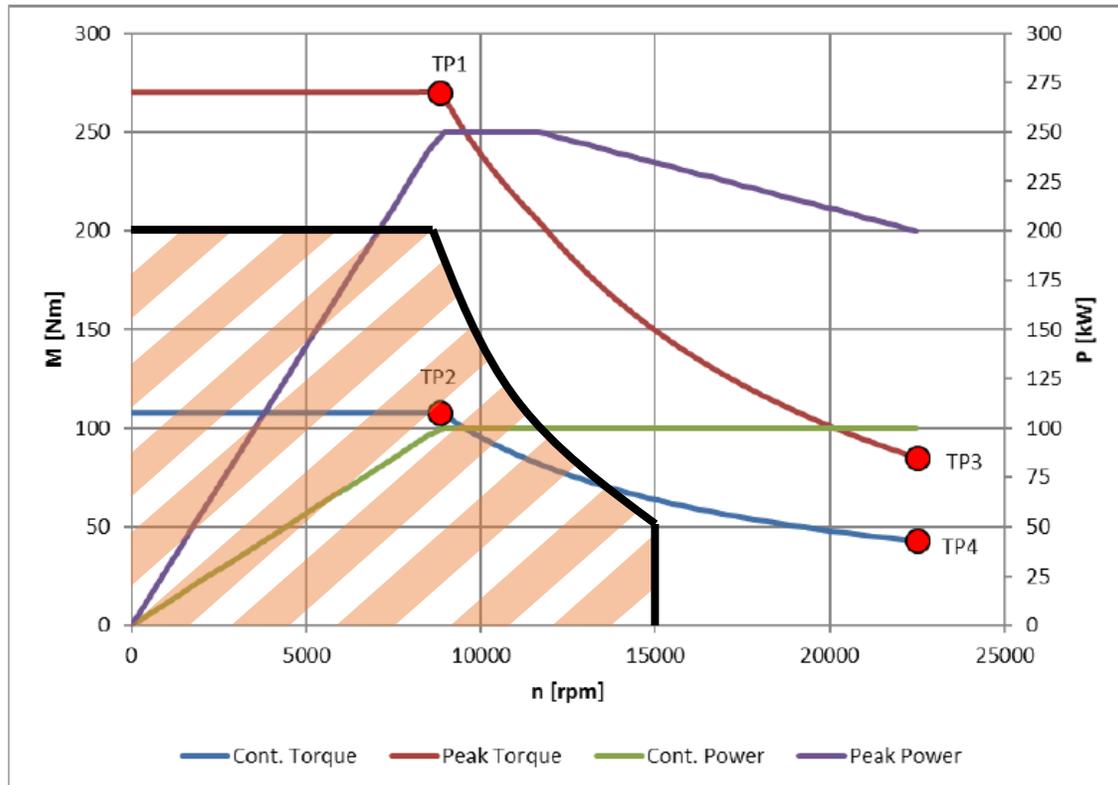


Abbildung 26: Kennfeld des Prüfstands zur Vermessung von E-Maschine und Inverter

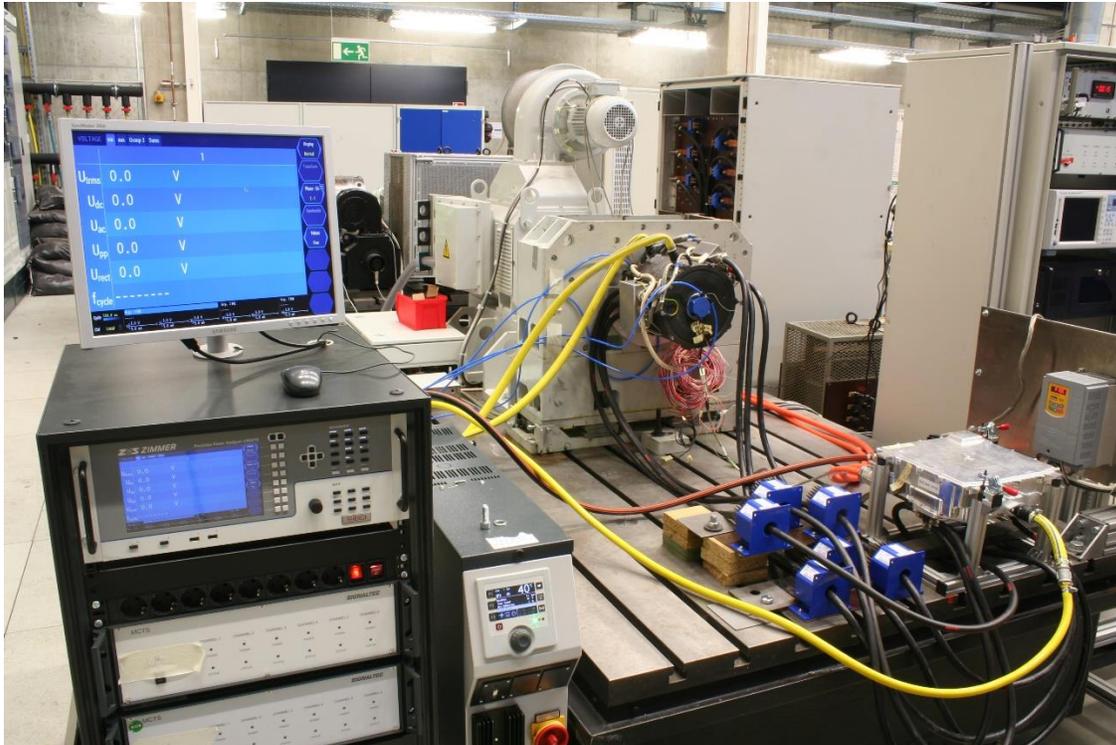


Abbildung 27: Prüfstands Aufbau zur Vermessung von E-Maschine und Inverter

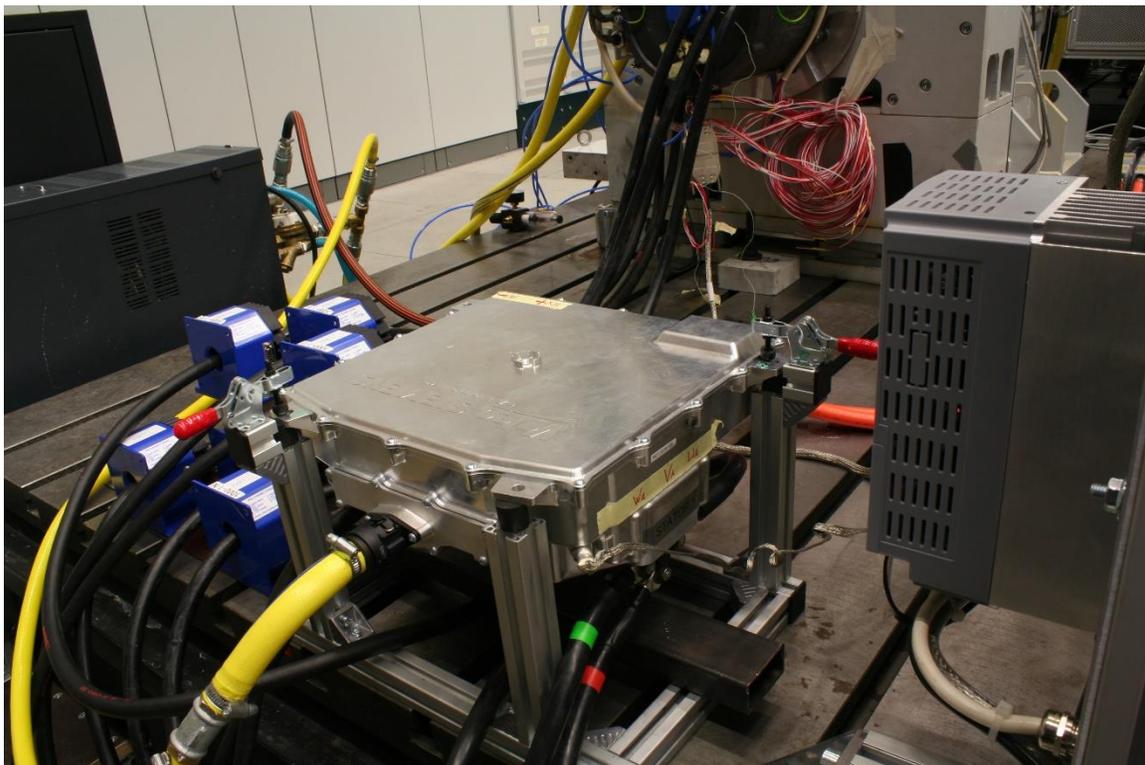


Abbildung 28: Prüfstands Aufbau zur Vermessung von E-Maschine und Inverter

Die Vorbereitungen für den Prüfstandsbetrieb umfassten die mechanische Anpassung und die Montage der Komponenten auf dem Prüfstand, das Herstellen der elektrischen Verbindungen, Aufbau und Montage von messtechnischen Komponenten und das Einrichten der Steuerungsumgebung.

Das angestrebte Ergebnis der Arbeiten war ein vollständiges Kennfeld von E-Maschine und Inverter innerhalb der durch den Prüfstand vorgegebenen Grenzen. Dafür waren nicht nur Drehmoment und Drehzahl messtechnisch zu erfassen, sondern auch die DC- und AC-Spannungen und –Ströme.

Die Kommunikation zum Inverter wurde auf Grundlage des CAN-Protokolls mit der Software „Vector CANape“ realisiert, wie in Abbildung 28 dargestellt. Über diese Schnittstelle wurden sowohl die Sollwertvorgaben wie Drehmoment oder Sollstrom kommuniziert, als auch interne Messwerte wie Statortemperatur oder die Temperatur der Treiberplatine erfasst.

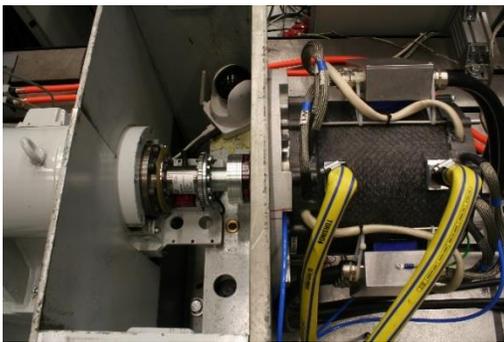


Abbildung 29: Prüfstandsaufbau

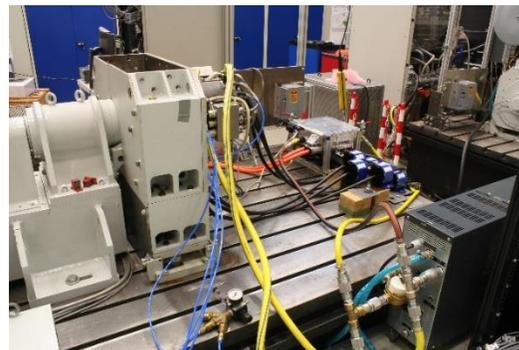


Abbildung 30: Prüfstandsaufbau

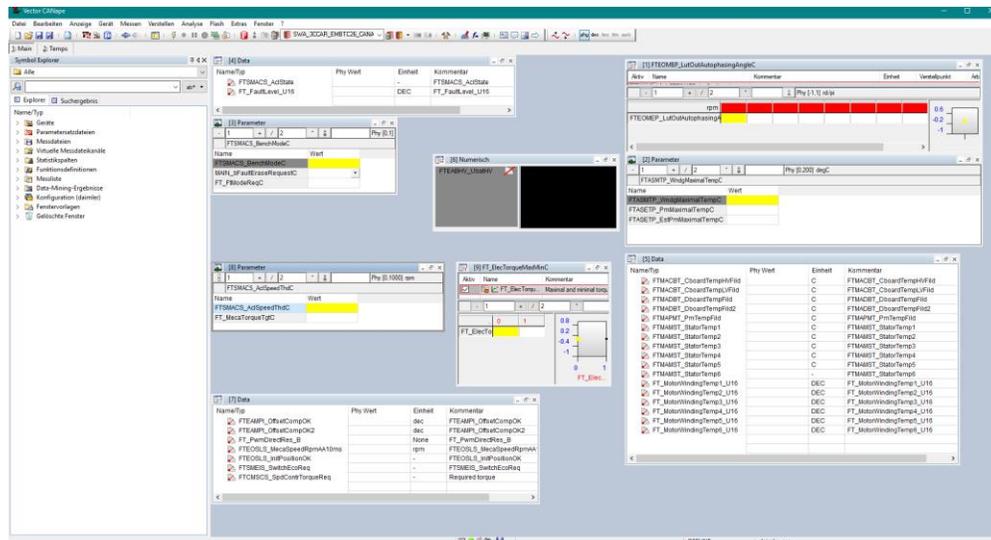


Abbildung 31: CANape Umgebung

Im Anschluss an die Einrichtung der Kommunikationsschnittstelle wurden die durch ValeoSiemens vorgegebenen Schritte zur Ersteinrichtung der E-Maschine abgearbeitet, um die korrekte Funktion der Sensoren für Temperatur und Zwischenkreisspannung sowie der Kommunikationsschnittstelle zu prüfen.

Der Resolver-Offsetwinkel wurde ermittelt, indem die Maschine bei 2000 min⁻¹ nacheinander in positive (+) und negative (-) Richtung passiv geschleppt wurde und dabei

der Winkel angepasst wurde bis $U_d^+ = U_d^-$ und $U_q^+ = -U_q^-$ erfüllt war. Das Ergebnis wurde dann mit einem AKS (active short circuit = Aktiver Kurzschluss)-Test verifiziert, wie in Abbildung 29 dargestellt. In beiden dreiphasigen Systemen sind die d-Ströme in positiver und negativer Richtung gleich, während die absoluten q-Ströme betragsgleich mit unterschiedlichem Vorzeichen sind – dies ist das erwartete Verhalten bei korrektem Offsetwinkel.

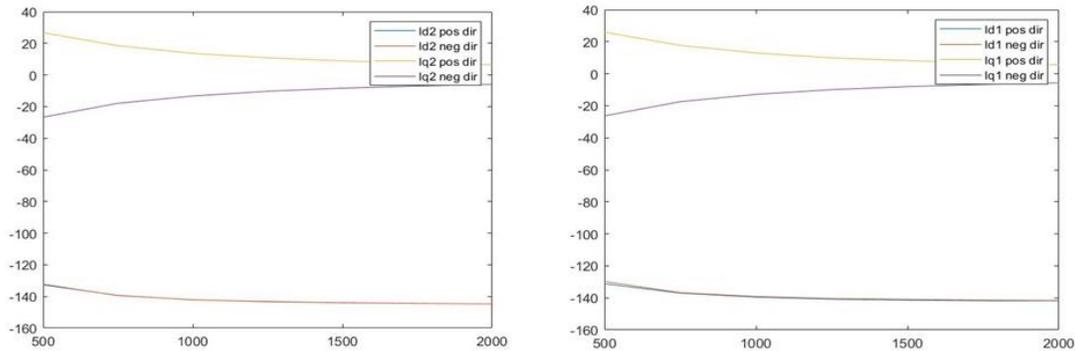


Abbildung 32: AKS-Test mit ermitteltem Offsetwinkel

Während des Testbetriebs traten mehrere technische Schwierigkeiten auf, die jedoch mit Unterstützung der Partner ValeoSiemens und Brno University of Technology überwunden werden konnten. Die erzielten Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

Testergebnisse:

Um die Wirkungsgradkennfelder des Inverters und der E-Maschine zu ermitteln wurden DC-Ströme und –Spannungen, AC-Ströme und –Spannungen sowie Drehzahl und Drehmoment gemessen. Folgende Arbeitspunkte wurden für die Kennfelder gewählt:

- Drehzahl: 500 – 15000 min^{-1} , gesteigert in Schritten von 500 min^{-1}
- Drehmoment: -180 – 180 Nm, gesteigert in Schritten von 15 Nm

Die ermittelten Kennfelder sind in Abbildung 30 dargestellt. Im generatorischen Betrieb konnten die Prüfstandsgrenzen voll ausgefahren werden, ohne dass sich dabei Instabilitäten einstellten. Im motorischen Betrieb hingegen wurden ab Drehmomentvorgaben von mehr als 150Nm bei niedrigen und mittleren Drehzahlen und sogar noch niedrigeren Drehmomentvorgaben bei hohen Drehzahlen starke Schwingungen der Phasenströme beobachtet, die außerdem auch akustisch deutlich wahrnehmbar waren. Diese Störungen führten in den genannten Betriebspunkten zur Abschaltung des Inverters aufgrund von Überschreitung der Stromgrenzen. Oberhalb von 12.500 min^{-1} konnte überdies keinerlei Drehmoment mehr gestellt werden.

Es wird vermutet, dass dieses Verhalten auf ungenaue Flusstabellen zurückzuführen sind, die in der Steuerungssoftware des Inverters hinterlegt sind. Diese Tabellen sind erforderlich, um die starke magnetische Kopplung zwischen beiden 3-Phasen-Teilsystemen in der Regelschleife zu kompensieren. Die Werte basieren auf FEM-Simulationen und wurden nicht messtechnisch an der tatsächlichen Maschine ermittelt bzw. verifiziert. Abweichungen zwischen den simulierten und den tatsächlichen Werten können zu den beobachteten Instabilitäten führen. Dieser Umstand würde außerdem die beobachteten Abweichungen zwischen der Drehmomentvorgabe und dem tatsächlich

gemessenen Drehmoment erklären, die in manchen Arbeitspunkten zwischen 10 und 15 Nm lag. So wurde beispielsweise bei einer Drehmomentvorgabe von -180Nm ein Drehmoment von -193Nm gemessen

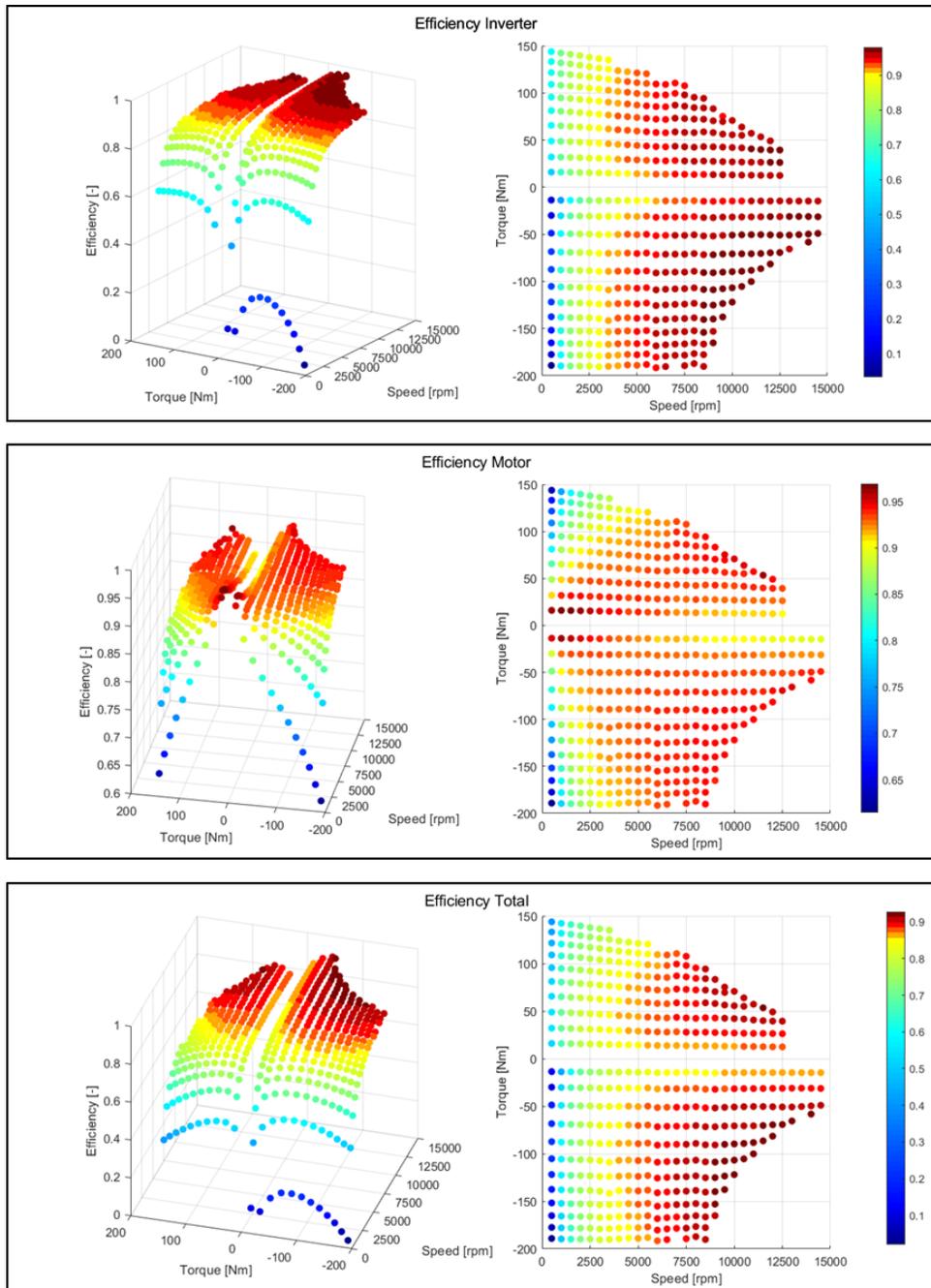


Abbildung 33: Wirkungsgradkennfelder von Inverter, E-Maschine und Gesamtsystem

Die absolute Maximalleistung von 169kW wurde bei einer Drehzahl von 8500 min^{-1} und einem Drehmoment von -190Nm erreicht.

Der höchste erreichbare Wirkungsgrad für positive Drehmomentvorgaben beträgt:

	Efficiency [-]	@Speed [rpm]	@Torque [Nm]
Inverter	0.97	12500	39
Motor	0.98	12500	49
Total	0.91	11500	53

Für negative Drehmomentvorgaben:

	Efficiency [-]	@Speed [rpm]	@Torque [Nm]
Inverter	0.98	14000	-58
Motor	0.96	1000	-13
Total	0.92	14000	-58

Wie aus den obigen Tabellen sowie Abbildung 30 ersichtlich ist, wird das Wirkungsgradmaximum von >90% bei hohen Drehzahlen von über 10000 min⁻¹ und bei Drehmomentvorgaben zwischen 50 und 150Nm erreicht. Angesichts der Auslegung der Maschine für Drehzahlen oberhalb von 20000 min⁻¹ entspricht dieses Ergebnis den Erwartungen.

Zusammenfassung:

Die Ergebnisse der Prüfstandsversuche belegen die generelle Funktion des Aufbaus aus Inverter und E-Maschine des 3CCar-Projekts. Es wird erwartet, dass die beschriebenen Instabilitäten durch tatsächliche, durch Messungen ermittelte Flusstabellen behoben werden können. Dass ein stabiler Betrieb prinzipiell möglich ist, wurde durch den Betrieb bei Arbeitspunkten mit negativer Drehmomentvorgabe belegt. Die Verwendung von gemessenen Flusstabellen würden darüber hinaus auch eine Verbesserung des Wirkungsgrades des Antriebs erwarten lassen, da sich hierdurch genauere MTPA (maximum torque per ampere / maximales Drehmoment pro Ampere) -Kurven ableiten lassen, die zu einer besseren Drehmomentausnutzung des Phasenstroms führen.

2.1.5. WP7: Dissemination, Exploitation and Standardization

Ziele WP7

Dieses WP ist für die Vorbereitung der Nutzung und die Veröffentlichung der Projektergebnisse vorgesehen. Dabei werden einerseits interne Workshops mit den verschiedenen Geschäftsbereichen durchgeführt, kombiniert mit Besuchen von Tagungen und Konferenzen.

Ergebnisse WP7

Die Projektziele und –ergebnisse wurden auf diversen Daimler-internen Projekttreffen mit Vertretern verschiedener Produktbereiche vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus wurden Projektergebnisse in mehreren öffentlichen Vorträgen vorgestellt, wie in Abschnitt 2.6 aufgeführt.

Weiterhin leitet die Daimler AG die Arbeitsgruppe ISO/TC 22/SC 37/WG 4 „Systeme und Komponenten für den elektrischen Antrieb“, in dem Spannungsklassen und Testmethoden für elektrische Antriebssysteme auf internationaler Ebene abgestimmt werden. Hierbei werden die Erkenntnisse zu höheren Betriebsspannungen berücksichtigt. Außerdem ist die Daimler AG in die Arbeitsgruppe „Funktionale Sicherheit“ (ISO TC22/SC32/Work Group 8) eingebunden, die sich mit der Erarbeitung und Aktualisierung des Standards ISO26262 befasst.

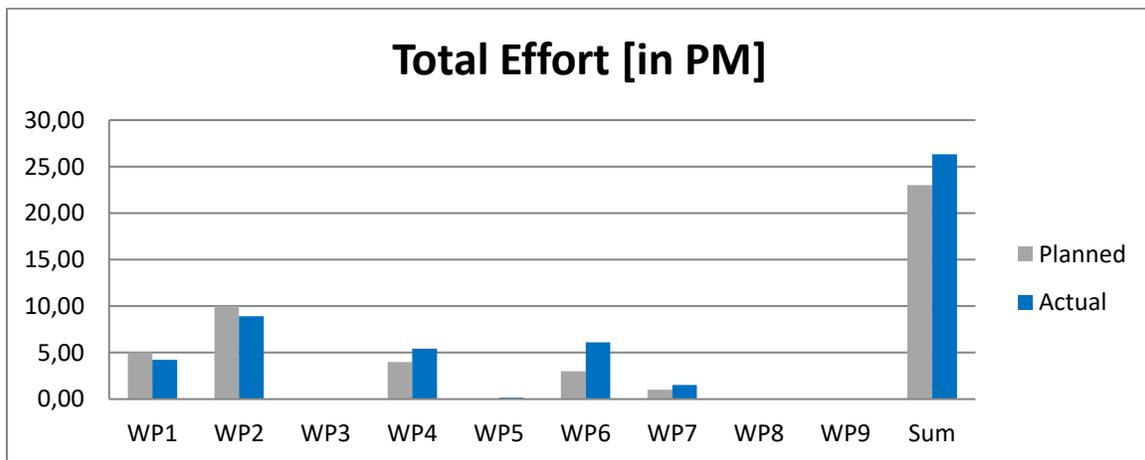
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Laufe der Arbeiten stellte sich heraus, dass die anspruchsvollen Anforderungen an den spezifizierten elektrischen Hinterachsantrieb mehrere Iterationen erforderten, so dass sich der Start der konkreten Designphase in WP2 um ca. 3 Monate verzögerte.

Im Gesamtzeitraum wurden insgesamt 26,33 Personenmonate im Projekt geleistet.

Jahr	2016	2017	2018	Summe
Plan (PM)	14,5	8,5	5	28
Ist (PM)	10,9	9,06	6,37	26,33

Die Gesamtstundenzahl ist geringfügig weniger als ursprünglich geplant. Ihre Aufteilung ist im folgenden Diagramm zu sehen.



Wie oben dargestellt, wurde außerdem eine Konzeptstudie bezüglich eines integrierten Getriebes für eine realitätsnahe Umsetzung des elektrischen Antriebstrangs durchgeführt, um einen potentiellen Einsatzfall demonstrieren zu können. Um die erhöhten Kosten für die Getriebeentwicklung, die in Unterbeauftragung bei der Firma hofer Powertrain durchgeführt wurde, zu kompensieren, wurden 4 Personenmonate von WP6.21 (sensor testing) und 6.2 (verification of computing algorithm) umgewidmet.

Die Arbeiten zur elektrischen Simulation von Brennstoffzellen-Entladevorgängen in SC3 und zu den thermischen Abschätzungen für die Auswahl von Halbleitern für Entladeeinheiten sowie die experimentellen Untersuchungen an Halbleitermodulen wurden in Unterbeauftragung an der Universität Bayreuth durchgeführt.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Einsatz von sechsphasigen elektrischen Antrieben im automobilen Sektor stellt eine neuartige und, im Hinblick auf Ausfallsicherheit und Leistungsdichte vielversprechende, Lösung dar. In dem Maß, wie elektrisch angetriebene Fahrzeuge in Leistungsklassen vorstoßen, die bisher hochperformanten Verbrennungsantrieben vorbehalten waren, steigen auch die Anforderungen an die Leistung des Antriebs bei gleichzeitig hoher Anspannung der Bauraumvorgaben.

Insofern ergibt sich die Notwendigkeit, zielführende und möglichst fahrzeugnahe Konzepte zu einem hohen Reifegrad zu entwickeln und deren Konzepttauglichkeit nachzuweisen.

Beide Ziele konnten im Rahmen des Projekts erreicht werden, indem aktuelle Bauraumvorgaben, die aus tatsächlichen Fahrzeugumgebungen abgeleitet wurden, verwendet wurden, die Entwicklung anhand von automobilen Normen und Standards durchgeführt wurde und die Funktion und Tauglichkeit schlussendlich im Prüfstandsbetrieb nachgewiesen wurde. Die Aktivitäten zur Getriebeentwicklung stellen einen weiteren Beitrag zur Verwertbarkeit des Konzeptes dar, da nur durch eine ganzheitliche Betrachtung sämtlicher Antriebskomponenten eine realistische Bewertung möglich wird.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die entwickelten Komponenten stellen zusammen einen fahrzeughen elektrischen Antrieb dar, dessen Leistungsdaten zu Fahrzeugen der Oberklasse und Sportwagen passen. Eine Skalierbarkeit für weniger performante Baureihen ist dadurch gegeben, dass auch mit nur einem Einzelantrieb (Motor und Inverter) ein überzeugender Fahrzeugantrieb dargestellt werden kann.

Für die Daimler AG stellen die Ergebnisse des Projekts eine wertvolle Machbarkeitsanalyse und den Nachweis der Konzepttauglichkeit dar und werden in künftigen Entwicklungen als Referenz herangezogen werden. Das hohe Interesse der Daimler AG an den Projektergebnissen wird auch durch die eigenverantwortliche Weiterentwicklung des Getriebekonzepts belegt.

2.5. Während der Durchführung bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der koreanische Hersteller LS Automotive (vormals Daesung) hat ein Konzept für eine „Smart BDU“ (Battery Disconnect Unit) vorgestellt, das dem in SC3 verfolgten Konzept ähnelt. Durch den kombinierten Einsatz von mechanischen und Halbleiterschaltern können die lebensdauerermindernden Lichtbögen beim Schaltvorgang unter Last vermieden und kostengünstigere Schalter verwendet werden. Der Hersteller verspricht sich davon eine Kostensenkung sowie ein um 40% vermindertes Gewicht der Schalteinheit.

Des Weiteren wurde im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „NEST-DC“ ein halbleiterbasierter Schutzschalter für den Spannungsbereich bis 1500V erforscht.

Aufgrund dieser Tatsachen wurden die Aktivitäten bzgl. der Unterbrecherschaltung gestoppt und die Personalkapazität konnte für die Abstimmung und Entwicklung des Getriebes in SC2 umgewidmet werden.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Öffentliche Vorträge:

W. Wondrak, A. Nisch, V. Lauer: Opportunities for the Electric Powertrain by Increased Operation Voltage
ECPE Workshop "Power Electronics for e-Mobility" Stuttgart, Germany, 22 – 23 June 2016
Stuttgart, Germany

R. John, W. Wondrak
Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars
European Expert Workshop on Reliability of Electronics and Smart Systems (EuWoRel),
Berlin, Oct 18-19, 2016

R. John, W. Wondrak
Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars
European Expert Workshop on Reliability of Electronics and Smart Systems (EuWoRel),
Berlin, Sep 26-27 2017

Wolfgang Wondrak, Daimler AG, Reiner John, Infineon Technologies AG
3Ccar'– Integrated Components for Complexity Control
BMBF Fachtagung Elektromobilität, Berlin, 23-24 April 2018

Wolfgang Wondrak, Daimler AG, Reiner John, Infineon Technologies AG
3Ccar'– Integrated Components for Complexity Control
Kongress „ECSEL in Deutschland“, Dresden, 5 – 6 September 2018,

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur in 3CCar	4
Abbildung 2: Projektplan 3CCar	4
Abbildung 3: Projektstruktur mit Supply Chains	6
Abbildung 4: Supply Chain 2 - Partner und Inhalte	7
Abbildung 5: Supply Chain 3 - Partner und Inhalte	7
Abbildung 6a: 3D Ansicht des avisierten Bauraums	12
Abbildung 7b: Darstellung verschiedener Varianten des ausgewählten Konzepts III	12
Abbildung 8: Schematische Darstellung des neuen Trennschalterkonzepts	13
Abbildung 9: Ersatzschaltbild für einen Brennstoffzellenstack zur Ermittlung der worst-case Anforderungen	15
Abbildung 10: Simulierte Entladestromverläufe für Kurzschlussentladungen des Stacks	15
Abbildung 11: Darstellung eines 6-phasigen Systems, gesteuert durch zwei 3-phasige Subsysteme	18
Abbildung 12: Motorcharakteristik	19
Abbildung 13: Getriebecharakteristik	20
Abbildung 14: Aktualisierte Bauraumhülle	21
Abbildung 15: Lösungsansätze Getriebe	21
Abbildung 16: Anpassung an der Rotorwelle	22
Abbildung 17: Anpassung am Motorlagerschild	22
Abbildung 18: Finales Getriebedesign	23
Abbildung 19: Darstellung des Triebstrangs mit zwei E-Maschinen und Getrieben	23
Abbildung 20: Räumliche Darstellung des Triebstrangs im Bauraum	23
Abbildung 21: 6-phasiger Testinverter	25
Abbildung 22: Prüfaufbau für Stromsensoren	26
Abbildung 23: Stromsensormodul Typ HAH3DR800S07 als Referenz	26
Abbildung 24: Charakterisierung Stromsensor Typ HAH3DR800S07	26
Abbildung 25: Präsentation des SC2-Antriebsstrangs mit Getriebemodell auf dem Abschlußtreffen in Graz am 9.10.2018	27
Abbildung 26: Kennfeld des Prüfstands zur Vermessung von E-Maschine und Inverter	28
Abbildung 27: Prüfstandsaufbau zur Vermessung von E-Maschine und Inverter	29
Abbildung 28: Prüfstandsaufbau zur Vermessung von E-Maschine und Inverter	29
Abbildung 29: Prüfstandsaufbau	30
Abbildung 30: Prüfstandsaufbau	30
Abbildung 31: CANape Umgebung	30
Abbildung 32: AKS-Test mit ermitteltem Offsetwinkel	31
Abbildung 33: Wirkungsgradkennfelder von Inverter, E-Maschine und Gesamtsystem	32

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht im Verbundprojekt „Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars – 3Ccar“ Teilvorhaben der Daimler AG: Sicherheits- und Sensorkomponenten für elektrische Antriebssysteme	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Wondrak, Wolfgang Ohms, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2018
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Daimler AG Dipl.-Ing. (FH) Christian Ohms Hanns-Klemm-Straße 45 71034 Böblingen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EMOE009
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Projekt 3CCar hatte zum Ziel, der wachsenden Komplexität in aktuellen Fahrzeugen durch den Einsatz von Halbleitertechnik zu begegnen und dadurch die Kosten insbesondere für elektrisch angetriebene Fahrzeuge zu verringern bzw. deren Attraktivität für den Kunden zu vergrößern. Die Daimler AG hat sich dabei auf die Antriebstechnik sowie Sicherheitselemente konzentriert, um deren Leistungsdichte und Verfügbarkeit zu steigern. Zu Projektbeginn stellen elektrische Antriebe mit einer Leistungsdichte von 2,9kW/kg sowie elektromechanische und pyrotechnische Sicherungselemente den Stand der Technik dar. Im Rahmen der Aktivitäten wurde dabei zum einen unter automobiltechnischen Maßgaben ein hochperformanter, elektrischer Antriebstrang mit zusätzlicher Ausfallsicherheit und einer um den Faktor 1,6 gesteigerten Leistungsdichte entwickelt. Zum anderen wurde die Eignung von Halbleiterschaltenelementen als reversibles Sicherungselement in elektrischen HV-Bordnetzen untersucht und in Versuchen nachgewiesen. Die erzielten Ergebnisse stellen für die Daimler AG eine wertvolle Machbarkeitsanalyse und den Nachweis der Konzepttauglichkeit dar und werden in künftigen Entwicklungen als Referenz herangezogen werden.	
19. Schlagwörter Elektromobilität, Ausfallsicherheit, Leistungsdichte, Brennstoffzelle, Leistungselektronik, HV-Batterietechnik, elektrische Maschinen	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Abschlußbericht im Verbundprojekt „Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars – 3Ccar“ Teilvorhaben der Daimler AG: Sicherheits- und Sensorkomponenten für elektrische Antriebssysteme	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Wondrak, Wolfgang Ohms, Christian	5. end of project 31.10.2018
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Daimler AG Dipl.-Ing. (FH) Christian Ohms Hanns-Klemm-Straße 45 71034 Böblingen	9. originator's report no. 16EMOE009
	10. reference no.
	11. no. of pages
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 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 The 3CCar project had the objective to address the growing complexity in today's vehicles by means of semiconductor technology and hence reducing cost and increasing attractiveness especially of electric vehicles. Within this scope, Daimler AG has focused on powertrain technology and safety elements to increase their power density and availability. At the beginning of the project electrical drivetrains with a power density of 2,9kW/kg as well as electro-mechanical and pyrotechnical safety elements were state of the art. The activities in the project have resulted in the development of a highly performant electrical drivetrain according to automotive requirements, including fail-operational features and a power density increased by a factor of 1,6. Besides, the eligibility of semiconductor switching elements as reversible safety element in electrical HV power nets has been evaluated and proved in experiments. The results of the 3CCar project present a valuable feasibility analysis and proof-of-concept to Daimler and will be used as a reference during future developments.	
19. keywords Electric mobility, fail operability, power density, fuel cell, power electronics, HV battery technology, electrical machines	
20. publisher	21. price