

Schlussbericht e-generation

Zuwendungsempfänger: Robert Bosch GmbH

Teilvorhaben: „Antriebsstrang und Fahrdynamik“

Forschungsprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen	16N11861
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2012 – 30.09.2015
Berichtszeitraum	01.01.2012 – 30.09.2015
Projektstart	01.01.2012
Erstellungsdatum	14.03.2016
Berichtsersteller Firmenname	Robert Bosch GmbH

Inhalt

1. Motivation und Ziel des Vorhabens.....	3
2. Antrieb/Steuerung	3
2.1. Lasten-/Pflichtenheft.....	3
2.2. Antriebsstrang-Konzepte, Modularer Antriebsbaukasten	3
2.3. E-Maschinen	9
2.4. Leistungselektronik.....	20
2.5. Test/Aufbau/Integration Antriebsstrang	25
3. Bremssystem	30
3.1. Auslegung Bremssystem.....	30
3.2. Fahrzeugaufbau und Freigabeprozess.....	33
3.3. Rekuperation	35
3.4. Simulation und Funktionsentwicklung	37
3.5. Notbremsfunktion unter Einsatz versch. im Fahrzeug verfügbarer Aktuatoren	39

1. Motivation und Ziel des Vorhabens

Die Bundesregierung misst der Elektromobilität hohe strategische Bedeutung zu und sieht Deutschland zukünftig als Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität. Untermuert wird dies mit dem Ziel bis 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen zu bringen. Die Erreichung dieses Ziels wird nur möglich sein, wenn kundentaugliche Produkte angeboten werden, das heißt Produkte die sich in ihren Eigenschaften von heutigen Automobilstandards nicht grundlegend unterscheiden. Dies erfordert noch eine Vielzahl von Verbesserungen auf Seiten der Einzel-komponenten, wie zum Beispiel des Elektromotors, insbesondere auch dem Zusammenwirken aller Komponenten und einer massiven Kostensenkung.

Teilvorhaben: Hocheffiziente, skalierbare Antriebsstränge und rekuperative Bremssysteme und Fahrdynamikfunktionen für EV-Anwendungen.

2. Antrieb/Steuerung

2.1. Lasten-/Pflichtenheft

Für das Arbeitspaket 2.1, Lasten-Pflichtenheft, wurde begleitend zur Topologieauswahl und Maschinenauslegung für den Prototypen ein Anforderungsprofil für das Zielfahrzeug mit Porsche ermittelt. Ziel war es ein gewichtetes Anforderungsprofil eines Referenzfahrzeuges für das Sportwagensegment zu erhalten um damit die Auswahl und Optimierung von Antriebstopologie und Komponenten zu verbessern. Eine große Herausforderung hierbei war es die Anforderungsanalyse mit der bereits begonnenen Auswahl und Auslegung der Komponenten für Prototypen in Einklang zu bringen während sich die Lastprofile bei Porsche noch in Entwicklung befanden.

Das Antriebslastenheft für den E-Boxster wurde gemeinsam mit Porsche entwickelt. In der Diskussion mit Porsche entstand ein tieferes Verständnis für die spezifischen Anforderungen, insbesondere nach der Reproduzierbarkeit der Leistung des Antriebs. Der so erarbeitete Lastenheftstand bildet eine Grundlage für die Erarbeitung von Testfällen für den Prüfstandbetrieb bei Bosch.

2.2. Antriebsstrang-Konzepte, Modularer Antriebsbaukasten

Untersuchung Antriebs-Topologien

Topologieentscheidung

Die Aktivitäten in diesen Zeitraum wurden mit der Topologieentscheidung, in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Porsche, für die Demonstratorfahrzeuge abgeschlossen. Grundlage dafür war die systematische Analyse der Fahrzeuganforderungen im Spannungsfeld der Sportwagenanforderungen und der Baukastendefinition für Komponenten der unteren und mittleren Elektrofahrzeugklassen. Für die Demonstratorfahrzeuge wurde die Systemleistung definiert, die Lastenhefte für die Maschinenauslegung erarbeitet und Vorteile eines schaltbaren Zweigangetriebes für die Verluste im Antriebsstrang dargestellt. Grundlage dafür war die Konzipierung und die Umsetzung einer Antriebsstrangsimulation für das verwendete Demonstratorfahrzeug.

In Abhängigkeit von technischen und produktstrategischen Aspekten wurde eine qualitative, teilweise simulationsgestützte Topologie-Bewertung durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die dafür verwendeten Bewertungskriterien und die schematisch dargestellten Topologievarianten.

Kriterien	1	2	3	4	5	6	7	8
	VA HA	↑	↑	↑↓	↑↓↔	↑↔	↔	↔
Bauraum	—				—		—	—
Traktion	—						—	
Verluste Teillast	—	—				—	—	
Kosten								—
Kompa- tibilität	—	—						

↑ Achsantrieb (1EM pro Achse) mit Differential ↔ Einzelradantrieb (2EM pro Achse) — Problematisch

Abbildung 1 Topologie-Auswahlkriterien für Porsche Boxster mit PGES > 210 kW & Porsche Anforderungen

Ergebnis dieser Untersuchungen war die finale Entscheidung, auf der Vorderachse eine permanent erregte Synchronmaschine (PSM) mit 120 kW Peakleistung und auf der Hinterachse eine Asynchronmaschine (ASM) mit 144 kW Peakleistung, zunächst elektromagnetisch auszulegen, zu konstruieren und schlussendlich auch prototypisch aufzubauen.

Anbindung Thermisches Modell

In TP 2.3.6 wurde ein thermisches Netzwerkmodell einer Asynchronmaschine erstellt. Durch die Einbindung in ein Gesamtfahrzeugmodell konnten mittels Fahrzyklen die thermischen Effekte hinsichtlich Temperatur und Verluste der Maschine dynamisch betrachtet werden. In dem Entwicklungsprozess eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs dient diese Simulation der thermischen Absicherung beispielsweise vor Überhitzung und zur Verlustbestimmung.

Grenzbelastungen führen in einer kurzen Zeitspanne von 240s zu hohen Temperaturen von T = 270°C. In dem zur Verbrauchsbestimmung eingesetzten Zyklus CADC150 steigen die Temperaturen über einen Zeitraum von 3240s nicht über T = 80°C. Die Bauteile im Rotor werden im Vergleich zu den Statorbauteilen deutlich stärker erwärmt. Dies ist auf die Kühlung des Stators zurück zu führen. Durch die thermische Betrachtung ergibt sich im Verlauf des CADC150 eine simulative Verlustkorrektur von -4,55%.

Detailsimulation in GT-Suite

Bei der Simulation des e-Boxsters mithilfe von GT-Suite wurden Templates der E-Maschinen, Getriebe mit Differential, Achsen, Räder, Batterie, Inverter, Karosserie eingesetzt. Zusätzlich sind die Umgebungsbedingungen (Straße, Wetter), der Fahrzyklus und das Verhalten des Fahrers zu definieren. Hier ergeben sich viele Freiheitsgrade in der Modellierung. Die Modellierung durch Templates erlaubte es ein Modell sehr schnell und intuitiv aufzubauen.

Da sich einige gewünschte Aspekte des Modells (z. B. eine Betriebsstrategie) in GT-Suite nur äußerst umständlich verwirklichen lassen, wurde im nächsten Entwicklungsschritt eine Verbindung zwischen der GT-Simulation und Matlab/Simulink aufgebaut. Als Schnittstelle dient in GT-Suite ein Template zur Co-Simulation. Die Erweiterung der Simulink-Bibliothek um die notwendige Schnittstelle wird von Gamma Technologies bereitgestellt. Matlab/Simulink wirkt in der Co-Simulation als Master und steuert weitgehend den Ablauf der Simulation. Beide Programme rechnen aber weiterhin eigenständig und tauschen ihre Informationen über eine vorgegebene Kommunikationsschrittweite aus.

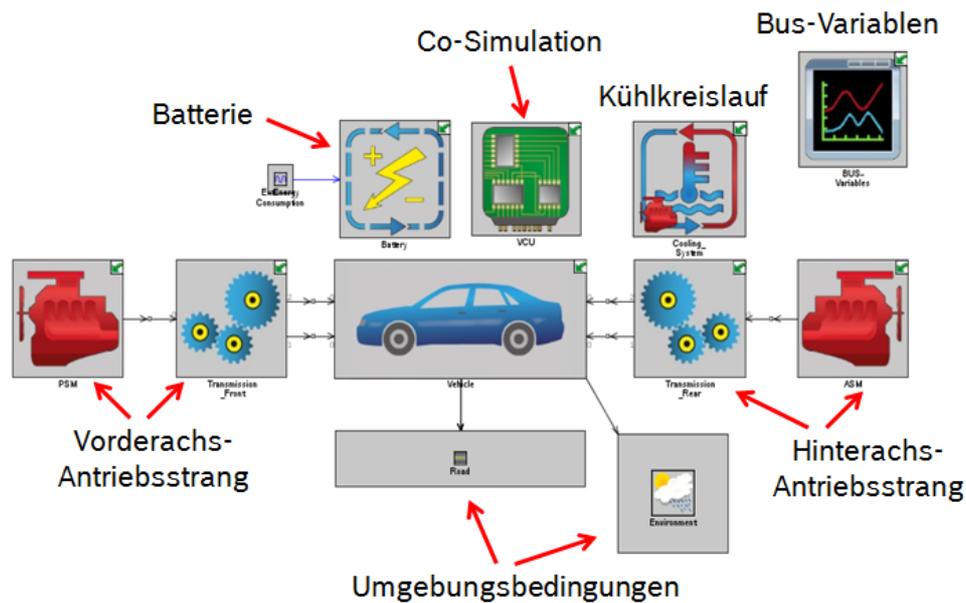


Abbildung 2 Überblick über das Gesamtmodell in GT-Suite

Ableitung modularer Konzepte Lastenheft für Modulbaukasten

Das von Porsche bereitgestellte Lastenheft für Kompakt-/Subkompaktfahrzeuge liefert Basisdaten zur Entwicklung des Antriebsbaukastens. Ein Antriebsbaukasten für elektrische Antriebsstränge wird gebildet durch die Kombination der Bausteine Leistungselektronik, Getriebe, Batterie und elektrische Maschine. Daraus können schnell und kostengünstig Antriebsvarianten für unterschiedliche Zielfahrzeugklassen und Marktsegmente für den Massenmarkt erzeugt werden. Bosch fokussiert sich beim Baukasten für die elektrische Maschine auf die Variation der Aktivteillänge und der Windungszahl bei einem konstanten Durchmesser. Für die Leistungselektronik wird der Baukasten über eine Variation des Phasenstroms bei konstanter Spannung gebildet. Der Getriebe-Baukasten liegt in der Verantwortung von Porsche.

Auf Basis der Auslegung des Porsche Antriebs wird so eine mögliche Ableitung für massenmarktaugliche elektrische Antriebe entwickelt.

Bezüglich der Topologie konzentriert sich der Baukasten auf einen Zentralantrieb, eine Batteriespannung von 400V und ein Einganggetriebe.

Der so entstehende Maschinen- und LE-Baukasten dient als Eingangsgröße für Getriebeauslegung. Potentielle Erweiterungen sind ein Zweiganggetriebe und die Variation der Spannungslage.

Antriebsbaukasten

In Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern wurde ein Modularisierungsansatz erarbeitet und umgesetzt. Um den Anforderungen anderer Fahrzeugklassen, unter Berücksichtigung der Auslegungsergebnisse für die Demonstratorfahrzeuge, gerecht zu werden, wurde ein Maschinenbaukasten auf Basis der Prototypenmaschinen abgeleitet. Dafür wurden auf Basis der Prototypenmaschinen (PSM 120kW, ASM 144 kW) jeweils fünf weitere Maschinen durch Skalierung der axialen Länge, Windungszahl und des Stroms erstellt. Die Blechschnitte und das Drehzahlniveau

blieben unverändert. Für die ASM entstanden durch diesen Ansatz 5 Maschinen mit 144kW, 120kW, 96kW, 72kW und 48kW:

Maschine	Baugröße	P / kW	M / Nm	I / A	N _c
M1 (Prototyp)	180/180	144	260	450	8
M2	180/150	120	215	360	10
M3	180/120	96	173	300	12
M4	180/90	72	130	225	16
M5	180/60	48	87	150	24

Tabelle 1 Modulbaukasten ASM

Für die PSM wurde ein Baukasten mit der Leistung von 114kW, 106kW, 85kW, 58kW und 49kW abgeleitet:



Modulbaukasten - PSM



- Unveränderter Blechschnitt
- Beibehaltung Eckdrehzahl / max. Drehzahl
- Skalierung von axialer Länge, Windungszahl, Strom
- U = 400 V

L_Fe [mm]	I_max [A]	nWind, Halbnut	M_max [Nm]	P_max [kW]	Bemerkung
60	150	11	66	49	
90	150	7.5	72	58	
90	300	6.5	114	85	
120	300	5	124	106	
120 *	450	5	162	114	
150	450	4	178	137	n_eck=7500
150	450	4.5	194	125	n_eck=6000
150	450	5	204	115	n_eck=5000
180	450	5	246	116	n_eck=4500
180	450	3.5	194	156	n_eck=6500

4 Institut für Elektrische Maschinen

* Ursprüngliche Auslegung

© IEM 2014 www.iem.rwth-aachen.de

Tabelle 2 Modulbaukasten PSM

Die weiteren PSM Maschinen mit höherer Leistung (vgl. Tabelle 2) wurden wegen der erwarteten Überdimensionierung nicht berücksichtigt.

Durch Beibehaltung des Blechschnittes kann das längenskalierbare Maschinengehäuse bei allen Maschinen genutzt werden. Dies führt zu Skaleneffekten in der Fertigung und ermöglicht eine Gleichteilestrategie bei Subkomponenten und Fertigungswerkzeugen. Die so gewonnen Kostenvorteile führen zu einem attraktiven Motorenbaukasten.

Um die so entstandenen Maschinen zu bewerten wurden exemplarisch zwei Fahrzeugklassen definiert. Dafür wurde aus Marktsicht in Zusammenarbeit mit Porsche zwei Spezifikationen für ein

Subkompaktfahrzeug und ein Kompaktfahrzeug abgeleitet. Folgende Abbildung zeigt die Vorgehensweise und die beiden Zielkonzepte mit zwei Vertretern aus dieser Klasse:

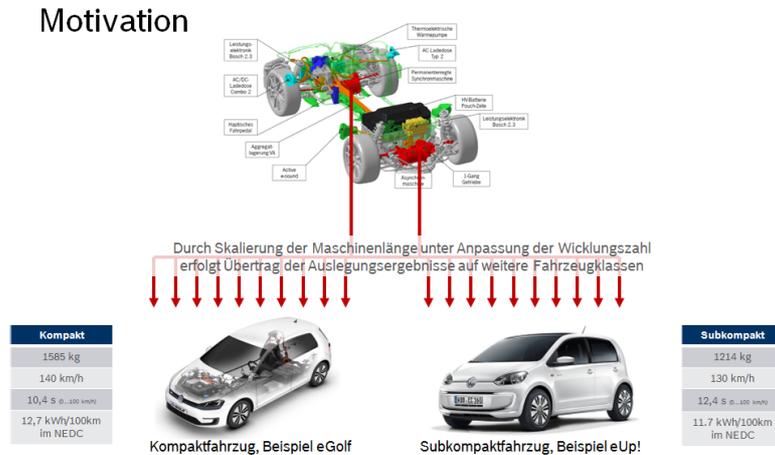


Abbildung 3 Baukastenentwicklung aus e-Boxster

Mit diesen je 5 Maschinen pro Maschinentyp und den beiden spezifizierten Fahrzeugen wurde eine Fahrzeugsimulation aufgebaut. Die Invertercharakteristik wurde an die Maximalströme der Maschinen angepasst. Die Getriebeübersetzung ist das Resultat aus der Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge und der Maximaldrehzahl der jeweilig verwendeten Maschinen. Zur Bewertung der Systeme wurden drei unterschiedliche Referenzzyklen (NEDC, WLTC und CADC130) analysiert.

Folgende Ergebnisse konnten durch die Simulation aller Varianten erarbeitet werden. Mit einer Maschine (ASM, 48kW_{peak}) kann die Zyklusanforderung des CADC130, sowohl für das Kompakt- als auch für das Subkompaktfahrzeug, durch fehlende Leistung im oberen Drehzahlbereich im Autobahnanteil bei Höchstgeschwindigkeit nicht erreicht werden.

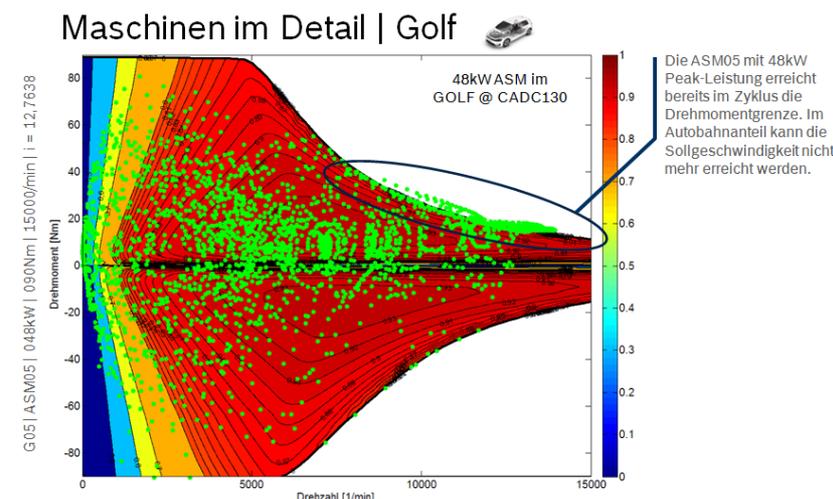


Abbildung 4 Arbeitspunkte im CADC 130 für Kompaktfahrzeug

Die kleinste PSM schafft diese Anforderung, da im oberen Drehzahlbereich in Relation mehr Drehmoment vorhanden ist. Die im CAD130 erreichten Verbräuche für beide Fahrzeuge mit allen Maschinen sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

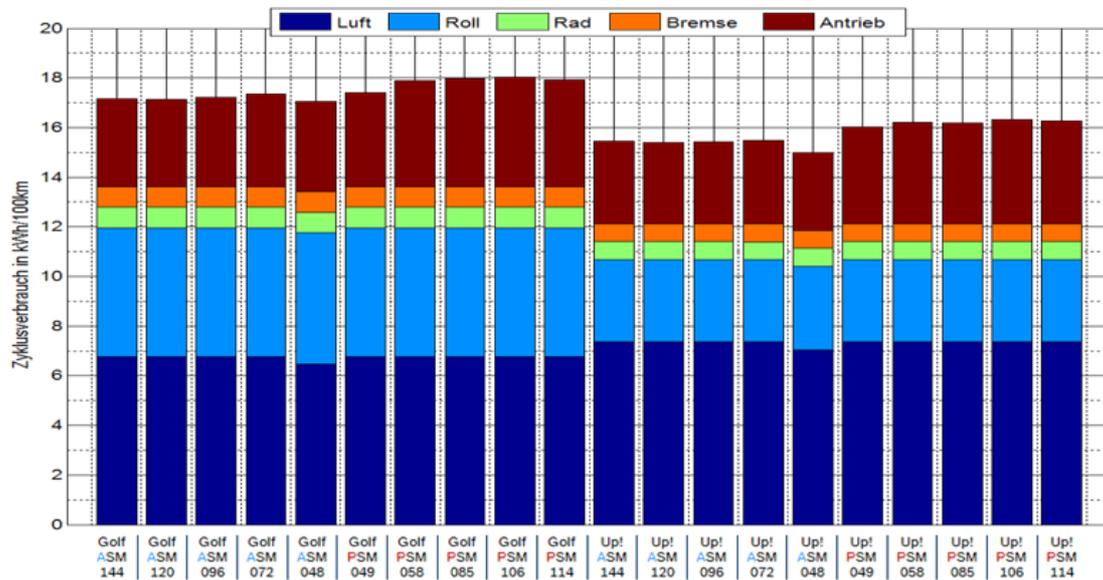


Abbildung 5 Zyklusverbräuche der Baukastenantriebe

Die Summe der dargestellten Einzelverluste liegt über den, in der Spezifikation ausgewiesenen Gesamtverbräuchen. Dies liegt am im Projekt vereinbarten Referenzzyklus CAD130, der gegenüber dem NEDC deutlich anspruchsvoller ist.

Die Normverbräuche von Fahrzeugen werden mit dem NEDC-Zyklus, ohne Nebenverbraucher (Licht, Klima,...) ermittelt und ausgewiesen. Wird diese Vorgehensweise auf unsere Simulation übertragen können im NEDC deutlich bessere Verbräuche realisiert werden. Für das Kompaktfahrzeug kann mit der 96kW Asynchronmaschine ein Gesamtverbrauch von ca. 13,1 kWh/100km (+6% zum ausgewiesenen Zielwert) und für das Subkompaktfahrzeug von 11,2 kWh/100km (-2%) erreicht werden.

Die Gesamtverbräuche der Fahrzeuge innerhalb eines Maschinenbaukastens variieren nicht signifikant, der Einfluss der Maschinengröße auf die Antriebsstrangverluste mit der dargestellten Motorenpalette (Längenskalierung eines Blechschnittes) ist eher gering.

Neben Gesamtfahrzeugverbrauch und Antriebsstrangkosten ist die Beschleunigung ein weiteres Bewertungskriterium. Um die Anforderungen des Kompaktfahrzeuges zu erreichen muss eine Beschleunigung von 10,4s von 0 auf 100 km/h erreicht werden. Dies wird mit drei Asynchronmaschinen (ab 96kW Antriebsleistung) und zwei Synchronmaschinen (ab 106kW Antriebsleistung) des Baukastens erreicht. Das Subkompaktfahrzeug (12,4s) erreicht die Vorgabe mit vier ASM (ab 72kW) und drei PSM (ab 85kW).

Prämisse für die Simulation mit Kompakt-/Subkompaktfahrzeugen war ein Basisfahrzeug, in welchem lediglich die Motorenleistung variiert wurde. Quereinflüsse durch z.B. andere Bereifung wurden vernachlässigt. Mit dem dargestellten Modulbaukasten können die Anforderungen der Zielfahrzeuge erreicht werden. Sowohl Verbrauch als auch Beschleunigung können die Vorgabe aus der Anforderung erfüllen. Der Fahrzeughersteller hat die Möglichkeit im Rahmen der Budgetvorgabe auch

leistungsstärkere Varianten einzusetzen, ohne signifikante Verbrauchseinbußen in Kauf nehmen zu müssen. Darüber kann der Modulbaukasten im Leistungsbereich von 48kW bis 144kW auch diverse weitere Fahrzeugkonzepte bedienen. Durch die Kompaktheit der Maschinen können auch radindividuelle Antriebstopologien oder weitere Mehrmotortopologien dargestellt werden. Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass die Effizienz der Maschinen ein gutes Marktpotential zeigen.

Die Themen Kosten und Kostensenkungspotentiale werden im Berichtsteil für das Arbeitspaket 2.3.4. explizit dargestellt. Für den Bosch Umfang Leistungselektronik und elektrische Maschine wird das Kostensenkungsziel von 40% klar erreicht. Die Inverter skalieren kostenseitig im Wesentlichen mit der Größe der verwendeten Halbleitermodule. Die Größe der Halbleitermodule ist abhängig von notwendigen Maximalströmen, die von der Maschine umgesetzt werden müssen. Durch Anpassung der maximalen Ströme der jeweiligen Maschinen sind auch für die Inverter signifikante Einsparpotentiale möglich.

2.3. E-Maschinen

Bewertung und Identifikation innovativer Konzepte

Auf Basis der Erfahrung aus Vorgängerprojekten und unter Berücksichtigung der Anforderung an Effizienzsteigerung und Kostenreduktion sowie Bauraumanforderungen wurden die permanenterrregte Synchronmaschine und Asynchronmaschine ausgewählt. Innerhalb dieser Maschinentypen wurden innovative Technologien entwickelt und ausgewertet: z.B. Hochdrehzahl PSM mit reduziertem Einsatz von Seltenerd-Magneten (RWTH-Aachen) und ASM mit verlustarmen Kupferrotoren.

Anforderung und Spezifikation der Sensorik und Kühlkonzepte

Bei der Auswahl der Sensorik muss zwischen der Kostenminimierung (Einsatz möglichst weniger und billiger Sensoren) und der aufgrund der Effizienz- und Dynamikanforderungen für eine hochgenaue Maschinenregelung erforderlichen hinreichend genauen Sensorik abgewogen werden.

Bezogen auf die zwei Maschinentypen PSM und ASM stehen vor allem Winkelgeber (PSM), Drehzahlgeber (ASM) und Sensoren zur Messung des magnetischen Flusses (ASM) im Vordergrund. Prinzipiell kann auf alle diese Sensoren verzichtet werden, indem die erforderliche Information modellgestützt (z. B. durch Beobachterverfahren) aus gemessenen Maschinengrößen (z. B. Phasenströme) ermittelt werden. Der Preis hierfür ist neben einer entsprechenden Aufwandserhöhung in der Entwicklung der Algorithmen vor allem ein Verlust an Sicherheit, da Überwachungskonzepte auf der Plausibilisierung redundanter Information beruhen.

Daher beinhaltet die erarbeitete Spezifikation zwar den Verzicht auf Flusssensoren (Information wird modellgestützt geschätzt), nicht aber den Verzicht auf Sensoren zur Detektion der Rotorwinkels bzw. der -drehzahl. Hinsichtlich der zwei Maschinentypen sind dabei verschiedene Kriterien zu beachten. So erfordert die Regelung einer PSM die Winkellage des Rotors, während bei einer ASM lediglich die Rotordrehzahl relevant ist. Um dennoch möglichst ähnliche Bauteile bei beiden Maschinentypen zu verwenden, fiel die Auswahl auf eine Winkelerfassung mittels Resolver, wobei die Drehzahl durch Differentiation erfolgt.

Für die Festlegung der Kühltechnologie der Asynchronmaschine (ASM) an der Hinterachse, wurde die notwendige Wärmeübertragungsleistungsdichte wie folgt berechnet:

$$Q = \Delta P / A;$$

Q [W/m²] notwendige Wärmeübertragungsleistungsdichte

ΔP [W] durchschnittliche Wärmeverluste der ASM im Dauerbetrieb (Quelle elektromagnetische Auslegung: 3000 W)

A [m²] minimale Wärmeübertragungsfläche (Quelle elektromagnetische Auslegung: Umfangsfläche über Aktivteil der ASM=0,1 m²)

Da die notwendige Wärmeübertragungsleistungsdichte bei ≥ 30000 W/m² liegt, wurde das Kühlkonzept mit Wasserkühlung ausgewählt (siehe Abbildung 6).

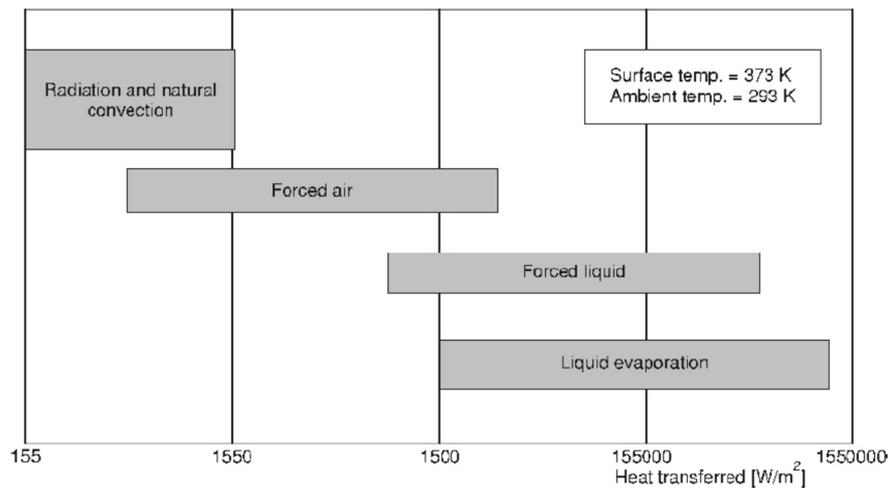


Abbildung 6 Leistungsbereich von konventionellen Wärmeübertragungstechnologien, Quelle: Thermal management of electronics: A review of literature, THERMAL SCIENCE: Vol. 12 (2008), No. 2, pp. 5-26

Konzepte E-Maschine (thermisch, elektrisch)

Die in TP 2.2.1 durchgeführten simulativen Topologievergleiche verschiedener Antriebsstrangvarianten (Anzahl/Art der E-Antriebe) wurden durch die Berechnung und Bereitstellung von Wirkungsgradkennfeldern in verschiedenen Leistungsklassen unterstützt. Hierbei wurden unterschiedliche Maschinentypen (PSM/ASM) und –technologien (ASM mit Aluminium-/ und Kupferrotoren) betrachtet.

Aus den Leistungsanforderungen für das Gesamtfahrzeug wurden unter Berücksichtigung der Batterie- und Leistungselektronikrandbedingungen die konkreten Anforderungen an den Antrieb der Hinterachse abgeleitet. Für die Auslegung relevant sind hierbei im Wesentlichen das im Kurzzeitbetrieb geforderte Maximaldrehmoment im Eckpunkt der Maschinengrenzkurve sowie die Dauerleistungen für die Betriebspunkte „Steigfahrt“ und „Fahren mit maximaler Geschwindigkeit“ in der Ebene. Sowohl aus Gründen der Kostenminimierung als auch der Wirkungsgradmaximierung in zyklusrelevanten Teillastbetriebspunkten wurde der Schwerpunkt auf die Auslegung einer Asynchronmaschine mit Kupferrotor gelegt. Nach umfangreichen Parameterstudien zur Maximierung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Minimierung von Bauraum und Kosten wurde das Zieldesign auf eine ASM mit Außendurchmesser 180 mm und 180 mm Blechpaketlänge festgelegt. Die mechanische Festigkeit der Rotorkomponenten bei Schleuderdrehzahl (18.000/min) wurde durch 2D FE Berechnungen abgesichert. Nach dem Maschinenentwurf wurde ein Telemetriemuster zur Validierung der Simulation und für thermische Versuche aufgebaut. Weiterhin wurden mehrere Fahrzeugmuster aufgebaut und vermessen und für Versuche den Projektpartnern Porsche und Fraunhofer übergeben.

Für die messtechnische Untersuchung des ASM Telemetrie Musters wurde ein umfangreiches Prüfprogramm abgearbeitet. Für die Fahrzeugmuster wurde ein reduziertes Freigabe-Prüfprogramm durchgeführt.

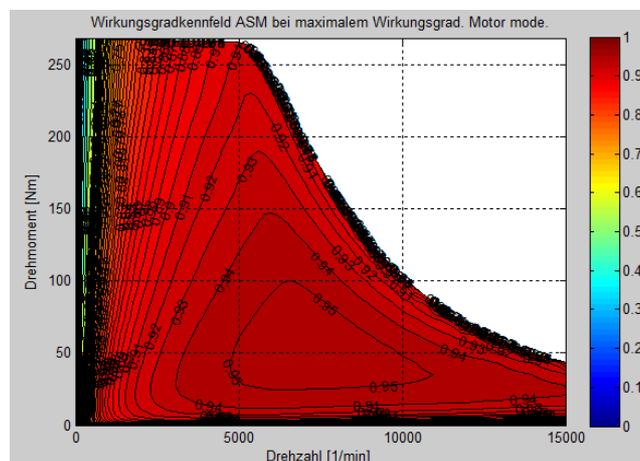


Abbildung 7 simuliertes Wirkungsgradkennfeld ASM

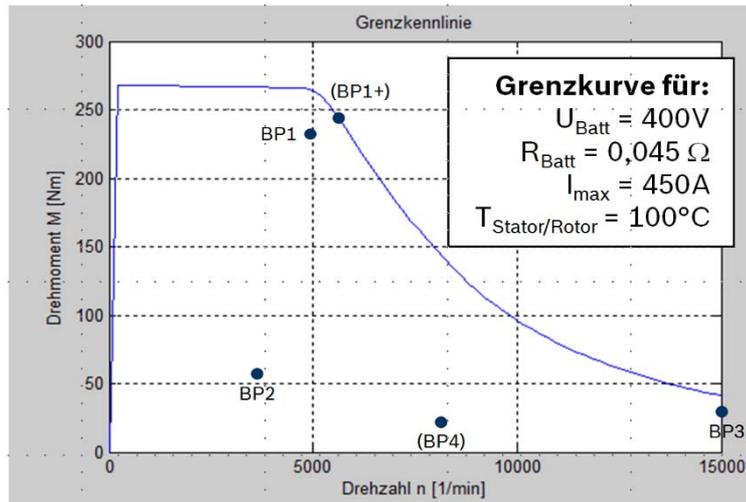


Abbildung 8 Auslegungsrelevante Betriebspunkte

Die Auslegungen für die Maschine(n) an der Vorderachse erfolgten an den beteiligten Hochschulen. Die Entwicklung der Antriebsmaschinen für die Vorderachse, i.W. PSM von RWTH Aachen (als Muster realisiert und für Fahrzeugeinsatz vorgesehen) und ASM von TU Braunschweig wurden auf mehreren gemeinsamen Workshops technisch begleitet, um die Vergleichbarkeit der Maschinenentwürfe untereinander hinsichtlich fertigungs- und materialtechnischer Randbedingungen sowie den Berechnungsgenauigkeiten sicherzustellen.

Um das thermische Verhalten der elektrischen Maschine auf der Hinterachse (ASM) zu bewerten, wurde ein thermisches Netzwerkmodell erstellt (siehe Abbildung 9). Mit diesem Modell können stationäre, aber auch dynamische, z.B. Zyklus abbildende Berechnungen durchgeführt werden. Die Geometrievorschlage aus der elektromagnetischen Auslegung der Asynchronmaschine (ASM) wurden implementiert. Mit dem Modell wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Kühlkonzepte zu bewerten.

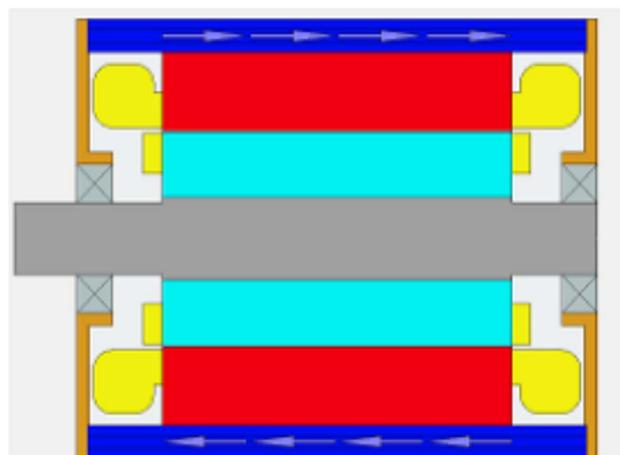


Abbildung 9 thermisches ASM Modell

Die Eingangsgrößen für das Modell sind:

- Geometrie + Materialien

- Wasserzulauftemperatur
- Wasserdurchsatz
- Umgebungstemperatur
- Drehzahl, Drehmoment
- Verluste

Prämissen:

- Umgebungstemperatur 40°C
- Wasser-Glykol (50/50)
- Durchfluss: 8 l/min bei 70°C
- $\Delta p=100$ mbar
- Keine Wärmezufuhr durch Getriebe
- Ausstehende Welle: A-Seite - Luft, B-Seite – geschlossen.

Mechanische Konstruktion der E-Maschinen

Auslegung und Festigkeitsuntersuchungen

Zur Absicherung der mechanischen Festigkeit der ASM-Rotoren wurden baugleiche Testrotoren einer Überdrehzahlprüfung bei einer Umgebungstemperatur von 150°C unterzogen. Dabei wurde einmalig und stufenweise ein Drehzahlbereich bis zum 1.2-fachen der Bemessungsdrehzahl durchfahren und die einzelnen Drehzahlbereiche jeweils 2 min gehalten. Die nachträgliche Begutachtung zeigte keine sichtbaren Veränderungen bis 18.000 U/min. Durch hochauflösende Röntgen-Computertomographie vor und nach der Prüfung sowie durch Gefügeuntersuchungen an einem Makroschliff konnten weitere Erkenntnisse über die prozessbedingten Defektmerkmale in den Kurzschlussringen sowie im Bereich der Anbindung zwischen Stabmaterial und Lamellenpaket gewonnen werden.

Die FE-Modellerstellung zur Berechnung der aus den Zentrifugalkräften resultierenden mechanischen Beanspruchungen wurde bzgl. der Geometrieerstellung, Kontaktdefinition und der Vernetzung parametrisiert und automatisiert, um umfangreichere Parameterstudien z.B. für eine Baukastenbetrachtung zu ermöglichen. Auf Basis dieses Modells können auch thermomechanische Analysen durchgeführt werden, um den fertigungsbedingten Eigenspannungszustand abzuschätzen.

Auf Basis der bisherigen Untersuchungen lassen sich zukünftige Schwerpunkte zur Absicherung der mechanischen Zuverlässigkeit und Lebensdauer von serientauglichen Anwendungen ableiten. Hauptaugenmerk sollte auf einer statistischen Absicherung zum Einfluss von fertigungsbedingten Poren und Inhomogenitäten liegen.

Konstruktion der E-Maschinen

Basierend auf der elektromagnetischen Auslegung von ASM (Bosch) und PSM (RWTH) wurde je eine Telemetriemaschine für Prüfstandsmessungen konstruiert und aufgebaut. Sie sind ausgestattet mit 40 Temperatursensoren (Typ K). Im Rotor befindet sich ein Telemetriesender mit 8 Kanälen, so dass auch Temperaturen auf dem drehenden Rotor ausgewertet werden können.

Die ASM hat zusätzlich am Lagerschild ein Stützlager zur Abstützung und Fixierung der Achswellen. Die Festigkeit wurde mit FEM-Rechnungen nachgewiesen. Der Rotor ist in Kupfer ausgeführt. Ein Schleuderversuch mit 18.000 U/min bei 150°C wurde ohne erkennbaren Schaden bestanden.

Test und Validierung auf Prüfstand

Im Vorhaben werden unterschiedliche Maschinentypen und Steuerungskonzepte auf dem Prüfstand getestet. Beide Maschinentypen ASM und PSM werden bezüglich thermischer und elektrischer Verluste vermessen. Des Weiteren sollen die zur Ansteuerung notwendigen Algorithmen validiert werden.

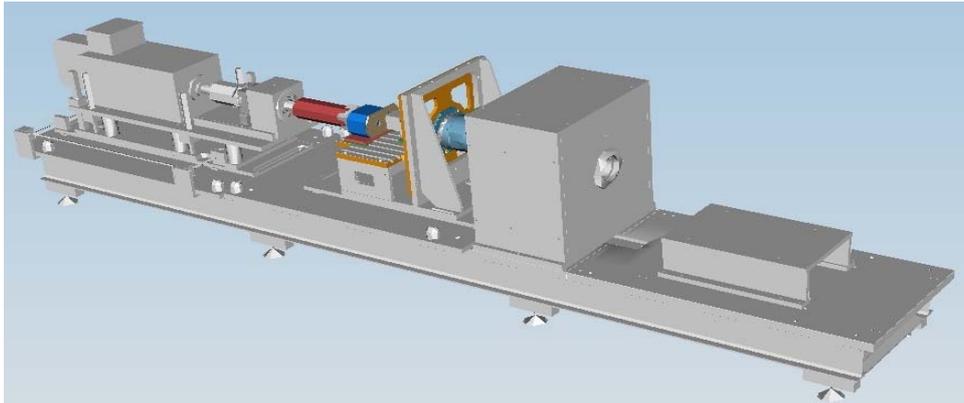


Abbildung 10 Prüfstand für elektrische Maschinen

Komponenten und Aufbau:

- Variabler Antriebstisch mit Lastmaschine und 3 verstellbaren Achsen. (60 KW 500 Nm Auslegung Raddrehzahlen).
- Variabler Prüftisch mit Prüfstandsgetriebe und E-Maschine verstellbar und 180° drehbar. Wahlweise Kopplung an Lastmaschine möglich.
- Rotierende Schwungmasse gekoppelt mit alternativer Lastmaschine (60 KW 750 Nm Raddrehzahlen)
- Batterie Emulator 120 KW, 800V, 600A
- Prozessthermostat für E-Maschine 7,5 KW -40°C bis +120°C.

Steuerungskonzept:

Die Implementierung der kompletten Prüfstandssteuerung erfolgt zuerst in Matlab/Simulink, um eine hohe Flexibilität zu gewährleisten. Anhand ebenfalls in Matlab/Simulink entwickelter dynamischer E-Maschinen Regelkonzepte wird eine Gesamtimplementierung direkt auf dem Maschinenprüfstand möglich. Ein dSpace Multiprozessor System mit FPGA-Board zur PWM-Generierung sowie gekoppeltem Laborumrichter übernimmt die kompilierten Modelle.

Die Inbetriebnahme und Validierung der Hardware-in-the-Loop (HIL) Umgebung erfolgte bereits im Gesamtsystem. Die Bestimmung des Maschinenwirkungsgrads erfolgt mit Leistungsmessgerät und mechanischer Drehzahl/Drehmoment Messwelle.



Abbildung 11 elektrische Maschine auf Prüfbank



Messtechnik

Leerlauf und Kurzschlusskennlinien

Die Leerlauf und Kurzschlussmessungen liefern den Abgleich von wesentlichen Maschinenparametern in Simulation.

Abbildung 12 zeigen exemplarisch die gemessenen und gerechneten Leerlauf- und Kurzschlusskennlinien als wichtige Indikatoren für die Qualität der Auslegungsparameter. In beiden Fällen zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen.

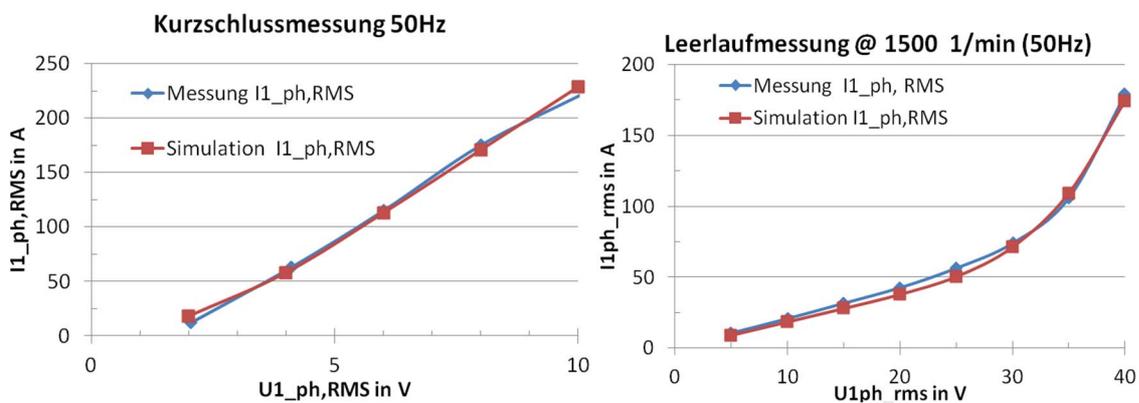


Abbildung 12 Kurzschlussmessung (Rotor blockiert) und Leerlaufmessung (Magnetisierungstrom) bei 50Hz, Vergleich Rechnung/Messung

Lastmessungen / Grenzkennlinie

Im weiteren Verlauf werden die Grenzkennlinien verglichen. Die simulierte Grenzkurve für das Drehmoment wurde messtechnisch leicht unterschritten. Eine Ursache dafür ist, dass in der Simulation ein optimistischer Eisenstapelfaktor angenommen wurde. Bei Verwendung von dünnen Blechen reduziert sich Stapelfaktor auf 94%. Dadurch reduziert sich das Maximalmoment in der Simulation von 267 Nm auf 257 Nm (siehe Abbildung 13).

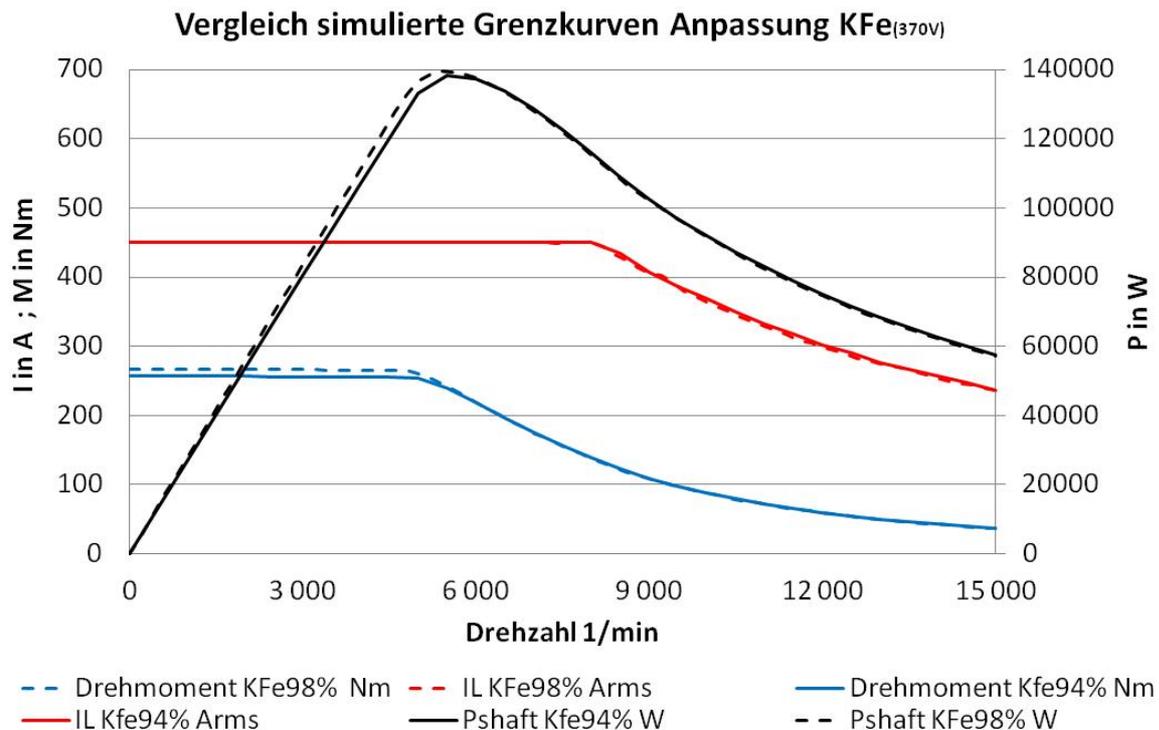


Abbildung 13 Vergleich Einfluss Stapelfaktor (Simulation)

Gemessene Grenzkennlinie ohne Strombegrenzung

Messungen mit einem Reglerstand ohne Phasenstrombegrenzung zeigen (Abbildung 14), dass der Motor bis 5150 1/min 241 Nm mit 445 A_{rms} erreicht (130 kW). Ab dem Eckpunkt wurde gegenüber der Simulation mit reduziertem Phasenstrom gefahren, was die Abweichung zwischen Simulation und Messung in diesem Bereich erklärt. Bei einer Drehzahl von 10.000 1/min werden 100Nm mit 414 A_{rms} erreicht (100 kW).

Diese Ergebnisse zeigen, dass bis zum Eckpunkt ein geringer Abstand zur Simulation vorhanden ist. Mögliche Erklärungen für die Lücke von <6% Drehmoment im Eckpunkt sind ein um 1% zu gering gestellter Strom, der notwendige Abstand von der Spannungsgrenze sowie durch die Taktung nicht exakt sinusförmige Ströme. Diese Effekte lassen sich nicht vollständig in der Simulation abbilden.

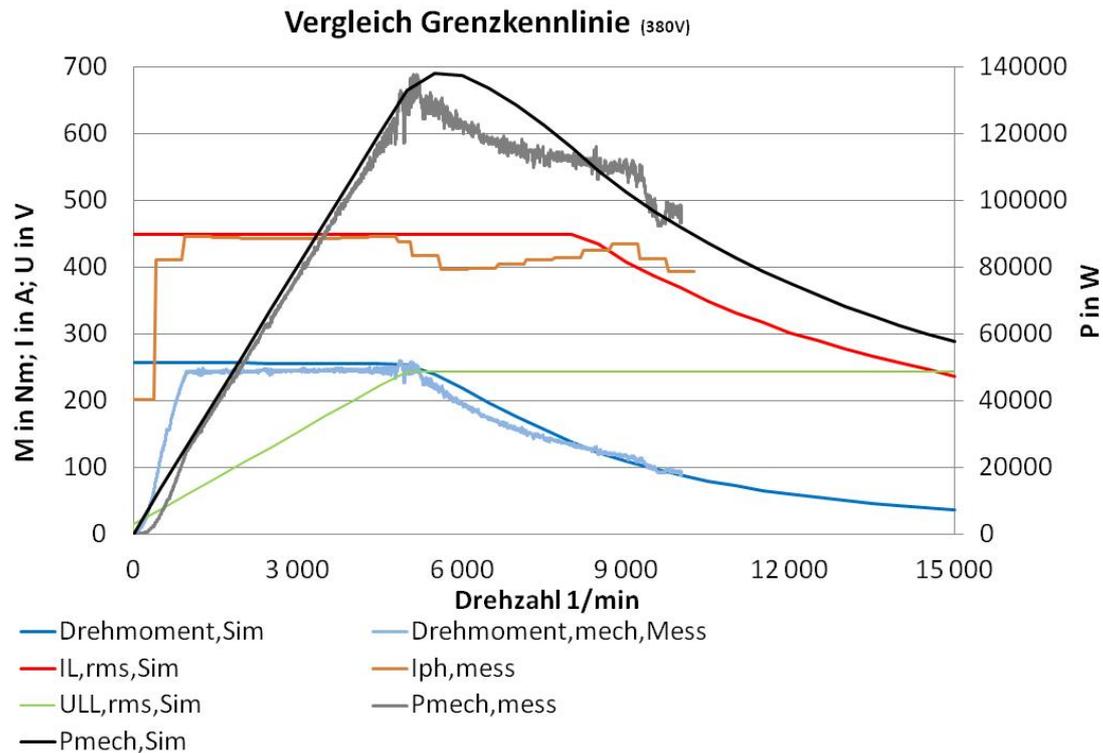


Abbildung 14 Vergleich Grenzkennlinie Messung und Simulation

Teillastmessung / Kennfelder

Mit dem Vergleich der Wirkungsgrade zwischen Simulation und Messung werden die Eisenverlustfaktoren abgeglichen. Nach dem Abgleich wird im gemessenen Bereich eine gute Übereinstimmung erreicht.

N	M	Messung	Simulation
3000	20.2	94.1	94.1
3001	40.5	94.1	94.3
3001	59.8	93.8	94
3001	79.9	92.9	93.5
6000	20.0	94.7	94.5
6000	39.4	95.4	95.4
9000	19.9	94.3	94

Tabelle 3 Wirkungsgrad bei 350V@35°C
Vergleich Messung/Simulation

Fazit

Insgesamt liefern die Messungen des Motors eine gute Übereinstimmung mit der Simulation.

Validierung des thermischen Modells

Mit Hilfe des validierten thermischen ASM-Modells können die Wirkungsgrade der elektrischen Maschine richtig ausgewiesen und die Dauergrenzzlinie (Dauerbetrieb) der E-Maschine berechnet werden (siehe Abbildung 15). Zudem können aus dem Modell in Zusammenarbeit mit der elektromagnetischen Auslegung und Konstruktion Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

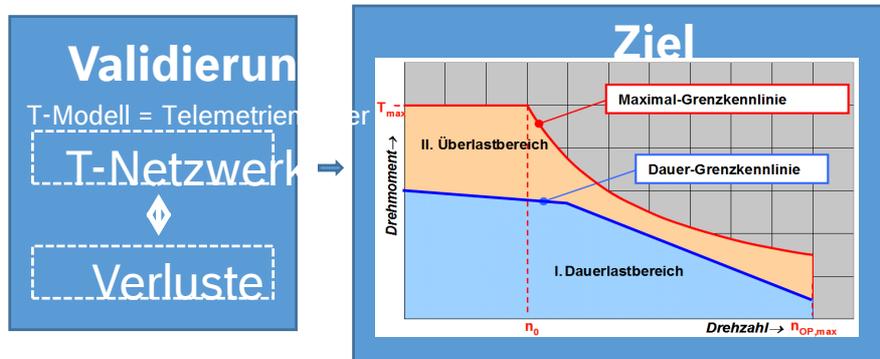


Abbildung 15 Workflow Validierung zur Berechnung Dauergrenzzlinie

Für die Validierung des thermischen Modells wurden die Messungen wie folgt definiert:

- ➔ Vorgabe: M , n , V_{Wasser} , T_{Wasser_Ein}
- ➔ Messung: T_{Wasser_Aus} , T_{ASM} ,

wobei M das Drehmoment in Nm, n die Drehzahl in rpm, V_{Wasser} der Wasserdurchfluss in l/min, T_{Wasser_Ein} und T_{Wasser_Aus} die Temperatur in °C von Kühlwasser am Eingang und Ausgang der ASM, T_{ASM} die Temperatur in °C in der ASM, gemessen an verschiedenen Stellen – auch an rotierenden Teilen mittels Telemetrie (siehe Abbildung 16) – sind.



Abbildung 16 Telemetriemuster der ASM

Die Messungen wurden konzipiert, um folgende Zwecke zu erfüllen:

- I. Plausibilisieren von Sensoren
- II. Validierung des T-Netzwerks
- III. Validierung von Verlusten
- IV. Validierung vom gesamten Modell

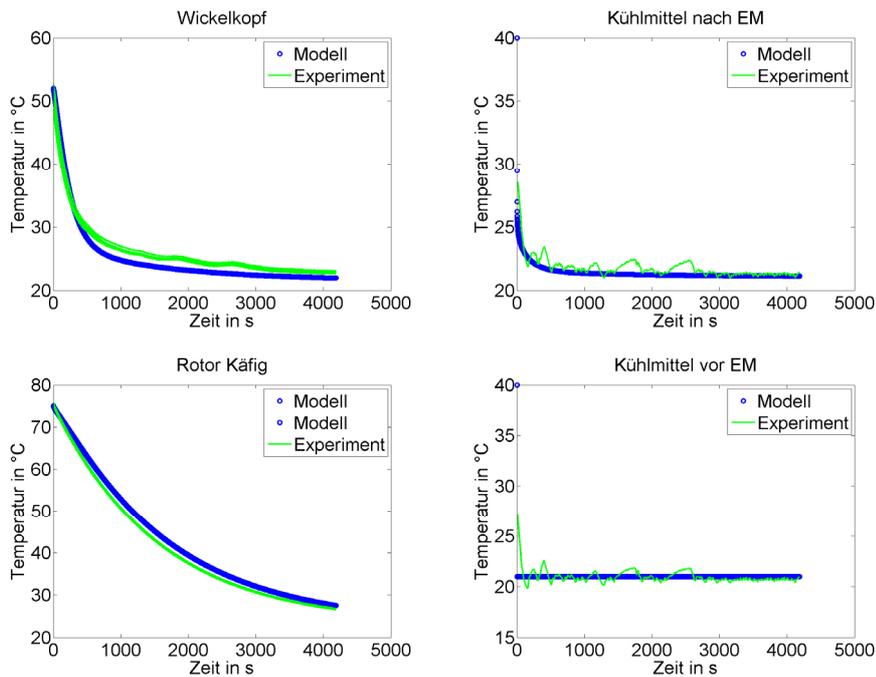


Abbildung 17 Vergleich Modell-Experiment für die Abkühlung von ASM bei n=2000 rpm

Die Validierung des thermischen Modells hat gezeigt, dass das thermische Netzwerk hinreichend genau das Verhalten der ASM am Prüfstand beschreibt (siehe Abbildung 17). Allerdings hängen die Ergebnisse der thermischen Simulation der EM stark von der Berechnung der thermischen Verluste ab, welche durch den Regelungszustand wesentlich beeinflusst sein können. Desweiteren konnte festgestellt werden, dass die äußeren Randbedingungen an der Systemgrenze, wie z.B. die Temperatur an der Welle zwischen EM und Getriebe, entscheidenden Einfluss haben, so dass die Übertragung der Ergebnisse vom Prüfstand auf Fahrzeug mit Unsicherheiten behaftet ist.

Nach erfolgreich abgeschlossen Validierung könnten die Dauergrenzen für den Prüfstandmuster mit dem Modell berechnet werden.

2.4. Leistungselektronik

Bewertung Schaltungskonzepte

Gemeinsam mit Infineon wurden im Rahmen mehrere Workshops aus einer Vielzahl von Invertertopologien sieben potentiell zielführende Varianten ausgewählt. Zur Verlustanalyse wurde ein Mosfet-Modell unter Simulink erstellt, welches die Schalt- die Durchlassverluste in Abhängigkeit der berechneten Temperatur berücksichtigt.

Anforderung und Spezifikation

Gemeinsam mit den Konsortialpartnern wurden die bei Infineon und Bosch untersuchten Topologien auf Basis einer Pugh-Matrix verglichen und ausgewertet. Diese beinhaltet unter anderem die globalen TP2-Anforderungen Kosten, Wirkungsgrad und Modularität sowie Bauraum und Verfügbarkeit.

Auswertung		Zwischenkreis	#	Summe	Abweichung
B6	IGBT	650	1	29,95	0,0%
B6	IGBT	1200	3	28,27	-5,6%
CHB	MOSFET	240	8	19,64	-34,4%
NPC3	IGBT	400	4	27,58	-7,9%
NPC3	IGBT	650	2	28,49	-4,9%
NPC7	MOSFET	480	6	25,89	-13,6%
MP5	IGBT	650	5	27,34	-8,7%
MP7	IGBT	650	7	25,85	-13,7%

Tabelle 4 Ergebnis Topologieauswahl Inverterschaltungskonzepte

Die Entscheidung fiel auf den NPC (Neutral Point Clamped) 3-Level-NPC-Inverter (Abbildung 18).

Design, Auslegung, Konstruktion der Leistungselektronik

Mehrere Prüfstandsmuster des NPC Inverters wurden bei Infineon aufgebaut. Bosch unterstützt den Aufbau durch die Definition von Schnittstellen, Fehlerbehandlung, Zwischenkreisauslegung und Balancing der Zwischenkreiskondensatoren sowie von Anforderungen an den Kühler.

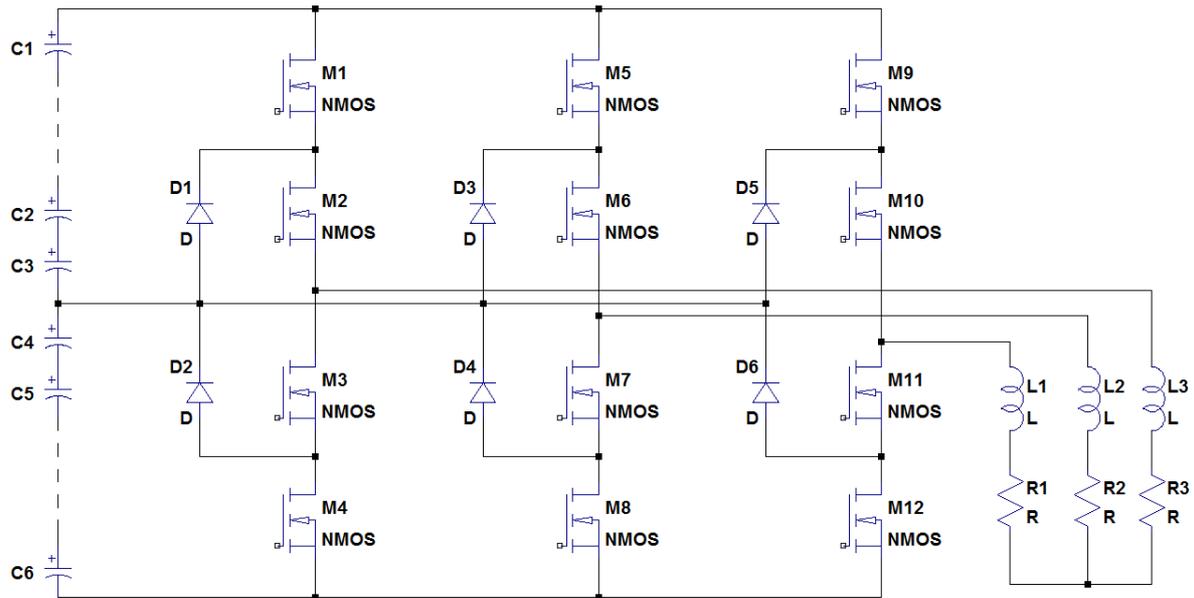


Abbildung 18 NPC3, Neutral Point Clamped Diode Multilevel Inverter

Entwicklung Ansteuerverfahren

In Matlab/Simulink wurden mehrere Modulationsverfahren für den 3-Level-Inverter entwickelt und mittels Simulation überprüft.

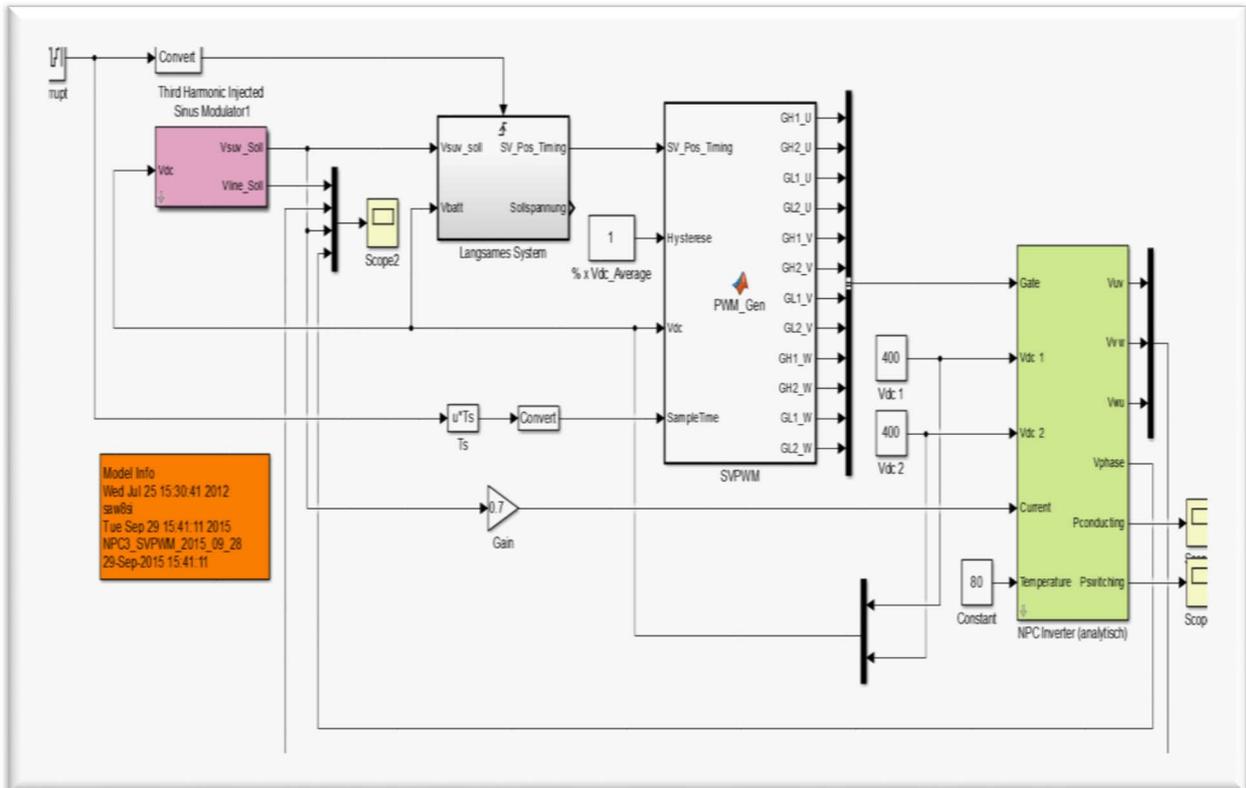


Abbildung 19 Matlab/Simulink Modell

Anschließend wurde auf Basis des vorliegenden Simulationsmodells der Mikrocontroller TriCore AURIX TC277TE in C unter Verwendung von eclipse programmiert. Die Software-Architektur wurde gemeinsam mit Infineon definiert. Die embedded Software lief unter ein zeitgesteuertes Minibetriebssystem ohne Scheduler. Der Softwareablauf enthält folgende Schritte:

- Auslesen der Sollwerte
- Auslesen der Zwischenkreisspannung
- Berechnung des Raumzeigers
- Bestimmung des Main-Sektors
- Berechnung der Schaltzeiten der aktiven und passiven Vektoren
- Bestimmung der Schaltmuster auf Basis der Zwischenkreisspannungen und sonstigen Regelgrößen
- Berechnung der Tastverhältnisse
- Zuweisung der Tastverhältnisse auf die IGBT-Schaltelemente

Steuerung und Regelung der elektrischen Maschinen

Die im Rahmen des Vorhabens betrachteten zwei Maschinentypen – permanenterregte Synchronmaschinen (PSM bzw. PMSM) sowie Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufer (ASM) – werden, in Anbetracht des innerhalb des Vorhabens verfolgten Primärziels Effizienz und unter Berücksichtigung des Sekundärziels Fahrperformance, mit einer Feldorientierten Regelung (FOR) betrieben. Zwar bestehen einige grundsätzliche Gemeinsamkeiten bei der Feldorientierten Regelung für PSM und der Feldorientierten Regelung für ASM, dennoch überwiegen die Unterschiede. Insgesamt ist hervorzuheben, dass im Rahmen des Vorhabens je Maschinentyp eine eigene vollständige Ansteuerungssoftware für die aufgebauten Aggregateträger entwickelt bzw. appliziert wurde.

Strukturell sind sich Feldorientierte Regelungen von PSM und ASM ähnlich. Gemeinsam ist, dass aus dem geforderten Soll-Moment bei der aktuellen Drehzahl Sollwerte für eine unterlagerte Regelung der elektromagnetischen Zustandsgrößen bestimmt werden und dass diese Zustandsgrößen in einem rotierenden orthogonalen Koordinatensystem, aufgespannt durch die sogenannten feldorientierten dq-Koordinaten, beschrieben werden. Allerdings ist bei ASM sowohl der Strom, als auch der magnetische Fluss zu regeln (s. Abbildung 1), während bei PSM nur eine Stromregelung erforderlich ist. Zudem entspricht das feldorientierte Koordinatensystem bei PSM einem rotorfesten Koordinatensystem, das sich synchron mit der Drehzahl bewegt. Bei ASM hingegen beziehen sich die feldorientierten dq-Koordinaten auf den Raumzeiger des magnetischen Rotorflusses und rotieren im motorischen bzw. generatorischen Betrieb folglich schneller bzw. langsamer, als der Rotor.

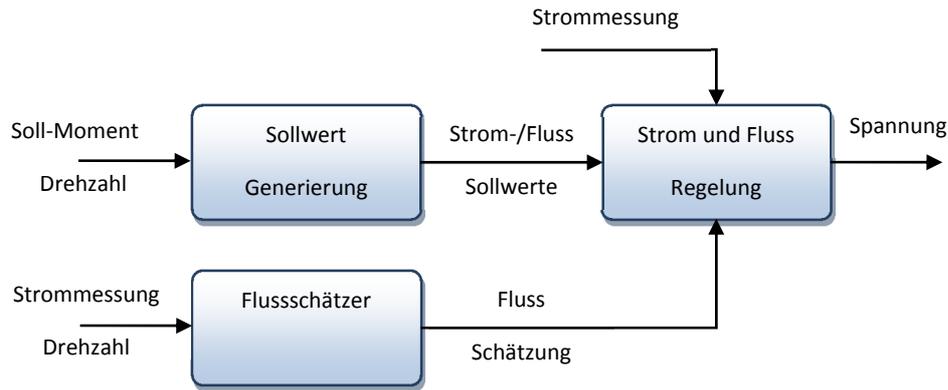


Abbildung 20 Strukturbild der feldorientierten Regelung von Asynchronmaschinen. Der Block Flussschätzer entfällt bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen.

Entwicklung der Regelungsalgorithmen

Da für PSM bereits hocheffiziente Regelungen vorhanden sind, konzentriert sich die Entwicklung neuer Algorithmen auf die ASM. Zuerst wurde das klassische Konzept der Feldorientierte Regelungen für ASM untersucht. Dieses besteht, in diversen Varianten, aus einer Kaskade eines PID-Reglers zur Flussregelung und zwei PID-Reglern zur Stromregelung mit einer statischen Entkopplung. Die Ermittlung des magnetischen Flusses erfolgt typischerweise modellbasiert, z. B. mit dem sogenannten Strommodell, um auf zusätzliche Sensorik verzichten zu können. Dieses Konzept ist weit verbreitet und zählt zum Standard, nicht zuletzt aufgrund der nachvollziehbaren Struktur und einer einfachen Implementierbarkeit. Allerdings gerät die Stromregelung aufgrund der vernachlässigten dynamischen Kopplungen in höchstdynamischen Situationen an ihre Grenzen. Typischerweise wird daher eine Filterung des Soll-Moments vorgenommen, was als Konsequenz Performanceeinschränkungen mit sich bringt. Ein weiterer Nachteil des klassischen Konzepts ist das Erfordernis einer konsistenten Parametrierung von drei PID-Reglern und die geeignete Auslegung hinsichtlich Stellgrößenbeschränkungen. Ferner weist die modellgestützte Flussschätzung eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Messfehlern und Parameterunsicherheiten auf.

Zur Entwicklung neuer Algorithmen wurde direkt an den identifizierten Nachteilen der klassischen Verfahren angesetzt. Zunächst wurde eine kombinierte Fluss- und Stromregelung entwickelt. Hierzu wurden moderne Methoden der Regelungstechnik eingesetzt, u. a. wird unter Ausnutzung der differentiellen Flachheit eine dynamische Inversion in Kombination mit einer Mehrgrößen-IMC-Struktur eingesetzt. Zwar ist die Implementierung des entwickelten Reglers aufwendiger, aber die Parametrierung kann auf einen einzigen Parameter reduziert werden.

Im simulativen Vergleich zeigen sich beide Konzepte als weitgehend gleichwertig; Vorausgesetzt die Regelungsparameter sind gut eingestellt. Bei schlechter Parametrierung zeigt das neu entwickelte Konzept diesbezüglich eine geringere Sensitivität und insgesamt eine bessere Performance.

Neben der reinen Maschinenansteuerung wurde auch das Zusammenspiel im Gesamtfahrzeugverbund untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass in gewissen Situationen kritische Schwingungen im Antriebstrang auftreten können. Hierzu wurden Konzepte erarbeitet, um einerseits die Anregung dieser Schwingungen zu vermeiden und andererseits ggf. aktiv dämpfend einzugreifen.

Implementierung der Regelungsalgorithmen

Zunächst erfolgte die Implementierung der Regelungsalgorithmen an einem Rapid Prototyping System in MATLAB/Simulink, um verschiedene Konzepte schnell zu evaluieren. Anhand ebenfalls entwickelter

dynamischer Maschinenmodelle kann diese Umgebung zu SIL-Simulationen genutzt werden. Ferner kann diese Implementierung direkt auf dem Bosch-Maschinenprüfstand zur Ansteuerung der ASM genutzt werden. Dieser ist mit zwei dSpace-Systemen, einem FPGA-Board zur PWM-Generierung und einem Laborumrichter ausgestattet. Bis die ersten Muster der Fahrzeugmaschinen zur Verfügung standen erfolgten Tests mit einer 40kW ASM. Die Implementierung auf der Zielhardware wurde, getrieben durch den ambitionierten Zeitplan, parallel verfolgt. Die Programmierung der Fahrzeugsoftware erfolgt in ASCET.

Anschließend erfolgte eine initiale Bedatung der Softwarefunktionen mithilfe von Untersuchungen an Maschinen-Prüfständen. Aufgrund der hohen Leistung der Maschinen, die die Leistungsfähigkeit vieler üblicher Prüfstände für Traktionsmaschinen übersteigt, mussten die Untersuchungen auf verschiedenen Prüfständen erfolgen. So konnte der Bedarf für die sehr kostenintensiven Hochleistungsprüfstände minimiert werden. Hervorzuheben ist hier die Bereitschaft des Projektpartners Porsche, einen der Prüfstände der Porsche Engineering Group für mehrere Wochen bereitzustellen.

Bei den Versuchen wurden zunächst spezielle Maschinen-Prototypen eingesetzt, die mit umfangreicher Sensorik sowie einem Telemetrie-System ausgestattet sind. Damit bieten sie Zugriff auf den thermischen Zustand der jeweiligen Maschine. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Temperatur des Rotors. Diese wichtige Einflussgröße wirkt sich bei beiden Maschinen-Typen signifikant auf die Performance aus, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen: So steht bei der PSM die Temperaturabhängigkeit der Permanentmagnete im Vordergrund, sowie die Gefahr deren Entmagnetisierung bei Übertemperatur. Bei der ASM hingegen ist der Einfluss des temperaturabhängigen elektrischen Rotorwiderstands von Bedeutung für die Genauigkeit der Momentensteuerung und den Wirkungsgrad. Ferner führen die hohen Ströme in den Stäben und Ringen des Rotors der ASM bei hohen Leistungen zu hohen Verlustleistungen und einer entsprechend starken Erwärmung des Rotors. Daher ist für den sicheren Betrieb im Fahrzeug die Entwicklung und Implementierung einer geeigneten Leistungsbegrenzung erforderlich.

Ausgehend von der Initialbedatung wurden die Parameterwerte der ersten Version der im Fahrzeug zu verwendenden Softwarestände definiert. Diese Softwarestände wurden mit den Fahrzeugmaschinen, die über kein Telemetrie-System verfügen, an Prüfständen getestet und die Funktionsfähigkeit wurde validiert. Im Rahmen der Applikation wurden dieser Parameterwerte mithilfe von Fahrzeugversuchen angepasst und optimiert.

Zusammenfassung und finaler Stand

Aus der gewählten Fahrzeugtopologie folgt, dass vor allem die PSM von Bedeutung für die Gesamtfahrzeuggewinnung im Fahrzyklus ist, während die Aufgabe der als Boost-Maschine ausgelegten kostengünstigen ASM darin besteht, im Bedarfsfall zusätzliche Leistung bereitzustellen. Da für letztere zum Start des Vorhabens keine Basisfahrzeugsoftware zur Verfügung stand, lag die wesentliche Herausforderung in der Umsetzung, Implementierung und Applikation einer fahrzeugtauglichen Ansteuerungssoftware für die ASM in den e-generation Aggregateträgern. Der fehlerfreie Abschluss der von Porsche durchgeführten Dauerlauf-tests unterstreicht, dass diese Herausforderung erfolgreich gelöst wurde.

Test und Validierung auf Prüfstand

Leistungselektronik für Fahrzeugmaschinen

Für den Prüfstandstest der neu ausgelegten ASM und PSM sowie für den Einsatz im Fahrzeug wird der Bosch Inverter INVCON Gen2.3 eingesetzt. Im Rahmen der Vermessung der beiden Maschinentypen

wurde das Deratingverhalten sowohl der Maschinen als auch der Leistungselektronik appliziert. Für jede PSM wurde der optimale Winkel der Lagesensorik am Prüfstand ermittelt.

Die CAN-Schnittstelle sowie der Netzwerkmanager wurde nach Vorgaben von Porsche angepasst.

Vermessung Innovative Leistungselektronik am Prüfstand aus TP2.4.1 bis 2.4.3

Zum Funktionsnachweis der Ansteuerverfahren wurde der 3-Level-Inverter gemeinsam mit der in TP2 entwickelten Asynchronmaschine auf dem Antriebsprüfstand in Betrieb genommen. Dabei wurden im gesteuerten Betrieb einzelne Arbeitspunkte bei drehender Maschine angefahren sowie Messsignale aufgenommen.

2.5. Test/Aufbau/Integration Antriebsstrang

Test/Validierung am Simulationsmodell

Für die ASM wurde eine Schwerpunktanalyse durchgeführt. Eine der resultierenden Aufgaben war die Entwicklung eines thermischen Modells der ASM. Dieses Modell wurde am Prüfstand validiert (siehe TP 2.3.6). Mit diesem Modell lassen sich dynamische Effekte im Erwärmungsverhalten der Maschine in einer Systemsimulation analysieren.

Fahrzeugmessungen

Ziel der Vermessung des Fahrzeugs ist es die neu entwickelten Antriebskomponenten im realen Fahrbetrieb zu testen. Dazu wurden Daten von der Rolle (Porsche), von abgesteckten Teststrecken und aus dem öffentlichen Straßenverkehr aufgenommen und ausgewertet. Der Testplan enthält Messfahrten aus dem mit Porsche abgestimmten Antriebslastenheft, auf vordefinierten Strecken (z.B. Stuttgart Zyklus) sowie selbstdefinierte spezifische Tests. Bewertet wurden grundsätzlich der Fahrzeugverbrauch sowie das Deratingverhalten.

Ziel	Rolle	Erprobungsbahn	Strasse
Verbrauch	CADC ✓		Stuttgart Zyklus ✓ Autobahn ✓ Konstantfahrt ✓ AMS EV-Zyklus ✓
Derating		0..100km/h ✓ 0..160km/h ✓	Bergfahrten ✓ Autobahn ✓
Sonstiges		Tip-In/Tip-out ✓ NVH ✓	Anfahren am Berg ✓

Exemplarisch werden hier Einzelergebnisse vorgestellt.

CADC-Rollenmessungen

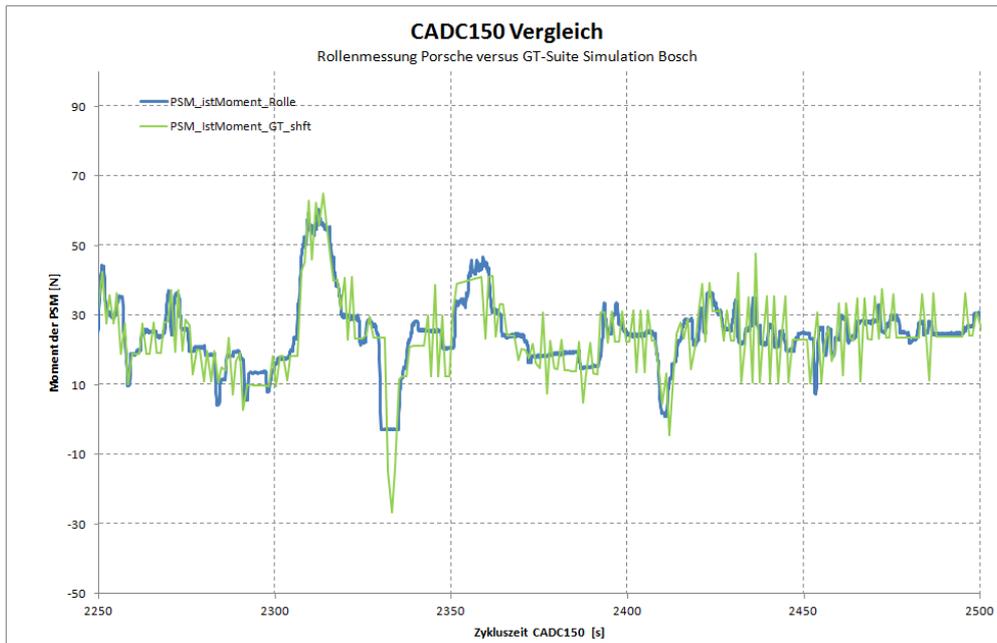


Abbildung 21 Ausschnitt aus Vergleich Messdaten/Simulationsdaten

Der Abgleich der Messdaten aus dem Rollenprüfstand (blau) mit den im Systemsimulationsmodell berechneten Werten (grün) ergab eine im Mittel gute Übereinstimmung bezüglich des Momentes zwischen Messung und Simulation.

Stuttgart Zyklus

Der Stuttgart Zyklus ist ein definierter Strassenzyklus, welcher sich aus Anteilen auf der Autobahn, auf der Landstraße und in der Stadt zusammensetzt.

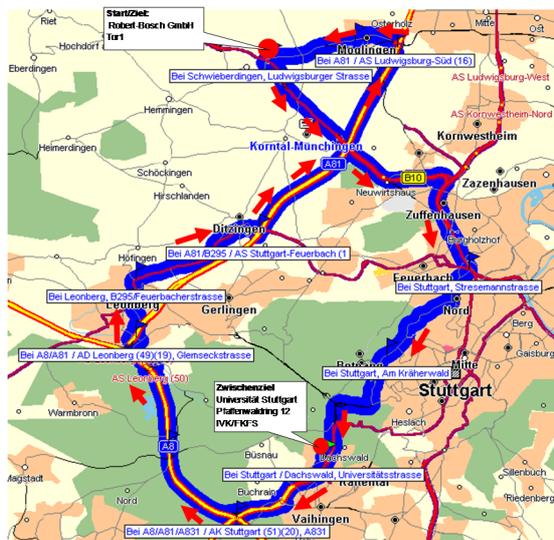


Abbildung 22 Stuttgart Zyklus

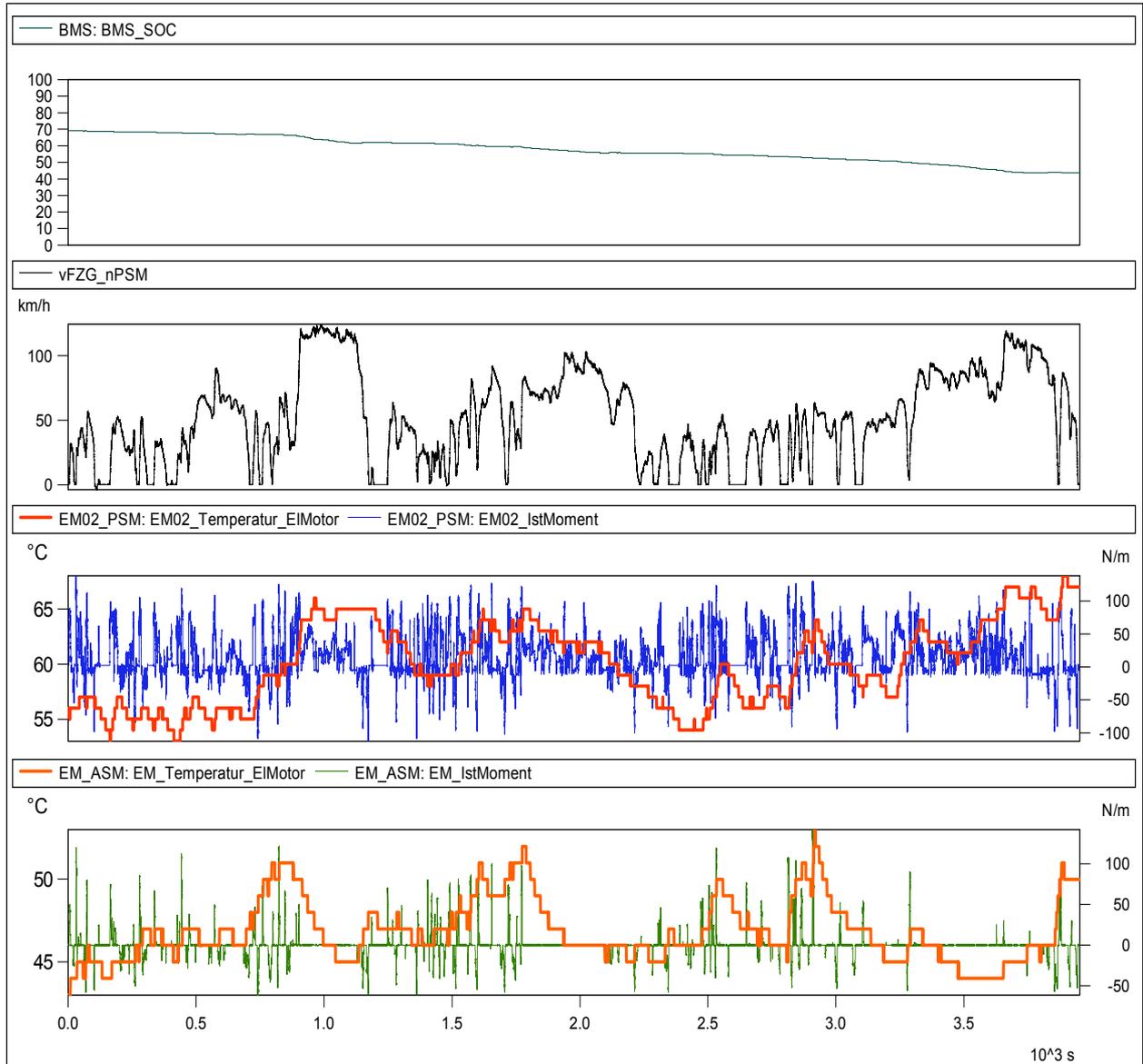


Abbildung 23 Übersicht Messdaten Stuttgart Zyklus

Das mit ökonomischen Fahrstil bewegte Fahrzeug verbrauchte durchschnittlich 20,9kWh/100km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 55,9km/h. Dabei wurden 3,8kWh/100km rekuperiert. Die Temperaturen der Antriebsmaschinen sind dabei auf einem sehr niedrigen Niveau über der Außentemperatur von 30°C.

Deratingverhalten

Ziel dieses Tests ist es die Leistungsreduktion der Antriebskomponenten aufgrund Temperaturabregelung unter Extrembedingungen zu untersuchen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten wird dieser Test auf der Erprobungsbahn durchgeführt. Dabei werden in direkter Folge so viele Beschleunigungsvorgänge 0..100km/h mit anschließendem Rekuperationsbremsen durchgeführt, bis die Batterie leer war. Dies war bezüglich Derating der anspruchvollste Test mit extremer thermischer Beanspruchung der Antriebskomponenten.

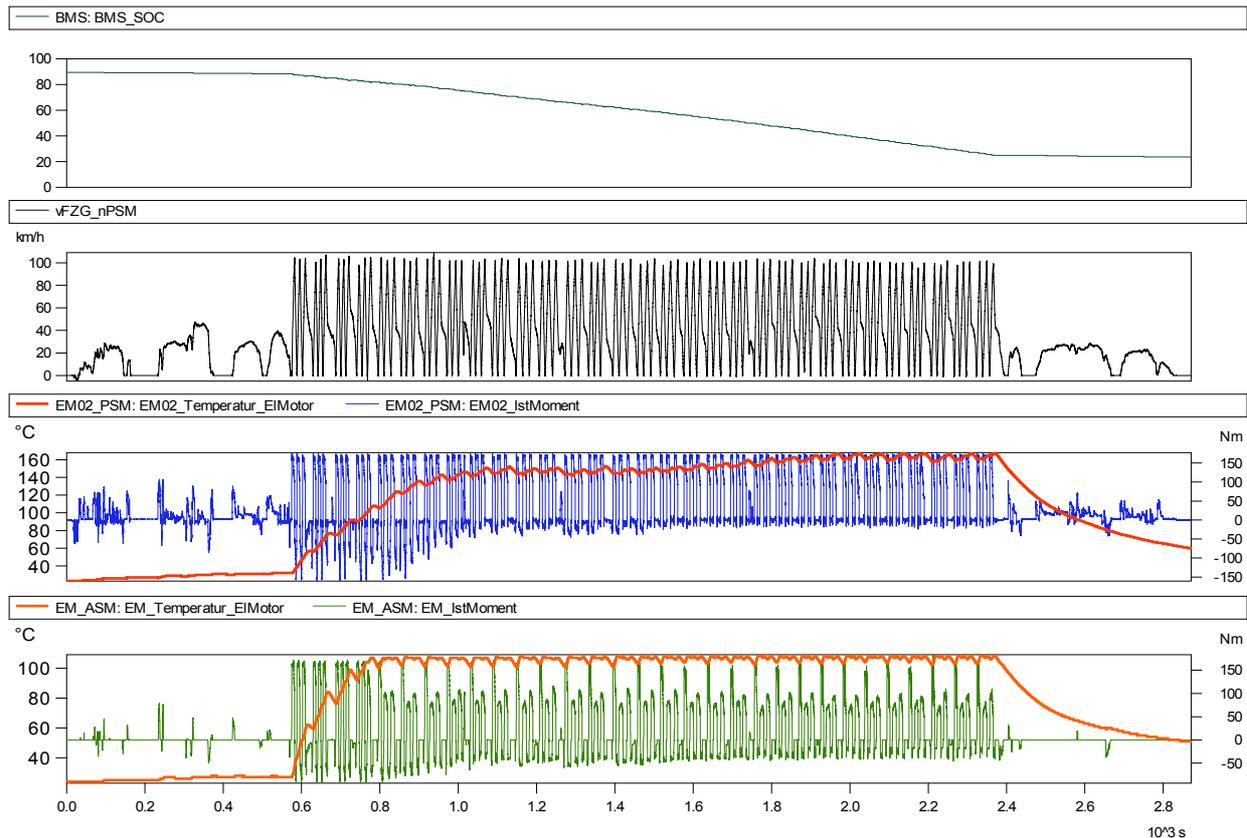


Abbildung 24 Übersicht Beschleunigungstest

Nach 93 Beschleunigungsvorgängen und einer zurückgelegten Strecke von 28,7km wurde die Batterie nahezu vollständig entladen. Der Durchschnittsverbrauch betrug dabei enorme 90,5kWh/100km. Bei der PSM und den Invertern trat dabei keinerlei Temperaturderating auf. Die im Projekt entwickelte PSM ist daher die ideale Maschine für Anwendungen mit hohem Dauerleistungsbedarf.

Nach 11 Beschleunigungsvorgängen wird die ASM in Ihrer Leistung soweit reduziert, dass ein weiterer Temperaturanstieg sicher verhindert wird. Durch eine Optimierung der Rotorkühlung gibt es Potential die Dauerleistungsfähigkeit nachhaltig zu verbessern.

Integration Antriebsstrangkomponenten

In enger Abstimmung mit Porsche wurden die Schnittstellen der Leistungselektroniken, der Verkabelung und der elektrischen Maschinen zum Getriebe und zum Aggregate-Träger festgelegt. Der

Aggregate-Träger wurde mit den von Bosch bereitgestellten Komponenten erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen.

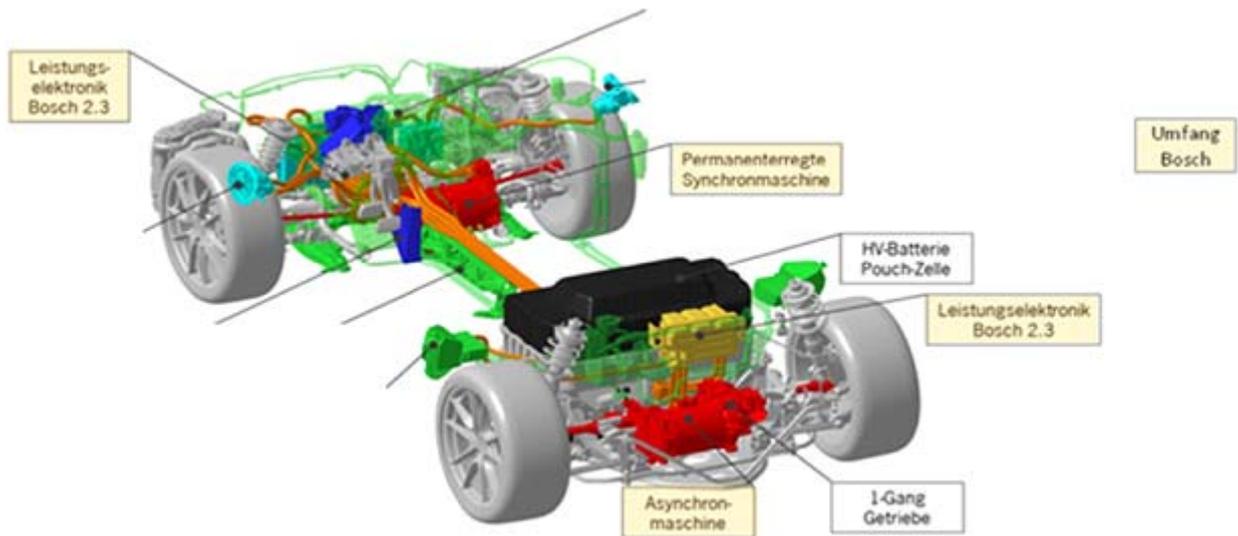


Abbildung 25 Package e-Boxster

Inbetriebnahme/Erprobung auf Prüfstand

Prüfstand zum Test elektrischer Maschinen und Komponenten

Im Vorhaben werden unterschiedliche Maschinentypen und Steuerungskonzepte auf dem Prüfstand getestet. Die im Teilprojekt 2.2 ausgewählten Maschinentypen PSM und ASM werden bezüglich thermischer und elektrischer Verluste vermessen. Des Weiteren sollen die zur Ansteuerung notwendigen Algorithmen validiert werden.

Steuerungskonzept

Die Implementierung der kompletten Prüfstands Steuerung erfolgt zuerst in Matlab/Simulink, um eine hohe Flexibilität zu gewährleisten. Anhand ebenfalls in Matlab/Simulink entwickelter dynamischer E-Maschinen Regelkonzepte wird eine Gesamt-Implementierung direkt auf dem Maschinenprüfstand möglich. Ein dSpace Multiprozessor System mit FPGA-Board zur PWM-Generierung sowie gekoppeltem Laborumrichter übernimmt die kompilierten Modelle.

Inbetriebnahme und Grundvermessung der Telemetrie Asynchronmaschine

Die Telemetriemaschine ist mit Sensoren in Rotor und Stator ausgestattet. Die Applikation der Parameter erfolgt auf Basis der Maschinenauslegung. Über die Ergänzung von Temperaturmesskanälen werden die Messwerte in die Maschinenregelung zurückgeführt. Die Messungen bestätigen die gerechneten Parameter der Simulation. Der Aufbau dient gleichzeitig der Entwicklung und Validierung einer rotortemperaturabhängigen Leistungsbeschränkung.

Der Prüfstands Aufbau ist auf kurze Umrüstzeiten von Laborinverter zur Fahrzeughardware und zurück optimiert. Die prüfstandseitige Toolchain für den Betrieb mit der Zielhardware INVCON Gen2.3 wurde ergänzt und erfolgreich betrieben. Die dafür in ASCET umgesetzte Software konnte validiert werden. Eine Grundapplikation als Basis für die erste Inbetriebnahme im Fahrzeug ist erfolgt. Eine Leistungsbeschränkung zum Bauteilschutz ist appliziert.

3. Bremssystem

3.1. Auslegung Bremssystem

Auswahl des regenerativen Bremssystems

Die Auswahl des optimalen Bremssystems erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden fünf Aspekte

- Rekuperationsfähigkeit
- Sicherheit
- Gewicht
- Kosten
- Verfügbarkeit

Neben dem ESP® System ESP®*plus* als Druckmodulationseinheit für ESP®, ABS, ASR wurde im Projekt e-generation das insbesondere für hybrid elektrische und rein elektrische Fahrzeuge entwickelte regenerative Bremssystem iBooster*hev* zum Einsatz in den rein elektrisch angetriebenen e-Boxster Fahrzeugen gewählt. Das iBooster*hev* System setzt sich zusammen aus der Hauptkomponente elektromechanischer Bremskraftverstärker *iBooster* und dem zusätzlichen Aktuator *SmartActuator*. Alle drei Komponenten sind in der Abbildung 1 dargestellt, wobei die dargestellten Größenverhältnisse nicht der Realität entsprechen.



Abbildung 26 Die drei Komponenten des Bremssystems in den e-generation e-Boxster Fahrzeugen, ESP®*plus* als Druckmodulationseinheit (oben), iBooster*hev* als elektromechanischer Bremskraftverstärker (rechts) und SmartActuator als zusätzlicher Volumenspeicher(links).

Neben der vakuumfreien Bremskraftverstärkung kann das regenerative Bremssystem iBooster*hev* durch den sogenannten *SmartActuator* als aktiver Volumenspeicher den Druck in den Bremskreisen entsprechend der generatorisch umgesetzten Rekuperation reduzieren. Man spricht hier vom sogenannten Verblenden zwischen generatorischem und klassischem, hydraulisch umgesetzten Reibbremsmoment. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bei Teilbremsungen rein rekuperativ mit Hilfe der Elektromotoren gebremst werden kann und die thermischen Verluste durch die hydraulische Radbremse minimiert werden.

Als Auslegungsziel für ein effizientes Bremssystem im Alltagsbetrieb diente die maximale Längsverzögerung im CADC 150 (ca. 4 m/s²). Das verwendete Bremssystem wurde für die

Fahrzeuge softwareseitig derart parametrieren, dass bis zu dieser maximalen Längsverzögerung die kinetische Energie bis auf Verluste im Antriebsstrang und in der Hochvoltbatterie vollständig rekuperiert werden kann. Die achsweiser Verteilung der Rekuperationsmomente wird dabei durch das *Porsche Recuperation Management (PRM)* vorgegeben und berücksichtigt fahrdynamische Randbedingungen. Die Umsetzung der Verteilung erfolgt durch das regenerative Bremssystem.

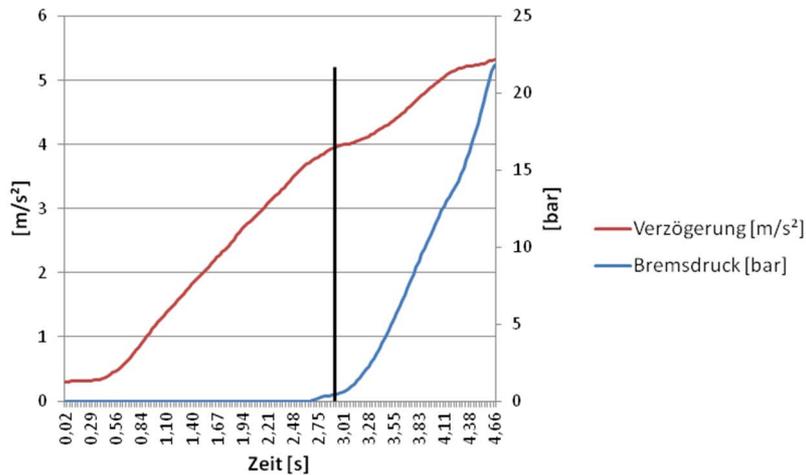


Abbildung 27 Erst ab einer Fahrzeugverzögerung von ca. 4 m/s² wird hydraulischer Bremsdruck in den Radbremsen aufgebaut

In der Abbildung 27 sind die Fahrzeugverzögerung und der Bremsdruck in der Radbremse über der Zeit aufgetragen. Durch die Rekuperation steigt der Bremsdruck in der Radbremse erst bei einer Verzögerung von 4 m/s² an. Bis zu diesem Zeitpunkt wird rein generatorisch mit Hilfe der beiden Elektromotoren gebremst.

Das regenerative Bremssystem iBooster^{hev} bietet ebenfalls Vorteile in Bezug auf die Sicherheit. So werden selbst bei einem möglichen Komplettausfall des Bremssystems, z.B. bei einem Ausfall des 12V-Bordnetzes, die gesetzlichen Anforderungen an die Mindestverzögerung erfüllt. Dieser Nachweis wurde im Fahrzeug erbracht.

Die Aspekte Kosten und Gewicht wurden ebenfalls beleuchtet. Im Vergleich zum e-Boxster 987e aus dem Vorgängerprojekt konnte eine Kosten- und Gewichtseinsparung von jeweils 6% erzielt werden. Diese Einsparungen konnten, trotz des gesteigerten funktionalen Mehrwerts des Bremssystems, realisiert werden. Die Gegenüberstellung der Fahrzeuge 987e und 981e sowie der verbauten Bremsanlage sowie Bremssysteme ist Abbildung 28 zu entnehmen. Das dort gezeigte 4-Box Bremssystem bezeichnet die Konfiguration bestehend aus einem Vakuumbremskraftverstärker, zwei elektrischen Vakuumpumpen und dem regenerativen Bremssystem ESP^{®hev}. Das 3-Box System im Projekt e-generation besteht aus dem iBooster als elektromechanischer Bremskraftverstärker, dem SmartActuator als Volumenspeicher (in Kombination das regenerative Bremssystem iBooster^{hev}) und dem konventionelle ESP^{®plus}.

Fahrzeug		
----------	--	--

		
	987e	981e
Bremsanlage	987-PCCB (Keramikkbremse)	981-Basis (Stahlbremse)
Bremssystem	4-Box-System Vakuum Bremskraftverstärker 2x elektrische Vakuumpumpe ESP [®] hev	3-Box-System iBooster + SmartActuator - ESP [®] plus

Abbildung 28 Referenzfahrzeug 987e (links) und 981e e-generation

Auswahl der Radbremse

Die Analyse der verfügbaren Radbremsen (Basis, Sport und Keramik) aus dem Serienbaukasten hat gezeigt, dass der Volumenbedarf aller drei Radbremsen geringer ist als das verfügbare Schluckvolumen des regenerativen Bremssystems (Volumenblending). Die notwendige Pedalkraft bei allen drei Bremsen ist ebenfalls kleiner als die mögliche Pedalkraft (Pedalkraftblending). Vergleiche hierzu Abbildung 29.

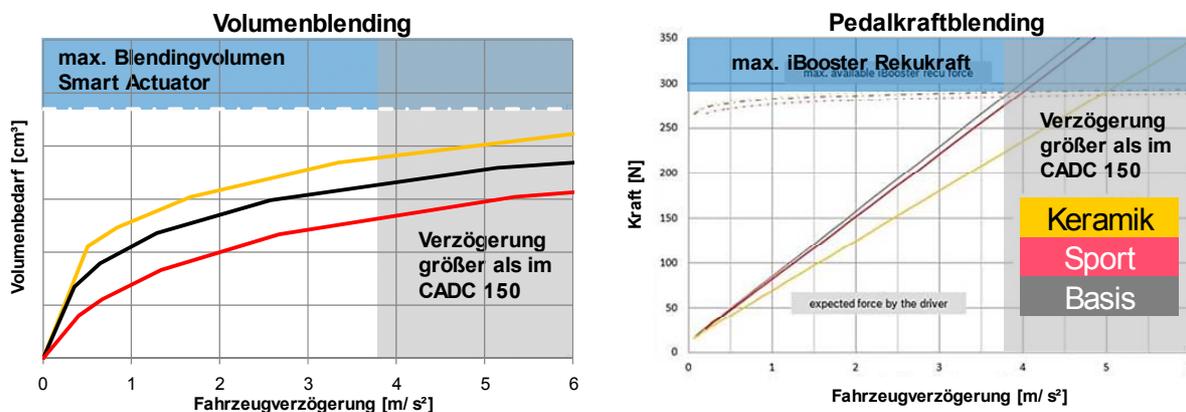


Abbildung 29 Volumen- und Kraftverblenden

Aus diesem Grund traten die Kriterien Gewicht und Kosten für die Auslegung der für das Projekt optimalen Radbremse in den Vordergrund. Bevor jedoch eine Auswahl unter diesen zwei Gesichtspunkten stattfinden konnte, musste die Radbremse zunächst thermisch abgesichert werden. Bei dieser Absicherung wurde in der Simulation untersucht, welche mechanische Bremsleistung von der Bremse im Grenzbetrieb aufgenommen werden muss. Hierzu wurden die Auslegungskriterien von Porsche herangezogen.

Würde die generatorische Bremse bei der Auslegung der Bremse nicht berücksichtigt, so muss die Sportbremse eingesetzt werden. Durch die Möglichkeit der Rekuperation wird die mechanische Bremsleistung reduziert und es kann somit die kleinere Basisbremse eingesetzt werden. Dadurch ergeben sich eine Gewichtseinsparung von 6% und eine

Kosteneinsparung von 11%. Zu der im Vorgängerprojekt eingesetzten Keramikbremse ergibt sich bei ähnlichem Gewicht eine Kosteneinsparung von 88%. Deshalb stellt die Basisbremse den optimalen Kompromiss für dieses Projekt dar.

Baukasten regenerativer Bremssysteme

Bosch hat in den vergangenen Jahren ein Konzept erarbeitet, das es auf transparente Weise ermöglicht, für ein Fahrzeug mit bekannter Antriebstopologie das passende Bremssystem bestehend aus Bremskraftverstärkung (Booster) und Bremsdruckmodulation (ESP®) zusammen zu stellen (Abbildung 30).



Abbildung 30 Das Bosch Kleeblatt zur Auswahl eines geeigneten Bremssystems für ein Fahrzeug gegebener Antriebstopologie

Konventionell angetriebene Fahrzeuge werden bis heute in der Regel mit einem Vakuumbremskraftverstärker (ggf. ergänzt über eine mechanische Vakuumpumpe) und mit einem klassischen ESP® ausgestattet. Hybrid elektrische und rein elektrische Fahrzeuge werden mit einem klassischen Vakuumbremskraftverstärker und einer elektrischen Vakuumpumpe ausgestattet. Um die Energierückgewinnung zu unterstützen, kommen in der Regel regenerative Bremssysteme zum Einsatz, wie sie in der Abbildung 30 durch das ESP®hev symbolisiert sind.

3.2. Fahrzeugaufbau und Freigabeprozess

Im Projekt e-generation wurden zwei e-Boxster Fahrzeuge aufgebaut und mit dem Bremssystem, bestehend aus iBoosterhev für die Bremskraftverstärkung und für die Unterstützung der Rekuperation sowie einem ESP®plus, ausgerüstet. Zusätzlich wurde je ein Radarsensor für die ACC-Funktion im Fahrzeugfrontbereich integriert.

Das Bremssystem wurde in reduziertem Umfang kalibriert, mit dem Ziel ein sicheres Fahrverhalten und ein gutes Pedalgefühl zu erreichen. In einem speziell für das e-generation Projekt definierten Freigabeprozess wurden die Bremssystemkomponenten freigeprüft und schließlich unter Benennung der erkannten, aus Zeitgründen aber nicht behebbaren Risiken für den Einsatz durch trainierte und instruierte Fahrer für den Straßenbetrieb freigegeben.

Auch bei der Applikation und Freigabe der ACC-Funktion gelten Einschränkungen bzgl. der Tiefe der Untersuchungen, da dies den Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts gesprengt hätte. Der Betrieb der ACC-Funktion auf öffentlichen Straßen ist ebenfalls nur trainierten und instruierten Fahrern zugewiesen. Die vom Projektpartner Porsche selbst

entwickelte eco-ACC Funktion ist bei der Bosch Freigabe nicht berücksichtigt. Fahrzeugabstimmung

Verbesserung der Fahrstabilität

Die Entscheidung für die Topologie 1Motor/Achse erfordert den Einsatz einer Funktion zur Allradverteilung. Das PTM (Porsche Traction Management) übernimmt diese Aufgabe. Es verteilt die Momente situationsabhängig in Fahrzeuginnenrichtung innerhalb der Leitplanken der Fahrstabilität mit dem zusätzlichen Fokus auf eine effiziente Allradverteilung.

Zur Verbesserung der Fahrstabilität im Grenzbereich (z.B. Ausweichmanöver) kann ein Torque Vectoring-System genutzt werden. Dieses System generiert Momente um die Fahrzeughochachse und kann sowohl die Agilität wie auch die Stabilität des Fahrzeugs positiv beeinflussen. Dazu werden gezielt unterschiedliche Radmomente an den beiden Fahrzeugseiten gestellt. Die Differenz der Radmomente kann durch Bremseingriffe oder zum Beispiel durch einen radselektiven Antrieb mit zwei E-Motoren je Achse realisiert werden. Da der radselektive Antrieb schwerer, teurer und größer ist, fiel die Topologie-Entscheidung in diesem Projekt auf einen Zentralantrieb je Achse. Die Untersuchungen wurden rein in der Simulation umgesetzt.

Elektromotoren besitzen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren aufgrund des geringeren Trägheitsmoments eine höhere Dynamik, so dass eine Anpassung der Antriebsschlupfregelung notwendig ist. Da der neue Antrieb die Möglichkeit einer Drehzahlregelung bietet, wird die Motorsteuerung um einen neuen, korrigierenden Drehzahlregler erweitert und mit der Momentenregelung des ESP® kombiniert, welches die Solldrehzahl zur Verfügung stellt. Diese auf die Motorsteuerung und das ESP® verteilte Antriebsschlupfregelung soll die Qualität der Antriebsschlupfregelung und somit die Fahrsicherheit verbessern.

Bewertung des Fahrdynamikpotentials von radindividuellen Antrieben bei Elektrofahrzeugen (Torque Vectoring)

Da im Rahmen des Projekts e-generation nur Aggregateträger mit achsindividuellem Antrieb aufgebaut wurden, erfolgte die Abschätzung des Fahrdynamikpotentials radindividueller Antriebe nur anhand einer Simulationsstudie. Die zentrale Fragestellung lautet, ob durch elektromotorisches Torque Vectoring eine gezielte Beeinflussung des Fahrdynamikverhaltens nachweisbar ist. Die qualitative Studie bezieht sich auf drei Beispielfahrzeuge unterschiedlicher Klassen: Kleinwagen, Kompaktklasse und Sportwagen.

Torque Vectoring verändert das Fahrverhalten der Fahrzeugmodelle. Je nach Wahl der Parameter lässt sich dem Fahrzeug ein agileres oder trägeres Verhalten aufprägen. Das agilere Fahrzeug benötigt bei gleichem Kurvenradius einen kleineren Lenkeinschlag als das gleiche Fahrzeug ohne Torque Vectoring, um die gleiche Querschleunigung zu erreichen. Umgekehrt ist es auch möglich, trägeres Kurvenverhalten zu applizieren, bei gleichem Lenkradwinkel einen größeren Kurvenradius zu fahren, was als komfortables Fahrverhalten empfunden wird.

Gemäß Abbildung 31 wirken sich die Fahrdynamikveränderungen in Abhängigkeit von der Antriebstopologie unterschiedlich stark auf die Fahrzeuge aus. Abbildung 31 bezeichnet V_{ch} die charakteristische Geschwindigkeit, die bei untersteuernden Fahrzeugen dem Maximum der Seitenkraft über dem Schräglaufwinkel zugeordnet ist. Fahrzeuge mit Heckantrieb weisen die stärkste Verhaltensänderung auf. Da auch Achsgeometrie, Steifigkeit der Lenkung, Reifengröße, Lage des Schwerpunkts und Reifenkennlinien Einfluss auf das Fahrverhalten ausüben, können die einzelnen Fahrzeugklassen nicht miteinander verglichen, sondern nur qualitative Aussagen getroffen werden.

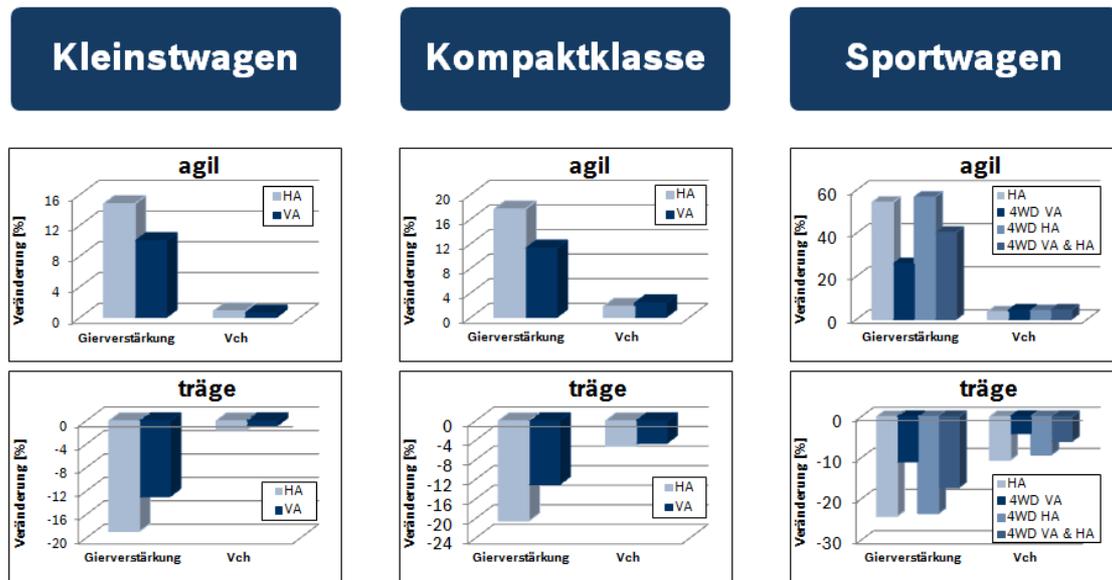


Abbildung 31 Gierverhalten (Unterschied zu Fahrzeug ohne Torque Vectoring)

3.3. Rekuperation

Porsche Recuperation Management (PRM)

Das PRM bildet das Bindeglied zwischen Antriebstrang und Hybridbremssystem. Die übergeordnete Zielsetzung der Funktion besteht in der Maximierung der Bremsrekuperation unter der Sicherstellung der Fahrstabilität, Fahrdynamik und Energieeffizienz in den jeweiligen Betriebszuständen. Hierzu optimiert PRM die Bremsrekuperation durch Verschieben der Rekuperationsmomente innerhalb des Bereichs zulässiger BKV (s. Abbildung 32).

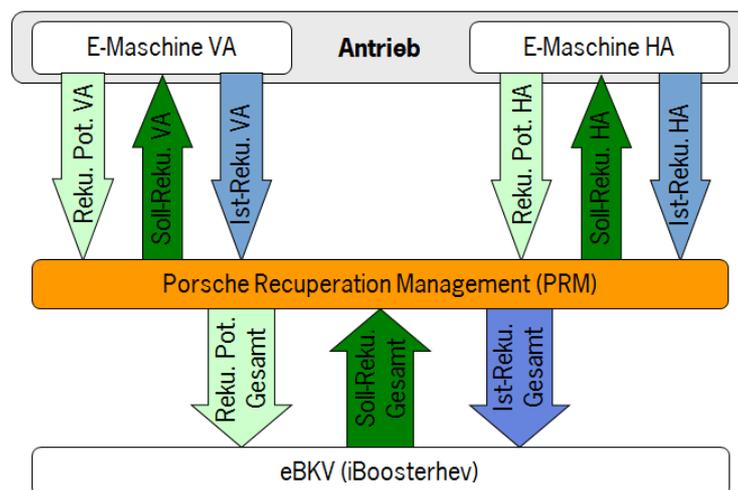


Abbildung 32 Funktionsschaubild PRM

Zunächst führt die Funktion die Rekuperationspotentiale der einzelnen E-Maschinen zusammen und verteilt die Rekuperationsmomente dann situationsbedingt auf die beiden Antriebsmaschinen. Das Gesamt-Rekuperationsmoment wird dem iBooster übermittelt damit dieser bei Bedarf mit der Betriebsbremse unterstützen kann. Dies ist der Fall, wenn das gewünschte Fahrerbremsmoment höher ist als das gestellte Rekuperationsmoment.

Rekuperationsstrategie für Elektrofahrzeuge mit achsindividuellem Antrieb

Die Antriebstopologie im Rahmen des Projekts e-generation sieht auf Vorder- und Hinterachse jeweils einen Elektromotor unterschiedlicher Bauart vor. In diesem Zusammenhang interessiert die Frage nach der Aufteilung des Summenbremsmoments auf diese beiden Maschinen und auf die hydraulische Bremse, um den Energieverbrauch im Fahrzyklus CADC 150 zu minimieren (s. Abbildung 33). Im Rahmen einer fahrdynamischen Simulationsstudie erfolgte eine energetische Betrachtung diverser Rekuperationsstrategien unter Vernachlässigung des Fahrkomforts:

1. Energieoptimale Verteilung der generatorischen Bremsmomente basierend auf Wirkungsgradkennfeldern der eingesetzten elektrischen Maschinen.
2. Feste Bremsmomentverteilung auf beide Achsen bis zum Erreichen des maximal übertragbaren Bremsmoments an einer der Achsen.
3. Bremsen nur an der Vorderachse bis zum Erreichen des maximal übertragbaren Bremsmoments.
4. Bremsen nur an der Hinterachse bis zum Erreichen des maximal übertragbaren Bremsmoments.

Grundlage für die Energieoptimierung sind folgende Zusammenhänge:

absetzbares Radbremsmoment

$$M_{Rad,max} = F_{Rad,z} \cdot \mu \cdot r_{Rad}$$

rückgespeiste elektrische Leistung

$$P_{el} = \omega_{EM} \cdot (\eta_{vorn} \cdot M_{vorn} + \eta_{hinten} \cdot M_{hinten})$$

mit den Gesamtwirkungsgraden η_{vorn} und η_{hinten} an den jeweiligen Achsen für die Wirkketten vom Rad bis zur Batterie. Aus den einzelnen Bremssituationen im Fahrzyklus ergeben sich die jeweils benötigten Summenbremsmomente auf Fahrzeugebene, die sich in Abhängigkeit von der gewählten Rekuperationsstrategie auf Vorder- und Hinterachse verteilen. Integration der rückgespeisten elektrischen Leistungen über die Fahrmanöverdauer ergibt die zurückgewonnene elektrische Energie.

Entscheidend für einen geringen Energieaufwand ist ein möglichst geringer Einsatz der Reibungsbremse. Im Falle des gewählten Fahrzyklus CADC 150 empfiehlt sich unter rein energetischen Gesichtspunkten generatorisches Bremsen und Verblenden bis zu Verzögerungen von ca. 4 m/s^2 in Kombination mit Rekuperationsstrategie 1.

Rekuperationsstrategie 1, die auf den Wirkungsgradkennfeldern der verbauten Elektromotoren basiert zeigt energetisch das beste Betriebsverhalten. Diese allein an der Energieeffizienz orientierte Strategie kann jedoch zu fahrdynamisch ungünstigen Fahrsituationen führen, beispielsweise zu unplausiblem Fahrgefühl oder zu Fahrzeuginstabilität aufgrund einer überbremsen Fahrzeugachse. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des Komfortaspekts ist Strategie 1 hinsichtlich des zulässigen Bremskraftverteilungsbereichs einzuschränken, was mit einer Reduzierung der Energieeffizienz einhergeht.

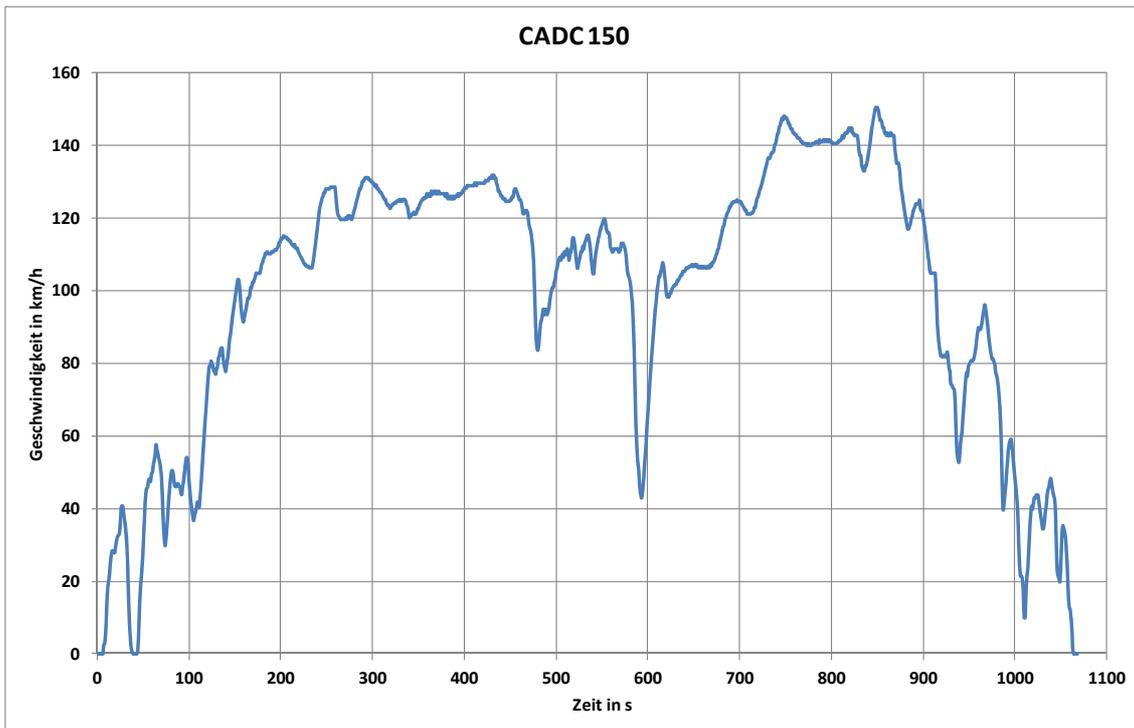


Abbildung 33 Referenzfahrzyklus CAD 150

3.4. Simulation und Funktionsentwicklung

Verteilte Antriebsschlupfregelung (eTCS) und ABS-Regelung (eABS)

Durch die im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren sehr kleinen Trägheitsmomente und somit sehr hohe Dynamik von Elektromotoren werden neue Ansätze zur TCS-Regelung notwendig. Als eTCS bezeichnen wir die Antriebsschlupfregelung mit auf das ESP[®] und die Leistungselektronik verteilten Regelungsalgorithmen. Als Ziel dieser Untersuchung im Projekt wurde die Minimierung der Closed Loop Zeitlücke in der TCS-Regelung definiert, die zur Verbesserung der Dynamik und somit der Qualität des TCS-Reglers dient, um so die Fahrsicherheit zu verbessern. Es werden eine möglichst glatte Regelung ohne starke Radabreißer und weniger Oszillationen der elektrisch angetriebenen Räder angestrebt, wobei auf minimalen zusätzlichen Aufwand für die TCS-Parametrierung geachtet wird.

Die Regelungen für Moment und Drehzahl werden kombiniert. Der bewährte TCS Momentenregler im ESP[®] wird weiter eingesetzt. Eine Söldrehzahl der Elektromotoren wird im TCS berechnet und an die Leistungselektronik weitergegeben. In der Leistungselektronik wird ein korrigierender Drehzahlregler implementiert, der das TCS stützt. Als Vorsteuermaßnahme wird zusätzlich ein Beschleunigungsregler verwendet. Die ESP[®]-Funktionalität und somit die Fahrzeugstabilität bleiben bei ein- oder ausgeschalteter Zusatzmaßnahme erhalten.

Die gesetzten Ziele konnten erreicht und prototypisch nachgewiesen werden. Je nach der Verfügbarkeit der Versuchsträgers im Projekt e-generation und der Unterstützung durch den Projektpartner Porsche wird der Nachweis noch bis Projektende im e-Boxster erbracht.

Ein analoger Regelungsansatz wurde für die eABS Funktion verfolgt. Bisher wurde die Verteilung zwischen generatorisch und hydraulisch erzeugtem Moment beim Bremsvorgang in erster Linie auf Basis von Sicherheits- und Komfortkriterien vorgenommen. Eine Verbesserung der Bremswirkung bei optimierter Effizienz an sich war weniger im Fokus. Es

wurde prototypisch untersucht, wie eine auf ESP®-Steuergerät und Inverter-Steuergerät verteilte Regelung umgesetzt werden kann, so dass die Charakteristika der beiden Aktuatoren optimal genutzt werden und die Gesamtperformance bzgl. Bremsweg, Rekuperation und Fahrstabilität verbessert wird. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein generatorisches Sockelmoment ergänzt um radindividuelle Bremsdruckmodulation eine Verbesserung der Bremswirkung und somit Reduktion des Bremswegs ermöglichen. Die Umsetzung und Demonstration im e-Boxster wird leider nichtmöglich sein, da entsprechend benötigte Schnittstellen zum Antriebsstrang aus Zeitgründen nicht zur Verfügung gestellt werden konnten.

Traktionskontrolle für Elektrofahrzeuge (Simulationsstudie)

Typischerweise erreicht die Antriebsschlupfregelung (ASR, TCS) in Elektrofahrzeugen nicht die gleiche Regelgüte wie in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Diese Studie auf Simulationsbasis untersucht existierende Regelalgorithmen hinsichtlich ihrer Eignung für Elektrofahrzeuge und leitet Verbesserungskonzepte ab.

Für Achsantriebe mit Differential zwischen den angetriebenen Rädern können existierende ASR-Algorithmen unverändert übernommen werden. Radindividuelle Elektroantriebe erfordern eine Umleitung der für die hydraulischen Radbremsten vorgesehenen Stellgrößen an die Elektromotoren. Sowohl für Achsantriebe als auch für radindividuelle Elektroantriebe ergibt sich eine vergleichbare Regelgüte, die jedoch nicht das Niveau wie für vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erreicht. Der Verlust an Regelgüte resultiert aus der Kombination von geringerer Massenträgheit und größeren Latenzzeiten bei der Signalübertragung für elektrische Antriebstopologien. Als vielversprechend erweist sich ein verteiltes ASR-Regelkonzept unter Einbeziehung des Inverters, um diese Nachteile zu kompensieren. Als Zusatzmaßnahme bietet sich eine Begrenzung der Motordrehzahl an. Sie verhindert großen Radschlupf der Antriebsräder dadurch, dass sie kontrollierend eingreift, bevor die Schlupfgrenze des ASR-Reglers erreicht wird (s. Abbildung 34).

Die genannten Gegenmaßnahmen zur Verbesserung der ASR-Regelgüte sind bereits in den Aggregateträger mit achsindividuellem Elektroantrieb implementiert, müssen jedoch noch in Fahrversuchen validiert und hinsichtlich ihrer Robustheit erprobt werden. Im Falle zunehmender Bedeutung radindividueller Elektroantriebe sollten Modifikationen des ASR-Algorithmus für Motor und Hydraulikeinheit in Betracht gezogen werden.

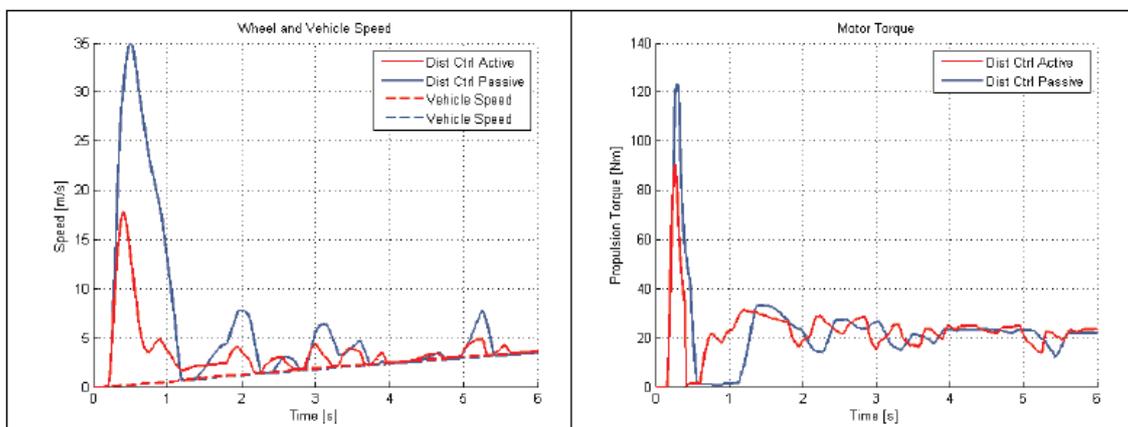


Abbildung 34 ASR-Konzept mit und ohne verteilte Regelung

3.5. Notbremsfunktion unter Einsatz versch. im Fahrzeug verfügbarer Aktuatoren

Innovative Fahrassistenzsysteme sowie aktive Sicherheitssysteme sorgen in modernen Fahrzeugen für immer mehr Sicherheit und Komfort. Im Rahmen des Projekts e-generation wurde eine optimierte Notbremsfunktion unter Einsatz verschiedener im Fahrzeug verfügbarer Aktuatoren prototypisch entwickelt. Neben der Optimierung herkömmlicher Konzepte wurden neue Ansätze entwickelt und Kombinationen analysiert, die der Forderung nach kürzeren Bremswegen und Steigerung der maximal möglichen Verzögerung Rechnung tragen.

Die Kombination der Elektromotoren in hybrid elektrischen sowie in reinen Elektrofahrzeugen mit der konventionellen hydraulischen Reibbremse ermöglicht einen schnelleren Aufbau des Bremsmoments in Notbremsituationen. Um dies zu untersuchen, wurden die einzelnen Aktuatoren, wie das ESP®-System, der elektromechanische Bremskraftverstärker iBooster und die Elektromotoren zunächst mittels dynamischer Modelle in Matlab/Simulink simuliert. Der Fokus lag dabei auf der maximalen Druckaufbaudynamik der hydraulischen Systeme und auf dem zeitlichen Verlauf des Momentenaufbaus des Elektromotors im generatorischen Betrieb. Durch das Verknüpfen der einzelnen Teilmodelle zu einem Gesamtmodell wurde der Beitrag des Elektromotors zur Gesamtbremskraft des Fahrzeugs ermittelt.

Nach der Validierung der Modelle mit realen Messdaten aus dem Fahrversuch mit einem geeigneten Versuchsträger wurden bereits vorhandene Konzepte zur Ansteuerung des Elektromotors optimiert sowie neue Konzepte zum Momentenaufbau entwickelt und analysiert. Bewertet wurden die Ergebnisse anhand messbarer Faktoren, wie zum Beispiel dem resultierenden Bremsweg oder der Dauer bis eine Verzögerung von 10 m/s^2 erreicht wird. Eine wesentliche Erkenntnis dabei war, dass nicht nur die Ergänzung eines Elektromotors zu einer Steigerung der Gesamtverzögerung führt, sondern auch die Art und Weise, das zusätzliche Moment unter Beibehaltung der Fahrstabilität wieder heraus zu nehmen. Neben dem Nachweis der Konzepte im Versuchsfahrzeug wurden verschiedene Ansätze alternativer Antriebskonzepte untersucht und mittels realen Messdaten ausgewertet.

Die vielversprechenden Ergebnisse und die dargestellten Ansätze tragen dazu bei, bisher nicht genutztes Potenzial der Elektromaschinen von Elektro- und Hybridfahrzeugen in einer Notbremsituation für zukünftige aktive Sicherheitssysteme zu berücksichtigen und damit den Bremsweg zu verkürzen oder die Aufprallgeschwindigkeit zu reduzieren.

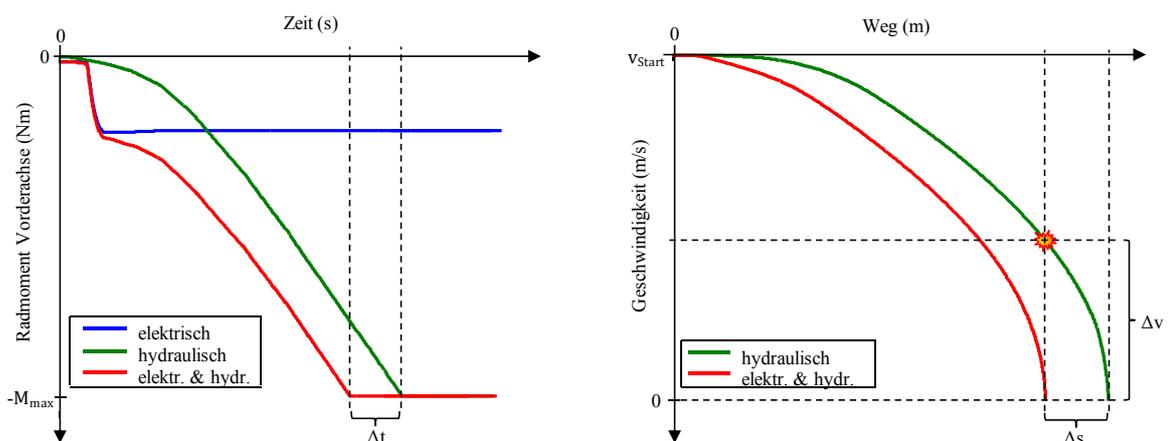


Abbildung 35 Vergleich einer Notbremsung mit und ohne Hinzunahme des Elektroantriebs

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht ÖgP e-generation 2012-2015 für BMBF Bosch Anteil „Hocheffiziente, skalierbare Antriebsstränge, rekuperative Bremsysteme und Fahrdynamikfunktionen für EV-Anwendungen “	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Mayr, Kerstin Dr. Knödler, Kosmas Beulich, Klaus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2015 6. Veröffentlichungsdatum 14.03.2016 7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Kerstin Mayr Robert Bosch GmbH Robert-Bosch-Campus 1 71272 Renningen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution B0361 10. Förderkennzeichen 16N11861 11. Seitenzahl 39
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) VDI/VDE-IT Steinplatz 1 10623 Berlin	

18. Kurzfassung

1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

Die erste Generation der Elektrofahrzeuge ist nicht massenmarkttauglich, da in der Regel die Verbrennungsmotorkomponenten ohne Optimierung durch entsprechende elektrische Antriebskomponenten substituiert werden. Das Rekuperationspotential wird nur unvollständig genutzt.

2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung

Ein für alle Massenmarktfahrzeuge einsetzbarer Antriebsbaukasten, welcher bezüglich Effizienz und damit Reichweite eine kostenoptimale Lösung darstellt ist das Hauptziel in der Entwicklung der elektrischen Antriebe für die zweite Generation der Elektrofahrzeuge.

3. Methode

Basis für die Maschinenentwicklung ist ein Gehäusebaukasten mit konstantem Durchmesser und variabler Länge. Für diesen Baukasten wurden in den Leistungsklassen von 50kW bis 150kW zwei Maschinentypen entwickelt, um die für das Fahrzeug spezifischen Anforderungen bezüglich Wirkungsgrad/Kosten zu erfüllen.

4. Ergebnis

Die Permanenterrregte Synchronmaschine erreicht einen maximalen Wirkungsgrad von 97%. Im Fahrzeugeinsatz tritt auch unter extremen Belastungen keinerlei temperaturbedingtes Leistungsderating auf. In einer Serienanwendung besteht Optimierungspotential bezüglich der Geräuschentwicklung durch eine geänderte Rotorgeometrie. Die Asynchronmaschine mit Kupferrotor erreicht einen maximalen Wirkungsgrad von 95%. Durch den Verzicht auf Seltene Erden Materialien kann so eine besonders kostengünstige Maschine dargestellt werden. In einer Serienanwendung besteht in der Maschinenregelung weiteres Optimierungspotential.

Die auf die Maschinen bezogenen Projektziele Kostenreduktion und Verlustreduktion sind vollständig erfüllt.

Das Bremssystem erlaubt im Verbrauchszyklus eine vollständige Rekuperation der Bewegungsenergie und erfüllt damit ebenfalls vollständig das Projektziel. In Fahrzeugtests konnte darüber hinaus die Rekuperation bis über 0,4g nachgewiesen werden.

5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Die erzielten Fortschritte stellen einen signifikanten Hub zum aktuellen Stand der Technik dar.

Die Ergebnisse des Projekts wurden vollständig an den Geschäftsbereich transferiert und fließen dort in zukünftige Serienprojekte der zweiten Generation der Elektrofahrzeuge ein.

19. Schlagwörter

Elektromobilität, Modulbaukasten, Asynchronmaschine, Permanenterrregte Synchronmaschine,

20. Verlag

-

21. Preis

-

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final Report for PFP e-generation 2012-2015 for BMBF Bosch Share TP1+TP2+TP4+TP6	
4. author(s) (family name, first name(s)) Mayr, Kerstin Dr. Knödler, Kosmas Beulich, Klaus	5. end of project 30.09.2015
	6. publication date 14.03.2016
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Kerstin Mayr Robert Bosch GmbH Robert-Bosch-Campus 1 71272 Renningen	9. originator's report no.
	10. reference no. 16N11861
	11. no. of pages 39
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) VDI/VDE-IT Steinplatz 1 10623 Berlin	

18. abstract

1. Actual status of science and technic

The first generation of electric vehicles is not fulfilling the demand of mass market, as generally the components of combustion engines are replaced by electrical components without any optimization. The potential of recuperation is not completely used.

2. Reasons/targets of research

A modular drivetrain kit for all mass market vehicles, which provides an optimal solution considering efficiency and costs is the main target in the research of electric drivetrains for the second generation of electric vehicles.

3. Approach

Basis of the development of the electric motors is a housing kit with common diameter a variable length. Two motor types in the power range from 50kW to 150kW can meet the specific vehicle requirements of efficiency and costs.

4. Results

The synchronous machine reaches a maximal efficiency of 97%. In extreme real drive situations no temperature derating occurs. In a series application the noise emissions could be optimized. The asynchronous machine reaches a maximal efficiency of 95%. This motor type uses no raw earth materials and is very cost-efficient. In a series application there is further optimization potential in the control software.

The project goals cost reduction and loss reduction are completely fulfilled with this motors.

The brake system allows a completely recuperation of the kinetic energy in the consumption cycle.

5. Conclusions/Applications

The project achieves a significant progress to the actual technology status.

The results are completely transferred to the business units and integrate in future series projects of the second generation of electric vehicles.

19. keywords

electric vehicles, modular drivetrain kit, asynchronous machine, synchronous machine,

20. publisher

-

21. price

-