



## **LDE-M**

### **Leistungsdichte E-Maschine**

FKZ 16EM0034

Laufzeit: 01.01.2010 – 30.09.2011

Projektvorhaben im Rahmen der BMU-Ausschreibung  
„Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“

### **Abschlussbericht**

Projektleitung:

*Dr.-Ing. Robert Plikat*  
Tel. 05361 9-40301, E-Mail: [robert.plikat@volkswagen.de](mailto:robert.plikat@volkswagen.de)  
*Dr.-Ing. Christian Mertens*  
Tel: 05361 9-29757, E-Mail: [christian.mertens@volkswagen.de](mailto:christian.mertens@volkswagen.de)

Autoren:

*Holger Amecke, Christiane Besch, Emine Bostanci, Sven Martin, Dr. Christian Mertens, Dr. Zdeno Neuschl, Dr. Robert Plikat, Oliver Rauch, Elisabeth Schulze, Henning Strauss, Hermann Wetzel*

Zuwendungsempfänger:

---

**VOLKSWAGEN**

AKTIENGESELLSCHAFT

Volkswagen AG  
Brieffach 1778  
38436 Wolfsburg

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	3
1.1 Aufgabenstellung .....	3
1.2 Voraussetzungen .....	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4 Stand der Technik .....	6
1.5 Wissenschaftliche Ziele .....	7
2 Ergebnisse .....	7
2.1 Konzept und Grobspezifikation .....	7
2.1.1 Spezifikation Elektrik .....	9
2.1.2 Schnittstellenspezifikation .....	10
2.2 Berechnung und Auslegung von Elektromaschine und Leistungselektronik .....	10
2.2.1 Auslegung der Elektromaschine .....	10
2.2.2 Grundauslegung .....	11
2.2.3 Optimierung .....	16
2.3 Abschätzung der Verluste .....	18
2.3.1 Auslegung der Leistungselektronik .....	20
2.4 Konstruktion und Bau einer prototypischen Elektromaschine .....	21
2.4.1 Mechanische Konstruktion .....	21
2.4.2 Auslegung der Verstellung des Rotors .....	22
2.4.3 Fertigung Stator und Statorgehäuse .....	27
2.4.4 Fertigung Statorblechpaket .....	27
2.4.5 Fertigung Rotor .....	30
2.4.6 Fertigung Maschinengehäuse und Vorrichtungen .....	31
2.5 Konstruktion und Bau einer integrierten Leistungselektronik .....	33
2.5.1 Auslegung der Halbleitermodule .....	33
2.5.2 Fertigung Aufbau und Test des leistungselektronischen Systems .....	34
2.6 Steuerung und Regelung des Antriebs .....	37
2.6.1 Simulationsmodelle .....	37
2.6.2 Regelungsverfahren .....	41
2.6.3 Implementierung in der Hardware .....	49
2.7 Sicherheitstechnologie .....	50
2.7.1 Sicherheit Leistungselektronik .....	51
2.7.2 Sicherheit Gesamtkonzept .....	51
2.8 Prüfstandsuntersuchungen .....	53
2.8.1 Prüfstandstests Kühlung .....	53
2.8.2 Prüfstandstests Rotorverstellung .....	54
2.8.3 Inbetriebnahme und Vermessung des Aggregats .....	55
2.8.4 Konstruktion und Fertigung mechanischer Verbindungen .....	59
2.9 Feldversuchnaher Test .....	59
2.9.1 Integration des Antriebs in Prototypenfahrzeug .....	59
2.9.2 Erprobung des Antriebs im Fahrzeug .....	59
2.10 Ausblick .....	59
2.11 Zusammenfassung .....	60
3 Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung .....	61
4 Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf .....	61
5 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des BMU .....	62
6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	62
7 Literatur .....	62

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

# Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Erweiterung des Antriebsstranges um elektrische Antriebskomponenten ermöglicht eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem ausreichend hohen Angebot erneuerbarer Energien [4]. Dies wird in einem sogenannten Hybridantrieb durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Betrieb des Verbrennungsmotors in effizienteren Betriebsbereichen [5]
- Rekuperation von elektrischer Bremsenergie
- Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors zur Effizienzsteigerung
- Downsizing des Verbrennungsmotors
- Start-Stopp Funktionalität, d.h. effektiver Start des Verbrennungsmotors nach Lastpausen

Insgesamt ist eine Einsparung von Kraftstoff von ca. 25% zu erwarten.

Des Weiteren kann elektrische Energie gespart werden durch

- verlustarme Elektromaschine
- optimierte Ansteuerung der elektrischen Antriebskomponenten
- Nutzung der Elektromaschine als Stellglied für Bremsung und Rekuperation

Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte elektrische Antriebssystem ist so spezifiziert, dass reines elektrisches Fahren ermöglicht wird. Die Reichweite wird durch die Batteriekapazität begrenzt, und die Dauerleistung der Elektromaschine ist auf diesen Einsatzfall ausgelegt.

Der in diesem Vorhaben betrachtete Fahrzeugantrieb ist in der Lage sowohl motorisch zu arbeiten als auch Energie in die Batterie zu rekuperieren.

Ziel dieses Vorhabens war die physische Darstellung eines kompakten, leistungsdichten elektrischen Antriebssystems aus Elektromaschine und Leistungselektronik, aufbauend auf Auslegung, Simulation, Konstruktion, Aufbau, Prüfstandserprobung und Optimierung. Um eine weitergehende Nutzung der Ergebnisse im Hinblick auf die Fertigung des Antriebs in höheren Stückzahlen zu gewährleisten orientierten sich die Rahmenbedingungen (geometrische Bauräume, elektrische Schnittstellen) sehr eng an den zurzeit definierten Fahrzeugplattformen. Hierzu wurden Aufwand- und Kostenaspekte in der Systemdefinition berücksichtigt.

In diesem Vorhaben wurde zunächst eine Analyse des technisch Machbaren im Hinblick auf Umrichterausnutzung (Nutzungsgrad), Maschinenperformance und Kostenreduktion durchgeführt. Anschließend wurden die theoretischen Ergebnisse in prototypischen Versuchsaufbauten validiert.

Zur Absicherung des Betriebes der elektrischen Antriebskomponenten sollten auch Sicherheitsfunktionen erprobt werden und mit der Integration in ein Versuchsfahrzeug im Fahrer Versuch Erkenntnisse zu Zuverlässigkeit und Performance des elektrischen Antriebs gewonnen werden.

## 1.2 Voraussetzungen

Im Rahmen der fortschreitenden Elektrifizierung von Antriebssträngen in Kraftfahrzeugen werden Antriebsstrangkonzepete genutzt, die rein elektrisch arbeiten oder unterstützt von Verbrennungsmotoren die Leistungswandlung von der Batterie hin zum Rad realisieren (Hybridfahrzeuge).

Hierbei werden elektrische Maschinen eingesetzt, die am Rad die vom Fahrer geforderten Drehmomente realisieren. Motorisch arbeitend sind hohe Anfahr Drehmomente bei sehr gu-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

tem Fahrkomfort realisierbar. Generatorisch arbeitend kann die elektrische Maschine Bremsleistung rekuperieren und trägt somit entscheidend zur Energieeffizienz des Fahrzeugs bei. Die Ansteuerung der Maschinen geschieht über leistungselektronische Stellglieder, die eine Anpassung der Batteriespannung an den momentanen Arbeitspunkt vornehmen und über Stromstell- und -regelverfahren die gewünschten Drehmomente realisieren.

Elektromaschine und Leistungselektronik müssen nicht nur sehr restriktiven Bauraumvorgaben genügen, sondern auch speziell auf die Erfordernisse und Umwelteinflüsse im Automobil abgestimmt sein. Im Rahmen dieses Vorhabens soll ein elektrischer Antrieb aufgebaut werden, der diesen Anforderungen für Antrieb und Rekuperation bestmöglich gerecht wird.

### **Drehmomentdichte**

Die Betriebsarten und die Leistungsaufteilung im hybriden Antriebsstrang definieren die Drehmomentanforderung an den elektrischen Antrieb. Hohe Spitzendrehmomente werden vor allem für Boost- oder Rekuperationsfunktionen benötigt, während Dauerdrehmomente entscheidend für reines elektrisches Fahren sind. Hieraus ergeben sich Grenzwerte, die in die Auslegung von Leistungselektronik und elektrischer Maschine einfließen. Spitzendrehmomente werden in erster Linie durch die Belastbarkeit der Leistungshalbleiter definiert, während sich die Dauerdrehmomente durch die in der E-Maschine entstehenden – und durch Kühlsysteme abzuführenden – Verluste ableiten [6].

### **Leistungsdichte**

In Abhängigkeit von Fahrmodus und Fahrgeschwindigkeit werden der elektrischen Maschine unterschiedlich hohe Leistungen abverlangt [5][9][10]. Hierbei spielt die Leistungsaufteilung im Antriebsstrang eine entscheidende Rolle. Die Maschinenleistung muss über die vorgeschalteten leistungselektronischen Stellglieder bereitgestellt werden, d.h. die Leistungselektronik wird zur Leistungsanpassung zwischen Batterie (Zwischenkreis) und elektrischer Maschine benötigt.

Entscheidend für die realisierbare Leistungsdichte ist die in Maschine und Leistungselektronik eingesetzte Kühltechnologie [1]. Zur Kühlung von Leistungselektronikmodulen sind prinzipiell sowohl ein- als auch beidseitig kühlende Konzepte nutzbar. Das Kühlkonzept hat erheblichen Einfluss auf die Dauerleistung der Leistungselektronik. Spitzenleistungen werden aufgrund von geringen Wärmekapazitäten der Module durch die Temperaturgrenzen der Halbleiter definiert.

Elektrische Maschinen können wasser-, öl-, oder luftgekühlt ausgeführt werden. Eine Wassermantelkühlung ist an den Stator der Maschine angebunden und bewirkt einen Wärmefluss aus dem Elektroblech hin zum Kühlmedium. Ölkühlungen bewirken in erster Linie eine direkte Kühlung der Wickelköpfe. Hierzu sind ein hinreichend guter Wärmeübergang zwischen Elektroblech und Wicklung – als auch großflächige Wickelköpfe nötig. Luftgekühlte elektrische Maschinen arbeiten ohne Zufuhr flüssiger Kühlmedien und besitzen geringere Kühlwirkung. Sie sind daher hinsichtlich ihrer abführbaren Dauer-Verlustleistung begrenzt [3].

Im Rahmen dieses Projektes sollte das Kühlverfahren für Leistungselektronik und elektrische Maschine so optimiert werden, dass unter Berücksichtigung von Aufwand und Kosten eine optimale Abführung der Verlustwärme sowohl im Elektronikteil als auch in der Maschine gesichert werden kann.

### **Zuverlässigkeit**

Die Antriebskomponenten (E-Maschine und Leistungselektronik) sind besonderen Umgebungseinflüssen und hohen Lastanforderungen ausgesetzt. Charakteristisch hierfür sind Temperaturverhalten und Erschütterungsverhalten. Beide Effekte beeinflussen die Lebensdauer der Komponenten.

Daher wurden im Rahmen dieses Vorhabens neuartige Aufbautechniken in den Leistungselektronikmodulen untersucht, die eine sowohl mechanisch als auch thermisch optimierte Verbindung und Kontaktierung von Chip und Kühlsystem gewährleisten [2].

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

### Integrierte Leistungselektronik

Ein weiterer Schritt in Richtung Zuverlässigkeit wird durch die Integration der Leistungselektronik an die E-Maschine getan. Hierbei kann auf flexible Leitungen zwischen Motor und Leistungsendstufe verzichtet werden. Es bietet sich damit ein Kostenvorteil, da aufwendige Kontaktierungen entfallen.

Im Rahmen dieses Projektes sollte ein elektrischer Antrieb entwickelt werden, der eine direkte Anbindung der Leistungselektronik an das Kühlsystem der E-Maschine beinhaltet. Hierzu war eine Reihe von Untersuchungen durchzuführen, die sowohl die mechanische Konstruktion und Verbindungstechnik als auch die elektrischen Anbindungsmöglichkeiten beinhalten. Damit waren Zuverlässigkeit und Effizienz dieses Gesamtkonzeptes zu bewerten.

### Elektromaschine

Unterschieden werden im Wesentlichen drei Arten von elektrischen Maschinen:

Asynchronmaschinen (Sinusspeisung)

Synchronmaschinen (Sinusspeisung)

Blockgeschaltete, bürstenlose Gleichstrommaschinen.

Im Rahmen des hier dargestellten Vorhabens wurde eine bürstenlose Gleichstrommaschine betrachtet, die mit ihren Eigenschaften folgende Vorteile aufweist:

Hochpolige Maschine	→ Reduzierte Jochbreite, damit geringes Maschinengewicht
Mehrsträngige Maschine	→ Reduzierung von Rastmomenten
Mäanderwicklung	→ Reduzierung des Leiteranteils im Wickelkopf, damit Verlustminimierung
feine Blechung	→ Reduzierung von Wirbelstromverlusten
gestückelte Magnete	→ Reduzierung von Magnetverlusten durch Wirbelströme
großer Durchmesser	→ Steigerung der Drehmomentdichte

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde als Einzelprojekt in der Volkswagen Konzernforschung durchgeführt. Das Projekt gliederte sich in die Arbeitspakete

- 1) Spezifikation des elektrischen Antriebssystems
- 2) Auslegung und Berechnung
- 3) Konstruktion und Aufbau
- 4) Auslegung und Aufbau Leistungselektronik
- 5) Ansteuerung
- 6) Sicherheit
- 7) Prüfstandserprobung
- 8) Fahrzeugintegration und –versuch

Es war dabei der folgende der Meilensteinplan zugrunde gelegt:

Bez.	Arbeitspaket	Datum	Meilenstein
M0		1/2010	Projektstart
M1.1	1	03/2009	Spezifikation des elektrischen Antriebssystems, Lastenhefterstellung abgeschlossen
M2.1	2	09/2010	Berechnung und Auslegung der elektrischen Maschine abgeschlossen
M3.1	3	10/2010	Konstruktion und Bau der Einzelteile abgeschlossen