

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
Dr.-Ing. Christian Mertens
Tel: 05361 9-29757, E-Mail: 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 CO₂-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

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

M3.2	3	05/2011	Konstruktion und Bau Gesamtantrieb abgeschlossen
M4.1	4	06/2010	Halbleitermodule gefertigt und erprobt
M5.1	5	09/2010	Ansteuerung des Antriebs funktionsfähig
M5.2	5	06/2011	Ansteuerung des Antriebs fahrzeugtauglich
M6.1	6	06/2011	Sicherheitsstatus prototypentauglich
M7.1	7	05/2011	Prüfstandsvermessung abgeschlossen und dokumentiert
M8.1	8	07/2011	Integration ins Fahrzeug abgeschlossen
M8.2	8	09/2011	Fahrzeugversuch abgeschlossen
M9		09/2011	Projektende

Die Meilensteine 8.1 und 8.2 konnten im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr erreicht werden.

1.4 Stand der Technik

In den zurzeit realisierten Elektro- und Hybridfahrzeugen werden Leistungselektronik und Elektromaschine als separate Komponenten im Fahrzeug verbaut. Dieses erfordert separat ausgeführte Kühlsysteme und einen erheblichen Aufwand an Leitungsverlegung. Beide Komponenten benötigen erheblichen Bauraum und müssen jeweils an Kühlmedien angebunden werden [6]. Die Kühlung von Leistungselektronik und Elektromaschine geschieht über Kühlkörper, in denen vornehmlich über eine Wasserkühlung die Abfuhr von Verlustwärme realisiert wird. Ölgekühlte Elektromaschinen (Spritzölkühlung) sind ebenfalls in Kraftfahrzeugen dargestellt worden, erfordern jedoch noch zusätzlich Ölpumpen und Wärmetauscher.

Ziel dieses Vorhabens war die Verschmelzung von Elektromaschine und Leistungselektronik. Hierzu sollte ein gemeinsames Kühlsystem genutzt werden, das auf der Oberseite an die Leistungselektronikmodule und auf der Unterseite an den Stator der E-Maschine angebunden ist. Auf eine Rotorkühlung wurde im Rahmen dieses Vorhabens verzichtet, hier wurde die Nutzung segmentierter Magnete in Verbindung mit magnetisch optimal angebundenem Rotorrückschluss präferiert, weil damit auch die Gesamtverluste der Maschine gesenkt werden können.

Drehmomentstarke Sinus-Maschinen weisen üblicherweise einen großen Feldschwächbereich auf, der einerseits einen großen Verlustanteil im Bereich hoher Drehzahlen bedeutet und andererseits damit in diesem Bereich die Maschinenperformance einschränkt. In diesem Projekt wurde eine mechanische Rotorverschiebung zur Flussschwächung im oberen Drehzahlbereich umgesetzt, welche die vorgenannten Nachteile verringert und zudem die Ausnutzung der Leistungselektronik und die Sicherheit des Antriebs verbessert.

Um die Effizienz der Gesamtanordnung aufrechtzuerhalten wird eine sehr verlustarme Auslegung der Elektromaschine angestrebt, wobei keine Einbußen der Leistungsdichte erfolgen dürfen, da die Performance des hier angetriebenen Demonstratorfahrzeuges erhalten werden soll. Die Hauptverluste in der Elektromaschine entstehen strombedingt in den Leitern der Wicklungen und flussbedingt durch Wirbelstromeffekte in den Elektroblechen.

Um diesen Verlusteffekten entgegenzuwirken werden hier Materialien eingesetzt und untersucht, die heute in Serienmaschinen noch nicht durchgängig zu finden sind. In heute verfügbaren elektrischen Maschinen werden Elektrobleche mit 0,3 mm Blechdicke eingesetzt. Die-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

ses bietet Fertigungs- und Kostenvorteile, führt jedoch bei hohen Maschinendrehzahlen zu Wirbelstromverlusten im Blech. Daher wird in diesem Vorhaben dünneres Elektroblech verwendet, und zugleich wird die Fertigbarkeit des Stators mit diesem Blech untersucht.

Weiterhin kann durch Nutzung von rechteckförmigem Draht ein erheblich besserer Kupferfüllfaktor in der Statornut realisiert werden. In diesem Vorhaben wurden 80 % Nutfüllung angestrebt, um die ohmschen Wicklungsverluste zu minimieren. Standardmaschinen erreichen heute Füllfaktoren von 50-60%. In früheren Arbeiten wurden in der Volkswagen Forschung bereits Statoren mit Nutfüllgraden > 70 % realisiert [11][12].

1.5 Wissenschaftliche Ziele

Im Prüfstandsversuch wurde der Antrieb diversen Lastbetriebsarten ausgesetzt. Hierbei wurden Kennfelder generiert, die Aussagen über **Wirkungsgrad** und **Belastbarkeit** von Elektromaschine und Leistungselektronik ermöglichen.

Durch die Erprobung des Antriebssystems im Fahrversuch sollten Erkenntnisse über den Antrieb gewonnen werden, insbesondere zum Einfluss der Betriebsbedingungen (Temperatur, Vibration) auf die **Werkstoffe** (Isolation, Blech).

Entscheidend für die Performance des Antriebs ist das **Kühlsystem**. Hier wurden entsprechende Untersuchungen und Messungen zur Generierung einer geeigneten Kühlgeometrie durchgeführt.

Insgesamt soll das Vorhaben eine Aussage zu der realisierbaren Leistungsdichte einer Traktionselektromaschine nach sehr innovativem Konzept im Rahmen wettbewerbsfähiger Systemkosten liefern.

2 Ergebnisse

2.1 Konzept und Grobspezifikation

Ausgehend von Performanceforderungen des Gesamtantriebsstranges wurde eine Antriebsauslegung durchgeführt.

Ziel war der Entwurf einer elektrischen Maschine für eine Dauerleistung von 50 kW bei einem Dauerdrehmoment an der Welle von 300 Nm. (Spitzenwerte an der Welle 85 kW/600Nm). In diesem Arbeitspaket wurde der Bauraum für Stator, Motor und Lagerung spezifiziert, und es fand eine Grobabschätzung der zu erwartenden Maschinenleistung statt. Darauf aufbauend wurde unter Berücksichtigung des Maschinenprinzips ein geeignetes Kühlkonzept definiert.

Im Rahmen der Konzeptdefinition wurden die Performanceanforderungen an das Antriebssystem, bestehend aus Leistungselektronik und Elektromaschine definiert. Diese Parameter fließen in die Bauraumspezifikation ein, die im Rahmen der Grobspezifikation bearbeitet wurde. Hier wurde sichergestellt, dass die Elektromaschine keine singuläre Lösung darstellt, sondern in die von Volkswagen geplanten Elektro- und Hybridfahrzeuge integrierbar sind. Um auf die geforderten Daten bezüglich der Wellenschnittstelle zu kommen, wurde eine Planetengetriebebestufe mit $i=2:1$ integriert. Somit kann die Elektromaschine mit einer Drehzahl von 12.000 U/min betrieben werden und ist praktisch von den erforderlichen Drehzahlen am Ausgang der Wellenschnittstelle entkoppelt. In Abbildung 1 ist der für die LDE-M spezifizierte Bauraum dargestellt. Dieser Bauraum richtet sich im Durchmesser im Wesentlichen nach den Geometrien aktueller Getriebe und der Anforderung einer schmalen Bauform für die Möglichkeit zu Verwendung in Hybridantrieben. Die Kühlung erfolgt in diesem Projekt über

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

eine in den Kühlträger integrierte Kühlstruktur in Form von optimierten Kühlkanälen. Die Kühlung im Träger wird beidseitig genutzt um im inneren den Stator und im äußeren die Leistungselektronik zu kühlen.

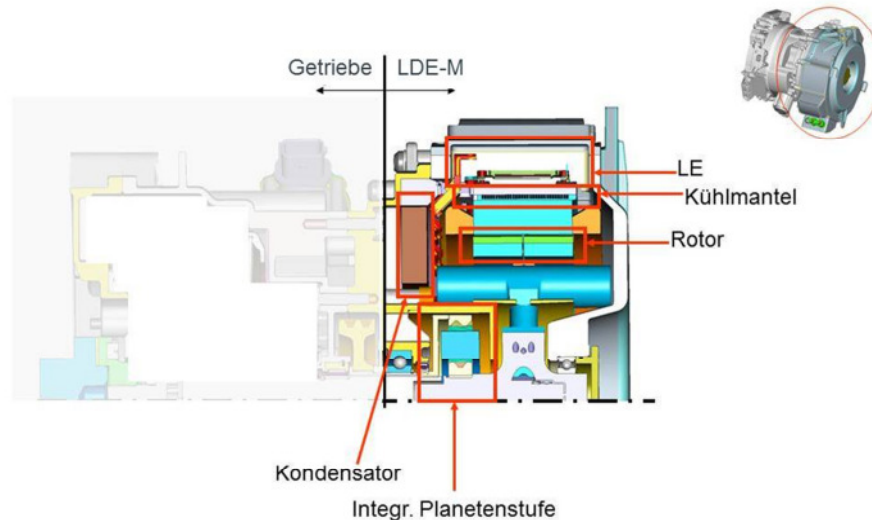


Abbildung 1: Bauraum LDE-M inklusive Getriebestufe

Als Maschinentyp wurde eine **permanentmagnetisch erregte Gleichstrommaschine** mit elektronischer Kommutierung, d. h. bürstenlos (engl.: BLDC) ausgewählt. Dieser Maschinentyp zeichnet sich prinzipiell durch eine einfache und regelmäßige Wellenwicklung, einen rechteckigen Luftspaltfeld- und Phasenstromverlauf und dadurch eine gute Ausnutzung des Rotor- und Statorfeldes zur Drehmomentbildung aus.

In Bezug auf die relativ hohe maximale Drehzahl der Elektromaschine mit $n_{\max}=12000\text{min}^{-1}$ ist eine Konstruktion mit einem **Innenläufer-Rotor** geeignet. Der Kühlmantel der Elektromaschine wurde dadurch am Außenradius des Stators angebracht und ermöglicht eine insgesamt größere Kühlfläche als ein entsprechender Stator mit einem Außenläufer-Rotor. Darüber hinaus bietet diese Konstruktion eine einfachere Anbringung der Leistungselektronik an den gleichen Kühlmantel. Mit der Innenläufer-Konstruktion kann außerdem der Bereich höherer mechanischer Drehzahlen erreicht werden.

Der **Stator** der Elektromaschine wurde mit einer Phasenanzahl $m > 3$ ausgelegt. Durch die Polyphasigkeit in Kombination mit der Wellenwicklung ist eine geringe Drehmomentwelligkeit zu erwarten, da der Strombelag im Betrieb mit konstantem Drehmoment nur sehr wenig variiert. Der weitere Vorteil der polyphasigen Konstruktion mit einer Wellenwicklung ist das geringe Zahn-Nut Wechselfeld im Rotor (Permanentmagnete und Rotorrückschluss), die dadurch entstehenden Eisenverluste im Rotor sind ebenfalls gering. Damit die Eisenverluste im Stator durch die zu erwartenden hohen Gradienten dB/dt des Rotorfeldes nicht übermäßig ansteigen, sollen im Stator **hochwertige Elektrobleche** eingesetzt werden. Die erforderliche Elektroblechqualität ist im Allgemeinen durch geringe Dicke zur Wirbelstromreduktion sowie einen hohen Legierungsgrad zur Reduktion der Hystereseverluste gekennzeichnet. In [13] sind die magnetischen Eigenschaften dünner Elektrobleche untersucht worden.

Ein weiterer Aspekt, der beim Bau von hochleistungsdichten Gleichstrommaschinen beachtet werden muss ist der Draht der **Wicklung**. Dieser muss bei einer Gleichstrommaschine im Allgemeinen hohe Stromgradienten dI/dt zulassen ohne dass Skineffekt eintritt. Des Weiteren sollen auch mögliche Wirbelstromverluste im Wickelkopf, die durch das Rotorfeld entstehen, vermieden werden. Diese Anforderungen erfüllt ein Litzendraht, welcher aus parallelen isolierten Litzen aus dünnem Draht zusammengesetzt ist.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Der **Rotor** incl. magnetischer Rückschluss der Elektromaschine wird aus Festigkeitsgründen möglichst aus Vollmaterial gefertigt. Die **Permanentmagnete** der Elektromaschine werden an der Rotoroberfläche angebracht. Da die Permanentmagnete dem Statorwechselfeld ausgesetzt sind, sollen diese aus voneinander isolierten Teilsegmenten in axialer Richtung zusammengesetzt werden. Die Segmentierung (analog der Blechung im Stator) ist heute im Bau von Elektromaschinen mit Oberflächenmagneten die Maßnahme, mit der die Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten deutlich reduziert werden.

Aus den hohen Anforderungen an das maximale Drehmoment im Grundstellbereich resultiert bei Gleichstrommaschinen mit Permanentenerregung eine hohe induzierte Spannung im Bereich hoher Drehzahlen. Da im Fahrzeug meistens eine geringere Batteriespannung als diese induzierte Spannung zur Verfügung steht, muss in den entsprechenden Betriebspunkten entweder die Batteriespannung mit einem Spannungswandler angehoben oder die induzierte Spannung der Elektromaschine gesenkt werden. In der aktuellen Konstruktion wurde die Alternative der Absenkung der induzierten Spannung (Feldschwächung) gewählt.

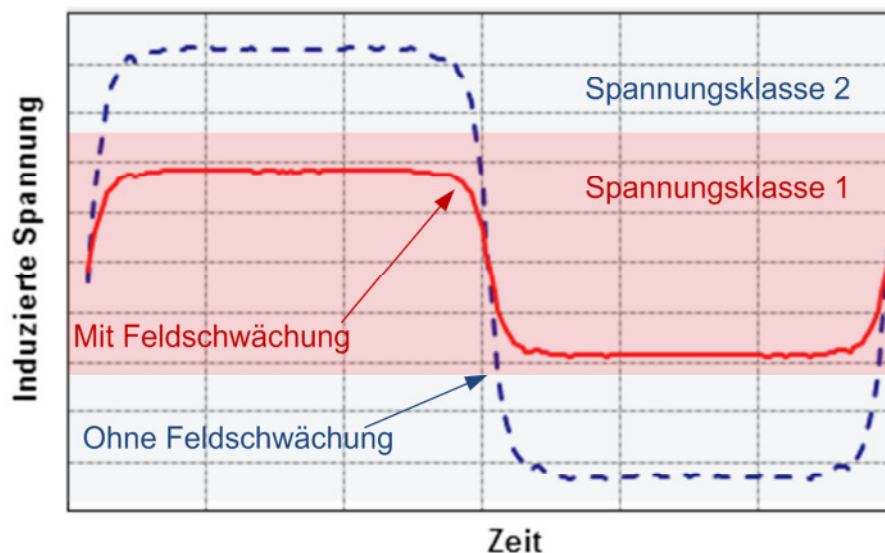


Abbildung 2: Verlauf der induzierten Spannung der Elektromaschine bei Maximaldrehzahl mit und ohne Feldschwächung

Eine Erläuterung zum Thema Feldschwächung ist im Abschnitt 2.2.2.1 beschrieben. Das so verfolgte Konzept der sogenannten mechanischen Feld- oder Flusschwächung hat zudem eine sehr positive Auswirkung auf den Umrichterwirkungsgrad. Es können Halbleiterbauelemente einer niedrigeren Spannungsklasse verwendet werden, als sie für die EMK der Maschine mit unverstelltem Rotor für das vorgesehene Drehzahlenspektrum eigentlich benötigt würden.

Für die in jeden Betriebspunkt einer Gleichstrommaschine einzustellende Spannung wurde in diesem Projekt zunächst eine vorgelagerte DC/DC-Wandlung vorgesehen. In der endgültigen Applikation sollte diese Spannungsstellung durch eine strangbezogene PWM-Stromregelung erreicht werden.

2.1.1 Spezifikation Elektrik

Die Spezifikation der mechanischen Maschinencharakteristik muss in eine entsprechende elektrotechnische Auslegung der Elektromaschine münden. Daher wird in diesem Arbeitspa-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

ket die Elektrokonstruktion, ausgehend von Leitungsverlegungen bis hin zur Wicklungsbe-
rechnung durchgeführt.

2.1.2 Schnittstellenspezifikation

Um den elektrischen Antrieb im Fahrzeug betreiben zu können ist eine Kommunikation mit
der Fahrzeugumgebung unerlässlich. Hierbei werden mehrere Steuergeräte in das Gesamt-
system eingebunden, die sowohl über CAN-Anbindungen als auch Hardwareleitungen Infor-
mationen austauschen. In diesem Arbeitspaket wird die hierzu notwendige Schnittstelle des
elektrischen Antriebs zur Außenwelt bearbeitet.

2.2 Berechnung und Auslegung von Elektromaschine und Leistungs- elektronik

In diesem Arbeitspaket wird die Dimensionierung von E-Maschine und Leistungselektronik
vorgenommen, ausgehend von Performance- und Bauraumanforderungen des Gesamtan-
triebsstranges wird eine Antriebsauslegung durchgeführt.

2.2.1 Auslegung der Elektromaschine

Ausgehend von der Grobspezifikation in Abschnitt 2.1 soll die auszulegende Elektromaschi-
ne folgende Spezifikation erfüllen:

$$\begin{array}{ll}
 P_n = 50\text{kW} & P_{\max} = 85 \text{ kW} \\
 M_n = 150 \text{ Nm} & M_{\max} = 300 \text{ Nm} \\
 n_{\max} = 12000 \text{ min}^{-1}. &
 \end{array}$$

Dabei sind folgende elektrische Eingangsgrößen:

$$\begin{array}{l}
 I_{\max} = 500 \text{ A} \\
 U_n = 300 \text{ V} \\
 U_{\max} = 350 \text{ V}
 \end{array}$$

sowie der zur Verfügung stehende Bauraum mit:

$$\begin{array}{l}
 \text{Durchmesser} = 280 \text{ mm} \\
 \text{Axiale Länge} = 110 \text{ mm}
 \end{array}$$

zu berücksichtigen.

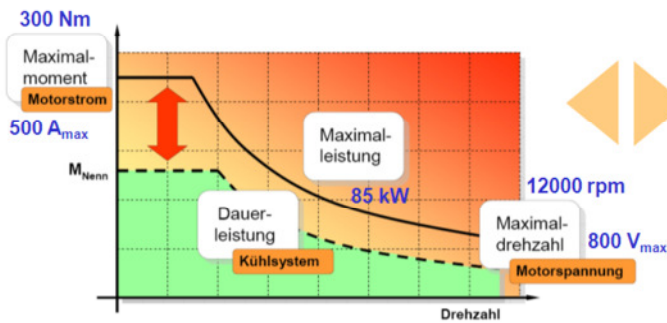
2.2.1.1 Auslegungsprozess

Nach dem die Randbedingungen erklärt und der Auslegungsansatz definiert wurde, erfolgte
die Auslegung der permanentmagnetisch erregter Gleichstrommaschine. Der Auslegungs-
prozess erfolgte in 3 Schritten:

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

Dabei gehören die Schritte 1 und 2 zur Grundausslegung, Schritt 3 geht über die Grundaussle-
gung hinaus und dient zur gezielten Optimierung der Geometrie des magnetischen Kreises.

• Spezifikation



• Bauraum



Grundausslegung und Optimierung

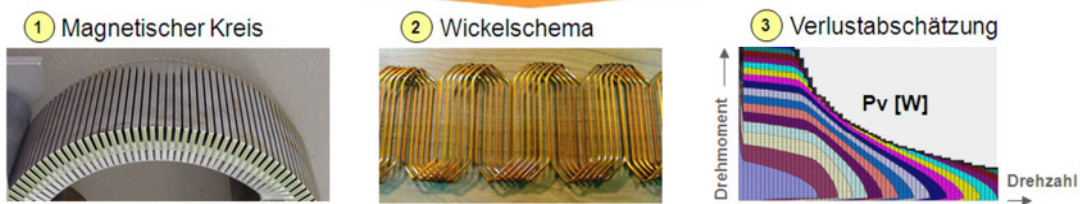


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Auslegungsprozesses

2.2.2 Grundausslegung

Bereits in der Grundausslegung einer elektrischen Maschine soll sich zeigen, ob die geforderte Spezifikation der Elektromaschine in dem dargestellten Bauraum (Anfang Abschnitt 2.2.1) umsetzbar ist. Bei der Grundausslegung wurden bekannte analytische Gleichungen aus der Theorie elektrischer Maschinen angewendet. Des Weiteren wurden im ersten Schritt der Grundausslegung Erfahrungswerte über realistische Flussdichten im Luftspalt und Blechpaket, zulässige Frequenz im Blechpaket sowie Stromdichte der Wicklung zugrunde gelegt. Der analytischen Grundausslegung folgte die Überprüfung der Ergebnisse mit einer statischen und transienten 2D FEM Simulation. Diese dient immer zur genaueren Berechnung der relevanten Maschinengrößen: Drehmoment, Spannung, Rotorfeld, Statorfeld, Rastmoment und Flussdichteverteilung und- Verläufe.

2.2.2.1 Analytische Auslegung

Analytische Auslegung erfolgte in tabellarischer Form. Zusätzlich zu den in der Spezifikation beschriebenen Maschinengrößen werden folgende physikalische Größen angesetzt:

- maximale Frequenz im Stator: $f_{\max} = 2000\text{kHz}$
- angenommene Induktion im Luftspalt: $B_{\delta} = 0,8\text{T}$
- maximale Flussdichte im Statorzahn: $B_{\text{zahn}} = 1,5\text{T}$
- maximale Flussdichte im Statorrückschluss: $B_{\text{stator}} = 1,2\text{T}$
- maximale Flussdichte im Rotorrückschluss: $B_{\text{rotor}} = 2,0\text{T}$

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Die analytischen Grundgleichungen für eine Gleichstrommaschine lauten:

für das Rotor-Drehmoment:

$$\mathbf{M} = \mathbf{B}_\delta * \mathbf{L} * \mathbf{I}_\Sigma * r_\delta \quad \text{wo} \quad \mathbf{L} = 2\mathbf{p} * \mathbf{I}_{fe} * \mathbf{N} \quad \text{und} \quad \mathbf{I}_\Sigma = \mathbf{m} * \mathbf{I}_{\text{phase}} * \mathbf{ED}$$

und für die induzierte Spannung in einer Phase:

$$\mathbf{U} = \mathbf{B}_\delta * \mathbf{L} * \mathbf{v} \quad \text{wo} \quad \mathbf{L} = 2\mathbf{p} * \mathbf{I}_{fe} * \mathbf{N} \quad \text{und} \quad \mathbf{v} = 2\pi * r_\delta * \mathbf{n} / 60$$

mit den bekannten / angenommenen Größen: Summenstrom $\mathbf{I}_\Sigma = 500\text{A}$, Rotordrehzahl $\mathbf{n} = 0 \dots 12000\text{min}^{-1}$, Strom-Einschaltdauer $\mathbf{ED} = 0,8$ (**Erfahrungswert**) und den unbekannt / noch zu bestimmenden Größen: Luftspaltradius r_δ , Eisenlänge \mathbf{I}_{fe} , Phasenanzahl \mathbf{m} , Polpaarzahl $2\mathbf{p}$, Windungszahl \mathbf{N} , sowie der Breite und der Höhe der Zähne \mathbf{b}_{za} , \mathbf{h}_{za} und Dicken der magnetischen Rückschlüsse im Stator \mathbf{h}_{sr} und Rotor \mathbf{h}_{rr} und der Magnetdicke \mathbf{h}_{pm} .

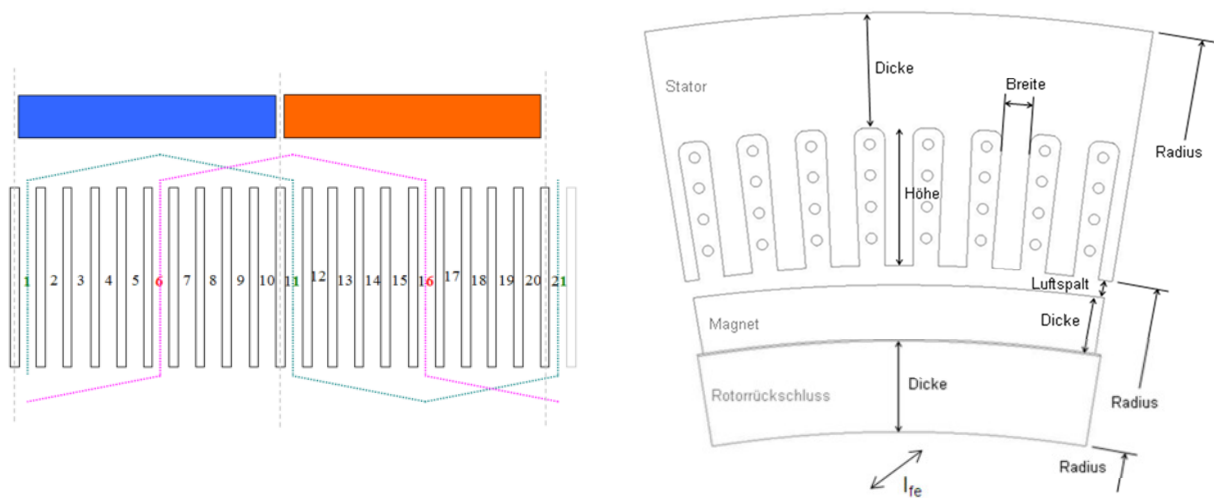


Abbildung 4: Prinzip der Wellenwicklung (Phase 1 und 6 dargestellt), erster Entwurf des magnetischen Kreises

Die Abbildung 4 zeigt das Wickelschema einer Wellenwicklung sowie den groben Entwurf des magnetischen Kreises.

Bei dieser Auslegung entsteht in der Elektromaschine ein maximales Drehmoment: $\mathbf{M} = 308\text{Nm}$. Die Drehmomentanforderung von $\mathbf{M} = 300\text{Nm}$ ist erreicht.

Bei einer maximalen Drehzahl von $\mathbf{n} = 12000 \text{min}^{-1}$ entsteht in einer Phase die induzierte Spannung $\mathbf{U} = 775\text{V}$. Die Spannung überschreitet erwartungsgemäß die Grenze von $\mathbf{U}_{\text{max}} = 350\text{V}$. Notwendige Maßnahme zur Spannungsreduktion ist ein geeignetes Feldschwächverfahren, welches in diesem Spezialfall mittels mechanischer Anpassung der Maschinenkonstante realisiert wurde (Konstruktion dazu siehe Abschnitt 2.4.2). Dabei besteht der Rotor aus zwei mechanisch getrennten Rotorschalen, welche axial verschiebbar sind. Mit steigender Drehzahl fahren die Rotorschalen axial auseinander, so dass nur ein definierter Teil der Wicklung dem Erregerfeld ausgesetzt ist. Die aktive Leiterlänge (und somit die Flussverketung) sinkt mit der Drehzahl und die Spannung bleibt entsprechend konstant.

2.2.2.2 FEM Berechnung

FEM basierte Berechnungsverfahren stellen ein unverzichtbares Werkzeug bei der Berechnung elektrischer Maschinen dar. Auch im Fall einer analytischen Grundausslegung sind FEM Berechnungen ein logischer Schritt um die bislang errechneten Größen zu verifizieren. Ein

einfacher analytischer Entwurf beschreibt die Größen ideal. Lokal im Maschinenquerschnitt können sich aber durchaus Effekte ausprägen, die nur mittels FEM erfasst werden können.

Für die FEM Berechnungen wurde das Programm *Maxwell* angewendet. Dabei wurde der Schwerpunkt zuerst in die 2D Simulation gelegt, Flussdichte in axialer Richtung wird dabei vernachlässigt. Mit dem Programm *Maxwell* wurden statische Punkte (Flussdichte im Querschnitt, Drehmoment bei konstantem Strombelag) sowie transiente Vorgänge (Fluss, induzierte Spannung) berechnet. Des Weiteren können mit der FEM Simulation Rastmomente gerechnet werden, die analytisch nur sehr ungenau zu bestimmen sind.

FEM 2D Modellbildung

Das Modell in Maxwell 2D wurde parametrisch aufgebaut. Somit ist gewährleistet, dass Änderungen in der Geometrie des Modells für die späteren Optimierungen der Elektromaschine mittels Änderung der entsprechenden Variablen sehr einfach umsetzbar sind. Mit dem Einsatz entsprechender Randbedingungen an den Kanten des Modells ist es möglich nur ein Segment des gesamten Querschnitts zu berechnen. In diesem Fall erstreckt sich das Segment über eine Magnetbreite (Abbildung 5).

Die entsprechenden Bereiche in dem Modell müssen mit Werkstoffkennlinien der weichmagnetischen und hartmagnetischen Werkstoffe beschrieben werden. Aufgrund der hohen möglichen Frequenzen sowie den Gradienten dB/dt im Statorblechpaket ist der Einsatz eines dünnen Bleches erforderlich. Damit später die Erkenntnisse in die Realität übertragbar sind, muss in der Simulation der entsprechende Werkstoff verwendet werden. Aus [13] ist ein Werkstoff mit der Bezeichnung 10JNEX900 bekannt. Dieser hat eine Blechdicke von 0,1mm, einen Siliziumanteil von 6,5%, ist auch bei hohen Gradienten dB/dt sehr verlustarm und wird in den weiteren Schritten im Stator eingesetzt.

Der Rotor beinhaltet das Vollmaterial Stahl C45 und der Magnetwerkstoff hat die Bezeichnung Bakker BM38SH mit $J_r = 1,10\text{T}$ und $H_{cJ} = -890\text{kA/m}$.

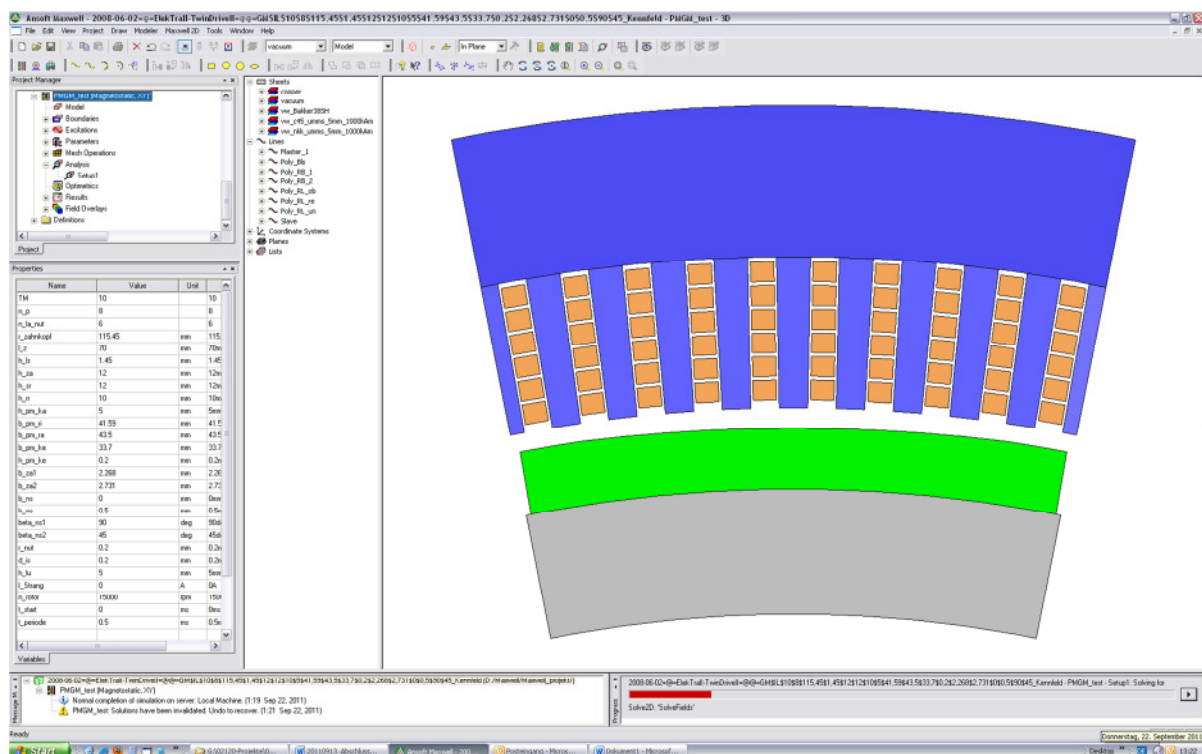


Abbildung 5: Simulationsumgebung- und Modellgeometrie in Maxwell 2D

FEM 2D statisch

Mit der statischen 2D FEM Simulation wurden die Flussdichten im Querschnitt der Elektromaschine sowie das Drehmoment überprüft.

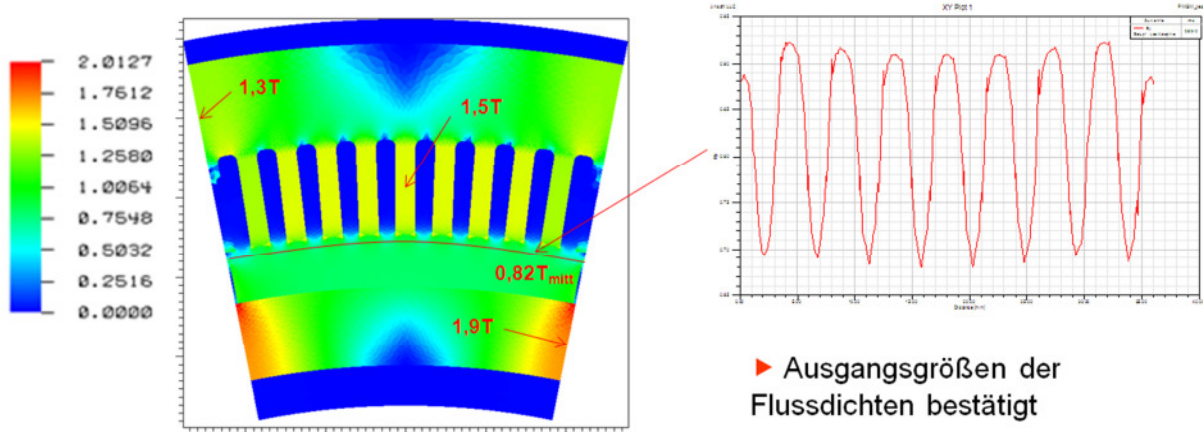


Abbildung 6: Flussdichteverteilung und örtlicher Verlauf der Luftspaltinduktion ohne Bestromung

Aus den Simulationsergebnissen in der Abbildung 6 geht hervor, dass die im Abschnitt 2.2.2.1 vorgegebenen Flussdichten eingehalten wurden und die angenommene Luftspaltinduktion ebenfalls richtig ist.

Das Drehmoment kann mit einem analytischen Ansatz nur unter idealen Voraussetzungen bestimmt werden. Dabei können z. B. Nichtlinearitäten des Werkstoffes, die sich auf die Drehmomentbildung nennenswert auswirken, nicht genau genug abgebildet werden. In dem FEM Modell wurde der Summenstrom bis 1600A eingestellt und das Drehmoment berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass das Drehmoment bis 700A Summenstrom eine lineare Abhängigkeit von Summenstrom aufweist. Erst bei einem Summenstrom $I_{\Sigma} > 700A$ treten Nichtlinearitäten auf (Abbildung 7 a)). Diese Erkenntnis ist für die Ansteuerung der Elektromaschine von hoher Wichtigkeit. Die Feldbilder in der Abbildung 8 zeigen, dass es bei dem Summenstrom $I_{\Sigma} = 1000A$ zu einer sichtbaren und nennenswerten Feldstärke (rechts der Modellmitte) bzw. Feldschwächung (links der Modellmitte) kommt. Das Drehmoment ist dadurch nur geringfügig betroffen.

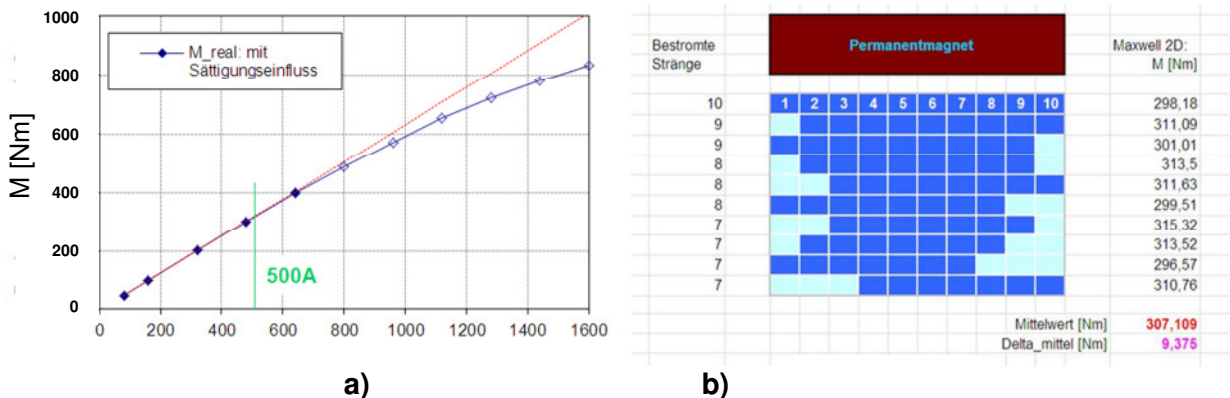


Abbildung 7: Drehmoment in Abhängigkeit vom a) Summenstrom, b) Strombelag.

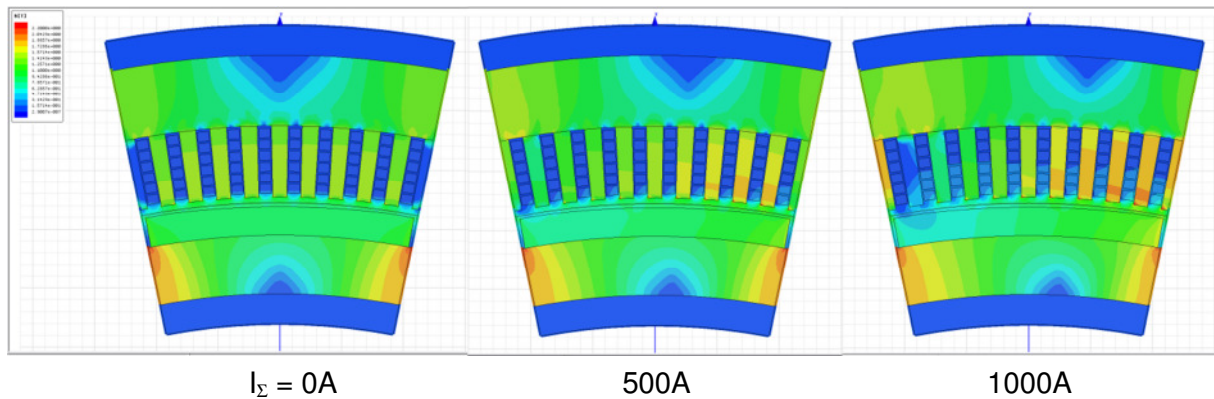


Abbildung 8: Verteilung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit vom Summenstrom

Weiter wurde in dem Modell der maximale Summenstrom $I_{\Sigma} = 500\text{A}$ in 7 bis 10 Stränge systematisch aufgeteilt. Das Drehmoment bleibt dabei größtenteils unabhängig von der Art der Bestromung d. h. Strombelag (Abbildung 7 b)). Dieses Ergebnis zeigt, dass im Fall einer Phasenstörung (Defekt in der H-Brücke) die Drehmomentbildung durch andere Phasen, unter der Voraussetzung, dass der dann höhere Phasenstrom den Maximalwert nicht überschreitet, sichergestellt werden kann. Insgesamt zeigte die Untersuchung, dass der magnetische Kreis der Elektromaschine bei 500A Summenstrom noch nicht an seine Grenzen stößt.

FEM 2D transient

Die transiente FEM Simulation wurde angewendet um zeitabhängige Größen wie induzierte Spannung zu berechnen. Gleichzeitig kann in dieser Berechnung sehr bequem das Rastmoment mit berechnet werden.

Der Rotor der Elektromaschine im Modell wird mit definierter Drehzahl gedreht und aus der so entstehenden zeitlichen Änderung der Flussverkettung $d\Psi/dt$ der gesuchte Spannungsverlauf $U_i(t)$ berechnet. Die Ergebnisse der transienten Simulation dienen in diesem Auslegungsstadium nur zum Abgleich der analytischen Ergebnisse. Die endgültigen Zeitverläufe liegen nach Abschluss des Optimierungsschrittes vor.

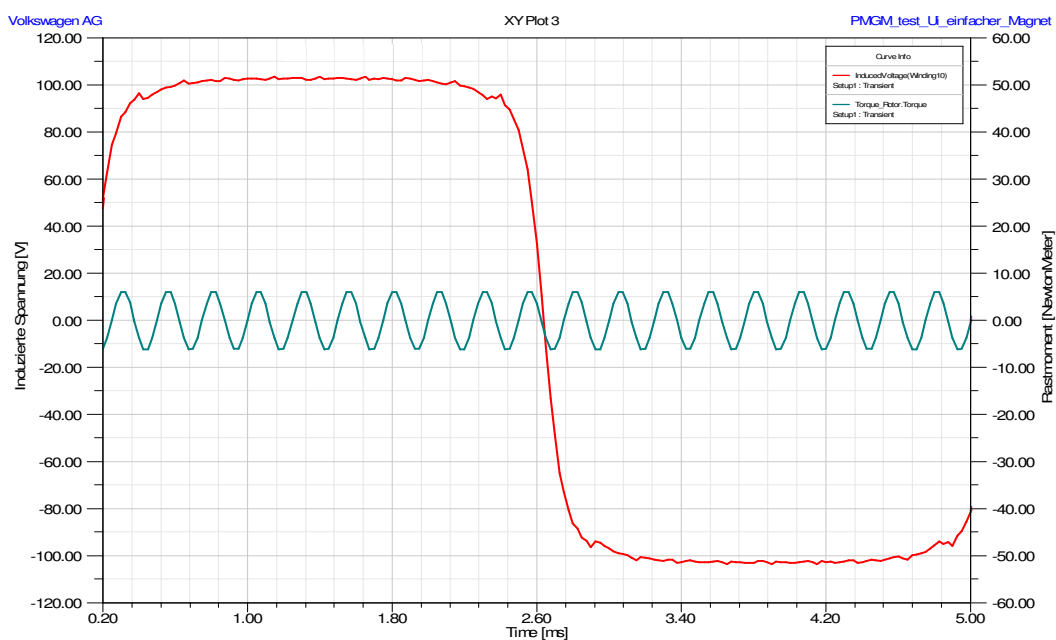


Abbildung 9: Zeitverlauf der induzierten Spannung bei $n = 1500\text{min}^{-1}$, Zeitverlauf Rastmoment

Aus der induzierten Spannung ergibt sich bei $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ die Maximalspannung $U_{i,\text{max}} = 824 \text{ V}$. Dieser Wert weicht geringfügig von der Vorgabe und dem analytisch berechneten Wert (780V) ab. Der hauptsächliche Grund für die Abweichung ist ein geringfügig unterschiedlicher Wert der in der analytischen Berechnung angenommenen mittleren Luftspaltinduktion.

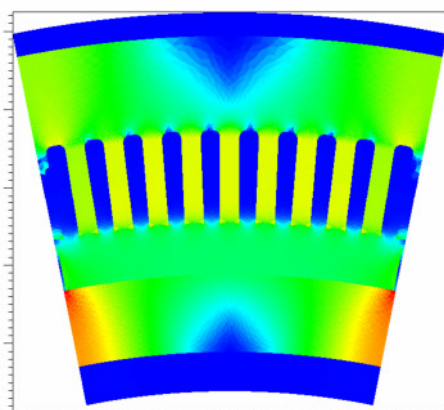
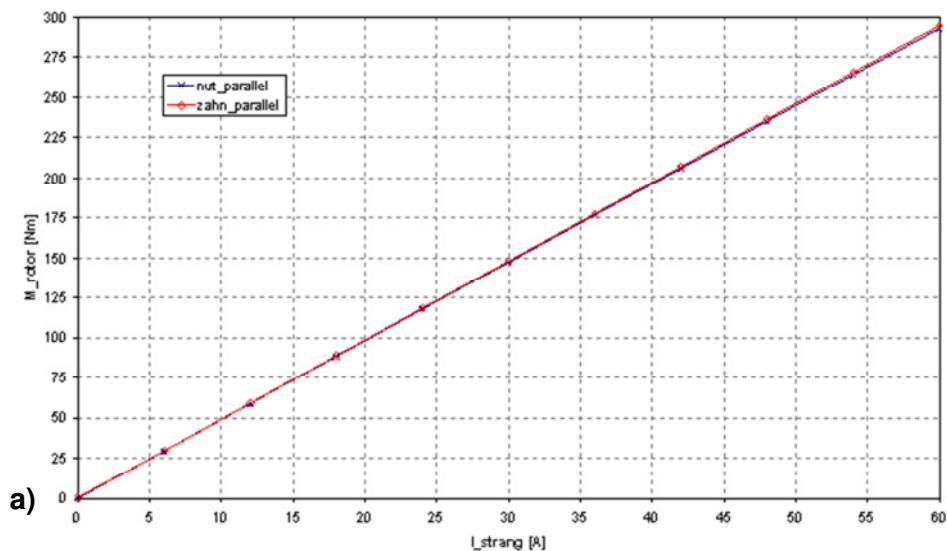
2.2.3 Optimierung

Nach dem Abschluss der Grundausslegung wurden gezielt Optimierungsberechnungen durchgeführt. Die Berechnungen konzentrierten sich auf den Bereich des Stators (Statorzähne) und den Bereich der Permanentmagnete (Form):

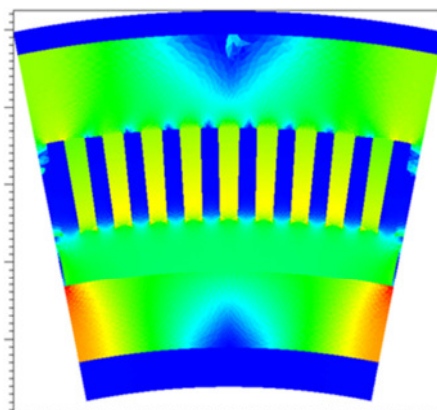
- Optimierung Zahn- Nutgeometrie -> Einfluss auf das Fertigungsverfahren
- Optimierung Magnetgeometrie -> Einfluss auf induzierte Spannung, Rastmoment

2.2.3.1 Optimierung der Zahn- Nutgeometrie

Die Zahn- Nutgeometrie bietet im Allgemeinen Potenzial zur Optimierung der Elektromaschine hinsichtlich späterer Bewicklung des Statorpaketes. Bislang wurden parallele Zähne und entsprechend Nuten mit nicht parallelen Kanten angenommen. Um aber einen möglichst hohen Kupfer-Nutfüllgrad mit einer geeigneten Drahtgeometrie zu erreichen ist es günstiger die Nutenkanten parallel und die Zähne nicht parallel zu gestalten.



b)



c)

Abbildung 10: a) Drehmoment bei parallelen Zähnen und parallelen Nuten. b) Flussdichte in der Geometrie mit parallelen Zähnen. c) Flussdichte in der Geometrie mit parallelen Nuten

Bei diesem Ansatz muss überprüft werden, in wie fern sich diese Änderung auf die Eigenschaften der Elektromaschine, insbesondere die Drehmomentbildung, auswirkt. In der Abbildung 10 ist das entsprechende Rechenergebnis dargestellt und zeigt, dass die parallelen Nuten keinen nennenswerten Einfluss auf das Drehmoment haben.

2.2.3.2 Optimierung der Magnetgeometrie

Zum Zweck einer optimalen Modellbildung ist der Permanentmagnet mit 5 Variablen beschrieben. Die Besonderheit dabei ist die Möglichkeit, auf der Magnetoberfläche lokal unterschiedliche Radien zu realisieren: Variablen d und α . Wie in der Abbildung 11 gezeigt, kann der Magnet an seiner Oberfläche geometrisch angepasst werden.

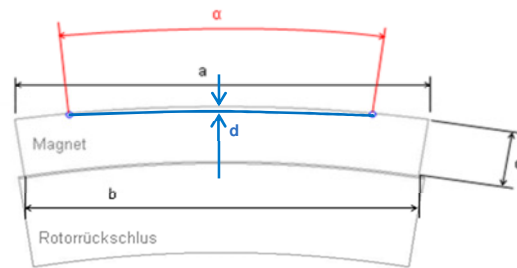


Abbildung 11: Parametrisierung der Magnetgeometrie

Wie in der Abbildung 12 dargestellt, kann durch die Variablenkombination d und α die induzierte Spannung mehr in Richtung Rechteck eingestellt werden. Auf das Rastmoment hat diese Optimierungsmaßnahme keinen Einfluss. Aufgrund der geeigneteren Spannungsform wurde in den weiteren Schritten die optimierte Geometrie **B** als Referenzgeometrie eingesetzt.

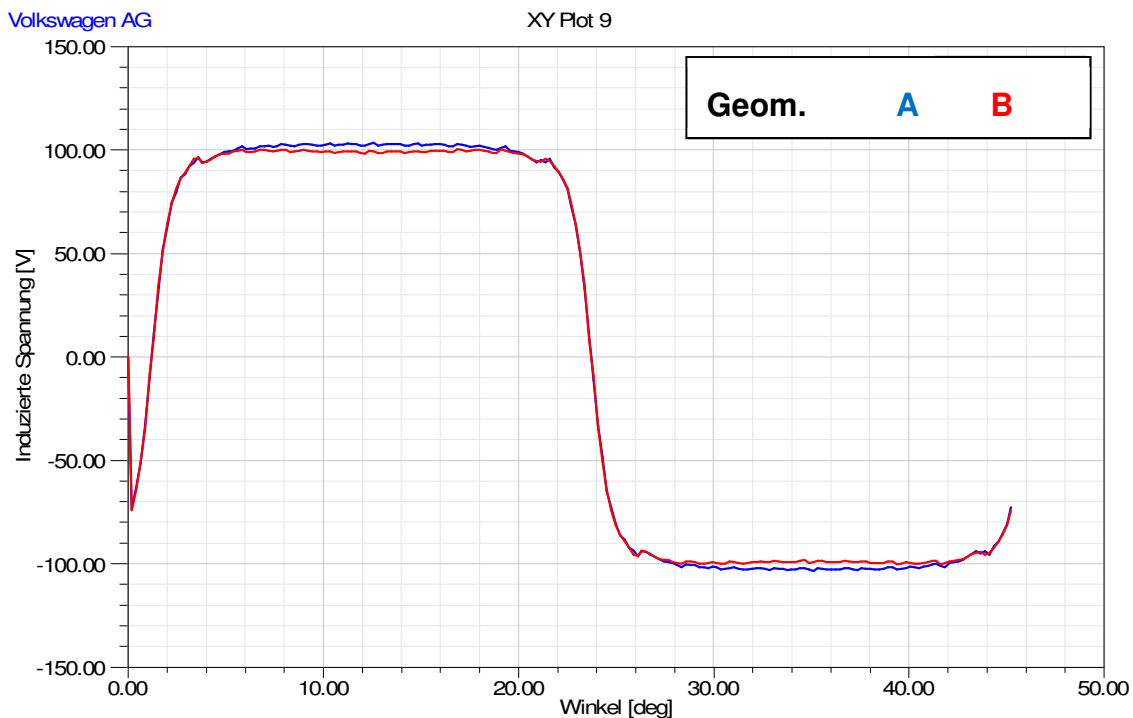


Abbildung 12: Verlauf der induzierten Spannung bei geringfügig unterschiedlicher Magnetform

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

2.2.3.3 Wicklung

Die Art der Wicklung hat einen bedeutenden Einfluss auf das Betriebsverhalten einer Elektromaschine. In dem aktuellen Entwurf wurde eine regelmäßige Wellenwicklung mit 1 Nut pro Pol und Phase und der Schrittweite von 10 gewählt. Diese Wicklungsart zeichnet sich durch ihren einfachen Aufbau und ermöglicht einen hohen Fluss zur Drehmomentbildung.

Da auch im Wickelkopf klare und regelmäßige Struktur herrscht, ist dieser sehr kompakt. Die Form des Drahtquerschnitts wurde so gewählt, dass dieser optimal in die Nut passt und einen hohen Kupfer-Füllfaktor ermöglicht. Die Wicklung ist so ausgelegt worden, damit ein Maximum der Flusses und somit bei einem definierten Strom ein maximales Drehmoment in der Elektromaschine entsteht. Einen weiteren Schwerpunkt stellte dabei der hohe Kupfer-Füllfaktor dar.

Die Optimierungen sind an dieser Stelle abgeschlossen worden, hinsichtlich der Akustik ist die Wicklung nicht optimiert worden. Der Aufbau der Wicklung sowie der Prozess der Stator-Bewicklung ist in Kapitel 2.4.4 detaillierter beschrieben.

2.3 Abschätzung der Verluste

Bereits in der Auslegungsphase ist die Kenntnis der im Betrieb der Elektromaschine entstehenden Verlustleistung wichtig. Diese stellt ferner den Eingang für die richtige Dimensionierung der Maschinenkühlung dar.

Die Verluste in der Elektromaschine setzen sich aus den Kupferverlusten in der Wicklung, den Eisenverlusten hauptsächlich im Stator, geringfügig im Rotor und den mechanischen Verlusten in Lagern sowie durch die Luftreibung zusammen. Dazu kommen noch die Durchlass- und Schaltverluste der Kommutierungselektronik. Die gesamte Verlustleistung wird in der Elektromaschine in Wärme umgesetzt welche abgeführt werden muss. Für die Dimensionierung der Komponenten der aktiven Wasserkühlung sind vor allem die Verluste im Stator relevant. Diese sollen in den nächsten Schritten behandelt werden.

Kupferverluste

Kupferverluste entstehen in der stromdurchflossenen Wicklung der Elektromaschine und sind unter Annahme eines rechteckförmigen Phasenstromes mit einer Einschaltdauer ED und dem Summenstrom I_{Σ} mit folgenden Gleichungen beschrieben:

$$P_{v,cu} = R_{20} * (1 + 0,0039 * (T - 20 \text{ °C})) * I_{\Sigma}^2 / (m * ED).$$

Eisenverluste

Eisenverluste als Summe der Hysterese-, Wirbelstrom- und Zusatzverluste entstehen in Teilen der Elektromaschine, welche ferromagnetische Eigenschaften aufweisen. Dazu gehören der Stator, der Rotor und die Permanentmagnete. Anders als der Rotor und die Permanentmagnete ist der Stator einem magnetisierenden Feld mit einem hohen Gradienten dB/dt ausgesetzt. Folglich wird die meiste Verlustleistung im Stator umgesetzt.

Die Eisenverluste sind Werkstoffspezifisch und hängen darüber hinaus auch von dem Bearbeitungsverfahren ab. Die Bearbeitungsverfahren Stanzen, Leserschneiden, Drahterodieren wirken sich deutlich unterschiedlich auf die Verluste aus. Bei der Fertigung der aktuellen Elektromaschine wurde Drahterodieren zur Statorfertigung eingesetzt.

Die Berechnung der Eisenverluste wurde in Rahmen der FEM Simulation durchgeführt. Das FEM Programm beschreibt und rechnet die Eisenverluste mit folgendem Ansatz:

$$p_{v,fe} = k_h * f * B^2 * + k_c * (f * B)^2 + k_e * (f * B)^{1,5} \text{ in [W/m}^3\text{]}$$

Die 3 Koeffizienten k_h , k_c , und k_e werden in dem FEM Programm aus einem Verlustkennfeld $p_{fe}(B, f)$ errechnet. Es ist zweckmäßig, dass das Kennlinienfeld so gut wie möglich bestimmt

wird, damit die Berechnung der Eisenverluste auch realitätsnahe Ergebnisse liefert. Dafür wurden mit der in [13] beschriebenen Messanlage an geeigneten Messobjekten diese Verlustkennfelder $p_{fe}(B, f)$ eingemessen (Abbildung 13). Mit dem Primärstrom $i_1(t)$, der mit der Messanlage beliebig eingepreßt werden kann, wird in einem Messobjekt entsprechend zeitlich veränderlicher magnetischer Fluss (definierter Verlauf der Flussdichte) erzeugt. Diese führt zu Verlusten die mit der Messanlage gemessen werden.

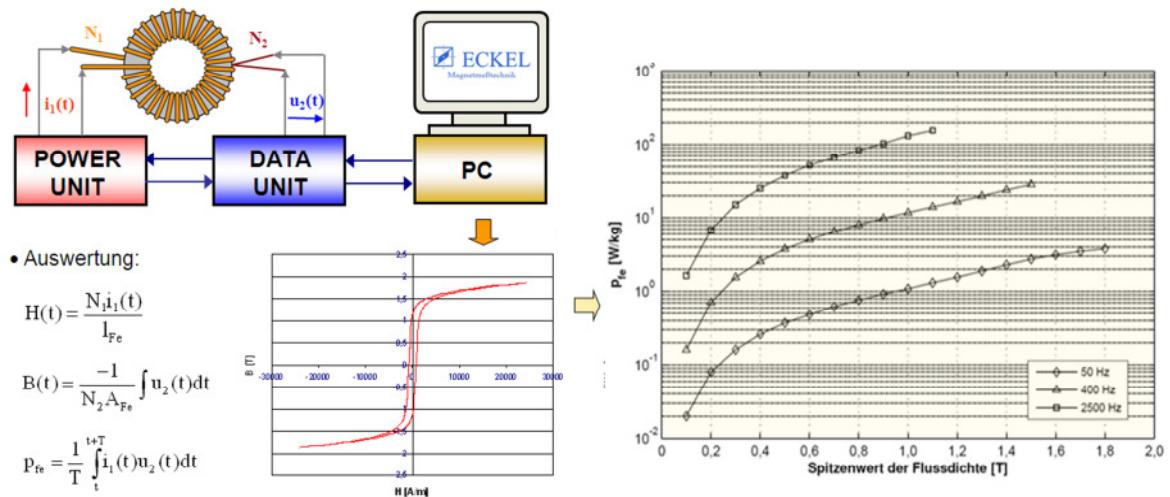


Abbildung 13: Messverfahren zur Bestimmung der Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe. Kennlinienfeld $p_{fe}(B, f)$ bei sinusförmigem Verlauf $B(t)$

Die Erfassung realitätsnaher Eisenverluste ist primär von dem Messobjekt abhängig. Für die aktuellen Messungen wurde als Messobjekt ein Ringkern aus gestapelten Blechen eingesetzt, der mit dem gleichen Bearbeitungsverfahren gefertigt wurde wie der Stator. Des Weiteren sind in einem Ringkern auch die weiteren Einflüsse: Kristallanisotropie, leitend verbundene Schnittkanten und unvollkommene Blechisolierung. Somit sind in nur einem Messobjekt alle Einflussmechanismen auf die Eisenverluste umgesetzt, das gemessene Kennlinienfeld bildet daher die realitätsnahen Eisenverluste ab.

Gesamtverluste im Stator der Elektromaschine

Die Gesamtverluste im Stator werden wie folgt gebildet:

$$P_{v, \text{Stator}} = P_{v, \text{cu}} + P_{v, \text{fe}}$$

Für die Berechnung der Kupferverluste wurde eine Wicklungstemperatur von 170°C angesetzt. In der Abbildung 14 sind die Verluste im Stator bei einer Spannung von $U_n = 300V$ dargestellt.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

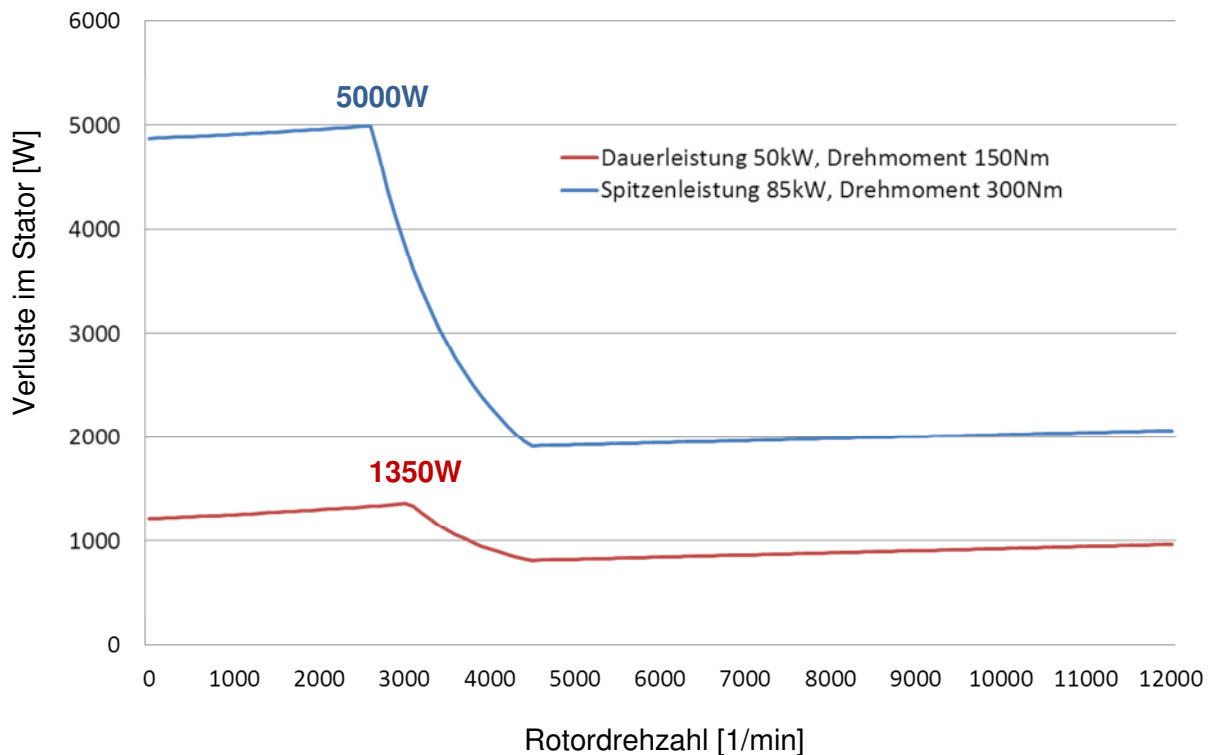


Abbildung 14: Statorverluste entlang der Linien des Dauerdrehmomentes / Dauerleistung und des Maximaldrehmomentes / Maximalleistung bei einer Wicklungstemperatur von 170°C und der Spannung von $U_n = 300V$

Im Dauerbetrieb sind unter idealen Randbedingungen (idealer Rechteckstrom) maximal 1350W Verlustleistung im Stator zu erwarten. Das Kühlkonzept muss in der Lage sein, diese Verlustleistung dauerhaft abzuführen. Im Betrieb der Spitzenleistung entstehen im Stator kurzzeitig bis zu 5000W Verluste. Die Kühlung muss diese Verlustleistung nicht dauerhaft abführen. Werden die kritischen Temperaturen in der Elektromaschine erreicht, muss entsprechend die Leistung reduziert und die Elektromaschine abgekühlt werden. Das Kühlkonzept und die entsprechenden Tests sind im Abschnitt 2.8.1 näher beschrieben.

2.3.1 Auslegung der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik gliedert sich in die Endstufe, welche die Komponenten Leistungsmodule, Treiber und Kondensator nebst Stromverschienung umfasst, und in die Ansteuerelektronik mit Controller, Ansteuerlogik, Fahrzeug- und Treiberschnittstelle sowie Sensorik und Sensorauswertung. Die nach Stand der Technik in einer separaten Komponente untergebrachten Funktionen sind hier aufgelöst worden und an die Maschine integriert. Dadurch lässt sich auf den Aufwand zusätzlicher Filterkomponenten zur Kompensation von Kabelinduktivität verzichten. Einen Überblick über das Leistungselektronische Gesamtsystem gibt *Abbildung 15*.

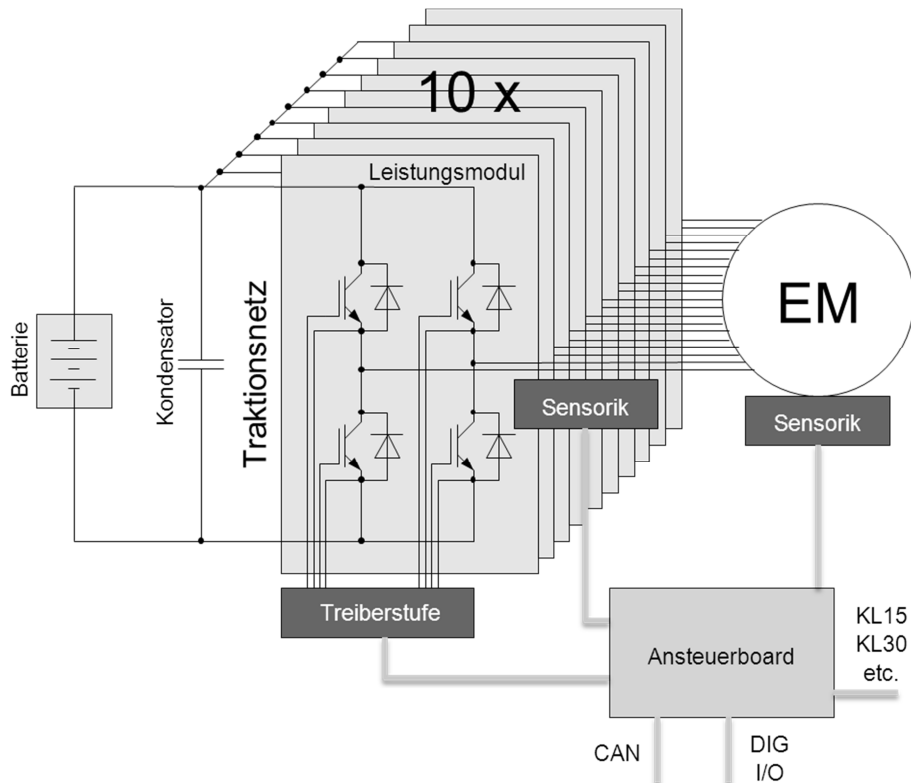


Abbildung 15: Prinzipdarstellung Leistungselektronisches Gesamtsystem

Entsprechend dem realisierten Aufbau waren an dieser Stelle die zehn Leistungsmodule nach der Topologie einer Vollbrücke und der Kondensator mit integrierter Stromverschiebung zu dimensionieren. Die zugrunde liegenden Maschinenanforderungen ergaben nach den durchgeführten Simulationen bei einer Zwischenkreisspannung von maximal 400V einen maximalen Phasenstrom von 50 A. Die Schaltfrequenz ist bei einem gesteuerten Betrieb gleich der elektrischen Polwechselfrequenz und damit kleiner als 2 kHz. Bei Anwendung einer PWM zur Umsetzung der integrierten Tiefsetzstellerfunktion ist dagegen einer Schaltfrequenz von ca. 30 kHz zu fordern. Für den Kondensator mit einer Betriebsspannung bis 400 V ergibt sich eine notwendige Kapazität von 300 μF , eine DC-Stromtragfähigkeit von 300 A und einer hohen effektiven Ripplestrombelastung. Die Temperaturanforderungen ergeben sich aus der maximalen Kühlmitteltemperatur von 60°C. Das führt gemäß den durchgeführten Rechnungen zu maximal 80°C Umgebungstemperatur für die Elektronikkomponenten.

2.4 Konstruktion und Bau einer prototypischen Elektromaschine

In diesem Arbeitspaket wird die Elektromaschine gefertigt. Die wesentlichen Bauteile hierzu stellen der Stator, der Rotor und die Vorrichtungen zur Integration dar.

2.4.1 Mechanische Konstruktion

Die Konstruktion einer elektrischen Maschine umfasst

- die Übernahme der Ergebnisse aus der Magnetfeldauslegung in die reale Fertigung von Statorblechen, Rotorgeometrie und Magnetmaterialien sowie
- die Konstruktion des Gehäuses unter Einbindung der Kühlanbindung und Anschlusssysteme für Kühlmedien und elektrischer Leistung.

In Paket Konstruktion und Bau einer prototypischen Elektromaschine wurde, ausgehend von den in der Konzeptspezifikation spezifizierten Parametern die Konstruktion der Elektroma-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

maschine vorgenommen. Hierzu wurde der Rotor der Maschine, der Stator, die elektrische und mechanische Anbindung Rotor / Stator und das Gehäuse des Gesamtantriebs konstruiert.

AP 3 beinhaltet im zweiten Teil die Fertigung von Statorn und Statorgehäusen. Es wurden fünf Statorgehäuse gefertigt und sieben Statorn bewickelt und geprüft. Die Fertigung der Elektromaschine stellte einen sehr aufwendigen Prozess dar, der in enger Zusammenarbeit mit Partnerfirmen stattfand. Zwei Systeme wurden schließlich komplettiert und in ein Gehäuse integriert, welches die Prüfung des Antriebs auf dem Prüfstand ermöglichte.

2.4.2 Auslegung der Verstellung des Rotors

Problembeschreibung

Bestimmung des Kraftverlaufs, der zur axialen Verstellung der Rotorhälften der Maschine zwecks Anpassung der Maschinenkonstante aufgebracht werden muss. Die Kenntnis der Verstellkraft in Abhängigkeit von der axialen Rotorposition ist für die Dimensionierung der mechanischen Komponenten des Verstellmechanismus von hoher Wichtigkeit.

Lösungsansatz

Zur Verfügung stehen generell zwei unabhängige Methoden: Experiment (Messung der Kräfte) und numerische Magnetfeldberechnung (Berechnung der Kräfte). Durch die Kombination beider Methoden entsteht ein Lösungsweg, der die Vorteile der beiden Methoden verbindet.

Vorgehensweise

Im 1. Schritt werden ein vorhandener Statorsegment und zwei Rotorschalen mit jeweils 2 ganzen und 2 halben Magneten zu einem magnetischen Kreis in Außenläufer-Bauweise aufgebaut. Der Statorsegment wird mechanisch festgehalten und die Rotorschalen können sich axial auf einem Schlitten bewegen (s. Abbildung 16).

Mittels Kraftmessdosen kann die Verstellkraft pro Rotorschale in Abhängigkeit von der axialen Rotorposition messtechnisch bestimmt werden.

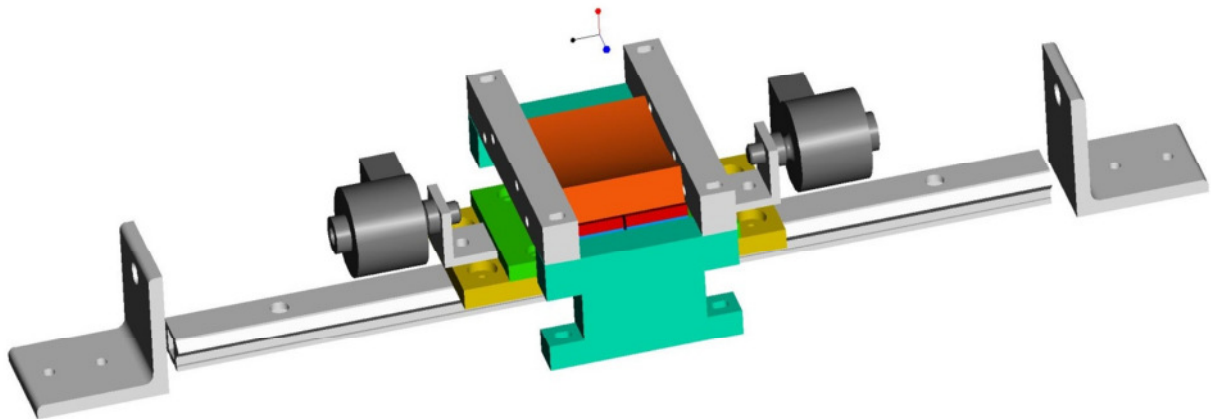


Abbildung 16: Messaufbau zur Bestimmung der Verstellkraft

Im 2. Schritt wird der magnetische Kreis in Abbildung 17 in einem FEM - Modell (Maxwell 3D) abgebildet und die Verstellkräfte (F_z) pro Rotorschale in Abhängigkeit von der axialen Rotorposition berechnet. Nach der Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse der numerischen Berechnung mit dem Experiment können im Schritt 3 die Verstellkräfte ausschließlich durch die numerische Feldberechnung bestimmt werden. Somit entfällt die Notwendigkeit eines mechanischen Aufbaus.

Modellbildung, Definition der Rechenergebnisse, Berechnung

Mittels der FEM – Software Maxwell 3D statisch wird der zu untersuchende magnetische Kreis modelliert. Dabei werden zur Materialbeschreibung der weichmagnetischen Werkstoffe ausschließlich selbstgemessene Kennlinien verwendet. Die Vernetzung des Modells führt die Software selbstständig durch.

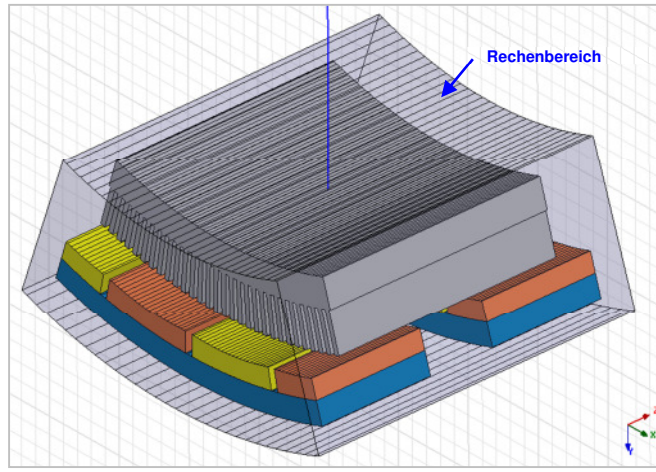


Abbildung 17: Modell des magnetischen Kreises unter Maxwell 3D statisch

Als Ergebnis definiert werden sämtliche Kraftkomponenten, die auf die Rotorschalen und Magnete einwirken. Von Interesse ist dann die Summe axialer Kraftkomponenten auf die jeweilige Rotorschale (F_z). Diese Summe stellt dann praktisch die Verstellkraft pro eine Rotorschale dar. Ferner wird diese Kraft auch als Abbruchkriterium der iterativen Magnetfeldberechnung definiert. Somit kann der Ablauf der Berechnung durch eine zusätzliche relevante Größe gesteuert werden. Die maximale Abweichung wird dabei auf 5% eingestellt.

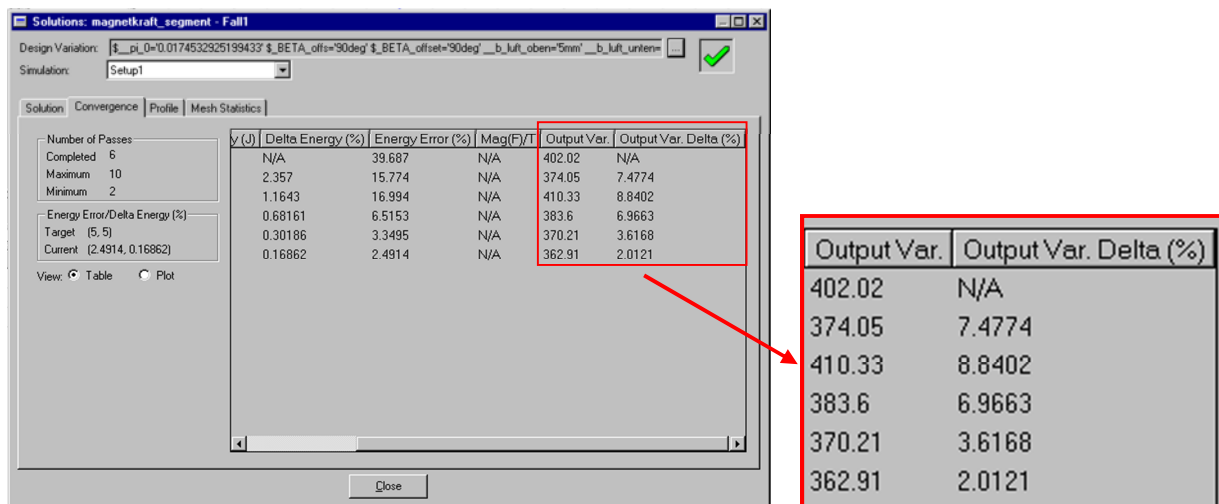


Abbildung 18: Ablauf der iterativen Berechnung unter Verwendung einer zusätzlichen Variablen (Kraft)

Ergebnisse - Vergleich der Kraftverläufe in dem Messaufbau und dem FEM Modell

Verglichen werden die gemessenen Kräfte (Messaufbau in Abbildung 16) und die numerisch berechneten Kräfte (Maxwell 3D statisch).

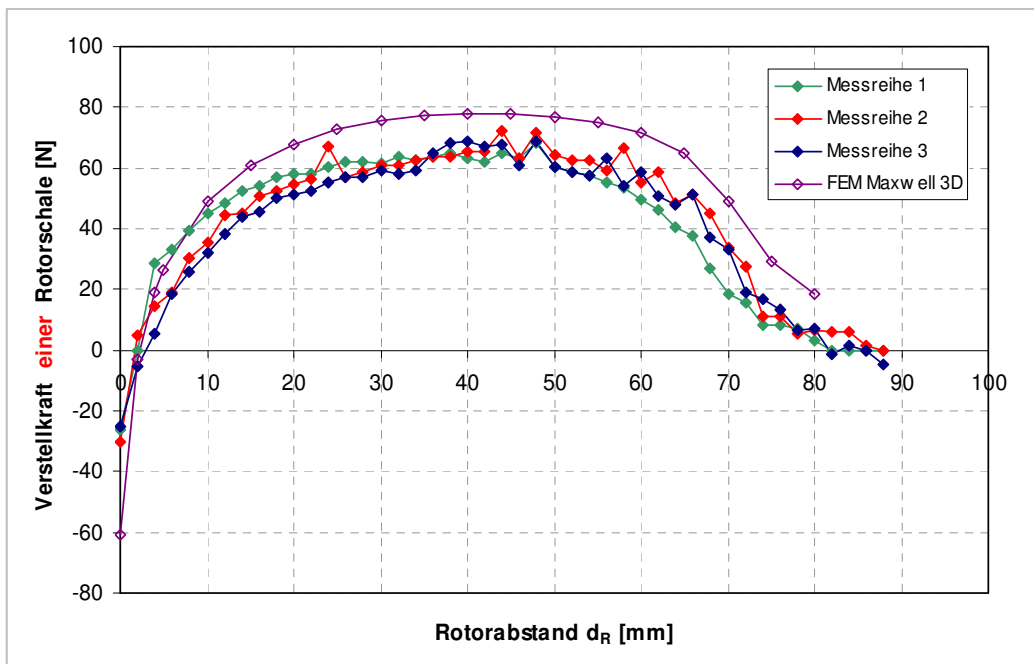


Abbildung 19: Verstellkraft in Abhängigkeit von dem Abstand der Rotorschalen

In Bezug auf die Problematik der Kraftberechnungsverfahren zeigt Abbildung 19 eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Kraftverläufe. Differenzen entstehen dabei durch:

- Rechengenauigkeit (5% Voreinstellung zur Erzielung kürzerer Rechenzeiten)
- evtl. Abweichungen zwischen den realen und den modellierten Werkstoffeigenschaften
- Abweichungen in den Geometrien (hauptsächlich Luftspalthöhe)
- Messfehler der Kraftmessdosen
- Reibung im Schlitten durch radiale Kraftwirkung zwischen Statorsegment und Rotorschale

Die Differenzen lassen sich durch grundlegende Untersuchungen der aufgeführten Ursachen größtenteils verringern. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes werden diese Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt. Das Ergebnis in Abbildung 19 wird somit als Endergebnis präsentiert und die aufgetretenen Differenzen (im Mittel ~ 20%) im Weiteren berücksichtigt.

Berechnung der Verstellkraft der Rotoren

Nach dem der Vergleich unter Abbildung 19 zu einem sehr guten Ergebnis geführt hat, wird die Verstellkraft der Rotoren ausschließlich durch die numerische Feldberechnung bestimmt.

In Abbildung 20 ist das entsprechende Modell und in Abbildung 21 das **Endergebnis** dargestellt.

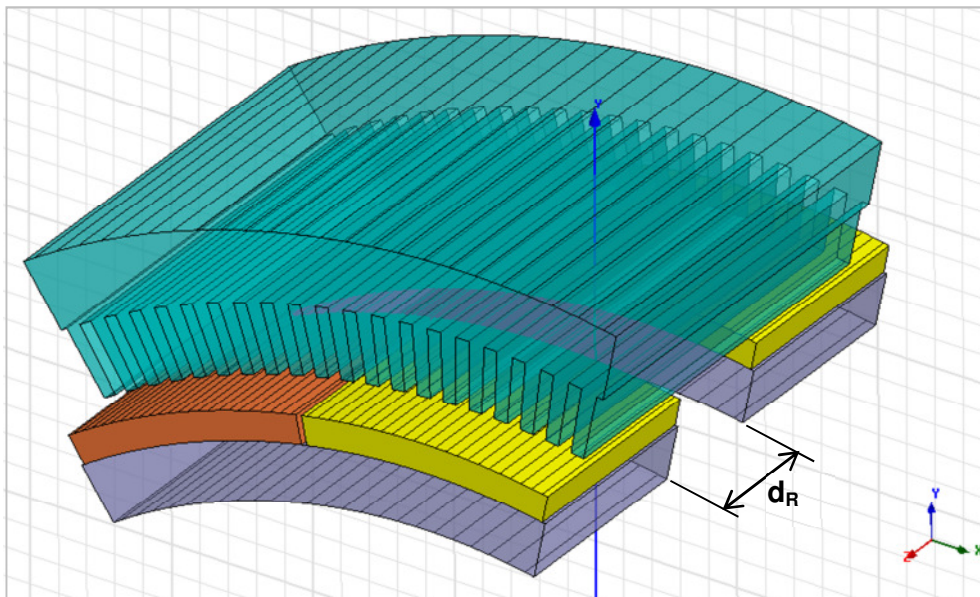


Abbildung 20: Reduziertes Modell in Maxwell 3D statisch

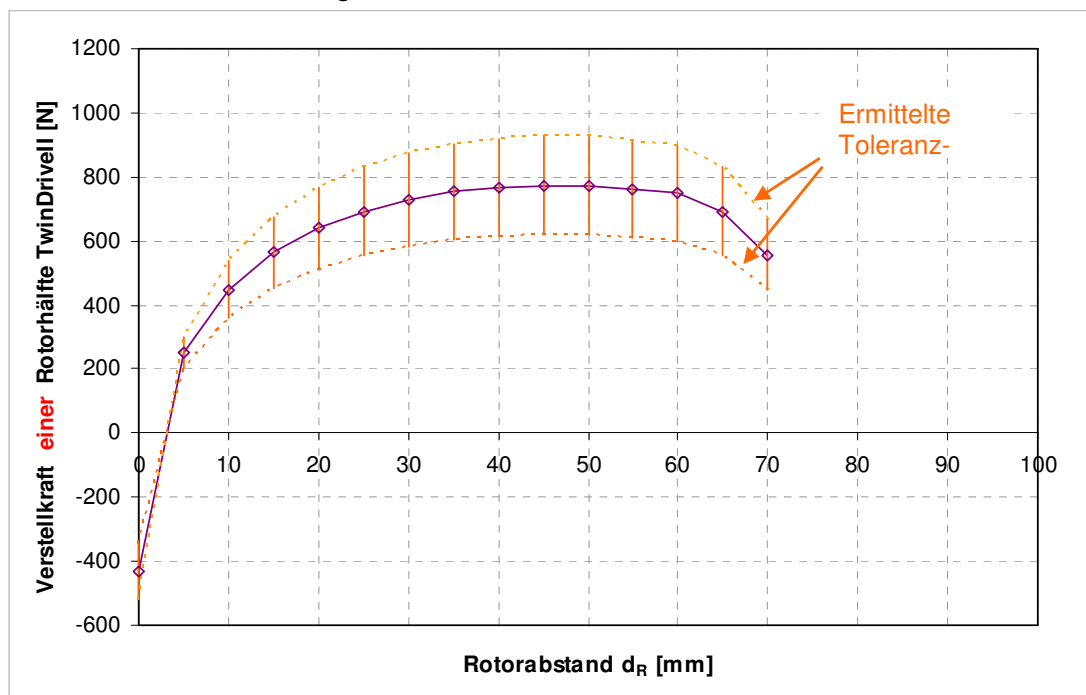


Abbildung 21: Endergebnis: Verstellkraft einer Rotorhälfte LDE-M in Abhängigkeit von dem Rotorabstand

Zusammenfassung Rotorverstellung

Mit einem verifizierten Rechenverfahren wurde die erforderliche Verstellkraft der Rotorhälften bestimmt. Zur Verstellung der Rotorhälften ist nach Abbildung 21 eine maximale Verstellkraft von insgesamt $2 \cdot 800 \text{ N} = 1600 \text{ N}$ erforderlich. Bei Bewertung der Toleranzgrenzen ($\sim 20\%$ Differenz) kann die maximale Verstellkraft sowie deren Verlauf variieren. Die Toleranzen müssen dementsprechend bei der Dimensionierung der Verstellmechanik der Rotoren berücksichtigt werden.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Konstruktion Rotor

Die Konstruktion des Rotors erfolgte auf Basis der Magnetfeldberechnung und den Berechnungen zur geplanten Feldschwächung. Hierzu wurden verschiedene Konzepte der Rotorverstellung erarbeitet und schließlich die Version der Hydraulischen-Fliehkraftverstellung umgesetzt. Bei der Detaillierung wurden drei Drucksysteme und drei Rückstellsysteme als zielführendes System ermittelt und in einer Speichen-Rad-ähnlichen Konstruktion zu einem modular aufgebauten Gesamtsystem kombiniert. Diese Bauart hat den Vorteil, das im Laufe der Erprobungen einzelne Komponenten modifiziert bzw. ausgetauscht werden können ohne das Gesamtsystem komplett neu fertigen zu müssen.

Konstruktion Gehäuse und Kühlung

Die Kühlung der Elektromaschine wird an den Stator angebunden und ist in das Maschinengehäuse zu integrieren. Das Gehäuse besitzt abgestimmte mechanische Schnittstellen zum Getriebe im Fahrzeug, um die Integration der E-Maschine ins Fahrzeug zu ermöglichen.

Bei der Konstruktion von Fahrzeugantrieben im Automobilbereich gilt es eine große Menge an Schnittstellen zu klären und Package-Anforderungen, sowie Systemeigenschaften zu berücksichtigen. Um einen kompakten Antrieb von Elektro- und Hybridfahrzeugen im Leistungsbereich 85 kW zu konstruieren, fiel die Wahl beim Gehäuse auf ein Aluminium-Guss-Gehäuse welches später im Prototyping-Verfahren erstellt und mechanisch nachbearbeitet wird. Das Gehäuse benötigt für diesen speziellen Aufbau mit integrierter Leistungselektronik eine große Anzahl an Zugangsmöglichkeiten und Befestigungsschnittstellen. Weiter müssen in diesem Gehäuse nicht nur die mechanischen Anbindungen ans Fahrzeug und Getriebe vorhanden sein, sondern auch die äußeren Schnittstellen für die Elektromaschine und die integrierte Leistungselektronik. Hierbei handelt es sich zum einen um den Kühlwasser Zu- und Ablauf und zum anderen um Kabeldurchführungen für die Hochvoltleitungen und die Steckverbindungen für die Steuer und Sensorikleitungen.

Bei der Wahl des Statortägers fiel die Wahl ebenfalls auf Aluminium, um ein möglichst leichtes Gesamtsystem zu erstellen. Auch bei dieser Komponente galt es die Anforderungen an die zahlreichen Schnittstellen zu erfüllen. In diesem Fall ist die Kühlung in den Statorträger integriert, der Stator wird als Pressverband gehalten und die Leistungselektronik wird an den verschiedenen Stellen verschraubt. Um eine optimale Kühlung sicher zu stellen, wurde eine Kühlgeometrie ausgelegt, die aus sehr feinen Kanälen besteht. Bei der ausgelegten Geometrie der Kanäle besteht der Vorteil, dass schon bei einem Volumenstrom von 7 Litern eine turbulente Strömung entsteht, die für einen guten Wärmeübergang zum Kühlmedium sorgt.

Diese Anforderungen wurden konstruktiv in eine komplexe Aluminium-Schweißkonstruktion übernommen die sich in das System hochintegriert einfügt und damit eines der wesentlichen Komponenten im Gesamtaufbau darstellt. Es gilt hierbei darauf zu achten, dass die zahlreichen Anforderungen an die Genauigkeit der Komponente mit ausreichender Güte erfüllt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden Leistungselektronik und Elektromaschine gefertigt und zusammengefügt. Somit entstand ein leistungsdichtes und leichtes Gesamttaggregat zum Antrieb von Elektro- und Hybridfahrzeugen im Leistungsbereich 85 kW. (siehe Abbildung 22(a) und Abbildung 22(b))

Der Antrieb beinhaltet eine mehrphasige Synchronmaschine, die über H-Brücken angesteuert wird. Diese Leistungselektronikmodule sind auf der Außenseite eines gemeinsamen Kühlkörpers angeordnet. Somit kann von einer vollständigen Integration der Leistungselektronik an die Elektromaschine gesprochen werden.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	



Abbildung 22: a) CAD Konstruktion Elektroantrieb – b) Gefertigter Elektroantrieb

2.4.3 Fertigung Stator und Statorgehäuse

Die Fertigung des Stators beinhaltet das Stanzen der Elektrobleche als auch die Paketierung und Imprägnierung des Blechstapels. Hierzu sind umfangreiche mechanische Arbeiten notwendig, um die Qualität des Blechpaketes im Hinblick auf Oberflächengüte und sicherer Verklebung sicherzustellen.

Dieser Prozessschritt findet in Zusammenarbeit mit der Firma LCD LaserCut AG statt. Die Statorfertigung stellt einen Kernprozess im Aufbau der Elektromaschine dar und wird von experimentellen Untersuchungen begleitet. Es finden bei Volkswagen Analysen der verwendeten Elektrobleche statt, die insbesondere die

- elektrische Verbindung der Bleche an den Rändern
- in den Blechen entstehenden Wirbelstromverluste vor- und nach der Bearbeitung beinhalten.

Im zweiten Schritt wird in die Statornuten die Motorwicklung eingebracht. Hierbei wird das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Kupferfüllgrad zu erreichen. Nach der Isolation der Nuten und der Vermessung des Stators hinsichtlich Spannungsfestigkeit folgt die Imprägnierung des bewickelten Gesamtstators und die Kontaktierung der Maschinenstränge. Im nachfolgenden Prozess wird der Stator auf den Statorträger, das Statorgehäuse aufgebracht. Der Statorträger beinhaltet das Kühlsystem, eine wesentliche Innovation dieses Vorhabens.

2.4.4 Fertigung Statorblechpaket

Die Statorfertigung stellt einen Kernprozess im Aufbau der Elektromaschine dar und wurde von experimentellen Untersuchungen begleitet.

Um das Ziel der leistungsdichten elektrischen Maschine zu erreichen, ist eine genaue Untersuchung der möglichen Elektrobleche nötig. Die Auswahl der geeigneten Bleche ist hinsichtlich Verlustminimierung im Blechpaket essentiell (siehe **3.4 Abschätzung der Verluste**). Wie dort beschrieben, fanden bei Volkswagen messtechnische Analysen der verwendeten Elektrobleche statt, die insbesondere die elektrische Verbindung der Bleche an den Rändern sowie die in den Blechen entstehenden Wirbelstromverluste vor- und nach der Bearbei-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

tung beinhalteten. Auf Basis dieser Untersuchungen erfolgte die Statorblechsauswahl hinsichtlich Blechdicke und chemischer Zusammensetzung.

Die Elektrobleche wurden per Imprägnieren und Drahtschneiden bzw. Laserschneiden, Stapeln und Verpressen einer Backlackverklebung zu einem Statorpaket gefertigt.

Im Anschluss an die Fertigung erfolgte eine genaue Kontrolle des Paketes, u.U. verbunden mit nachträglicher Reinigung der Nuten.

Wiederum vor dem Hintergrund der leistungsdichten elektrischen Maschine ist ein hoher Kupferfüllgrad nur bei einer hohen Oberflächengüte und sicherer Verklebung erreichbar. Deshalb sind diese mechanischen Arbeiten für die Qualität des Blechpaketes unabdingbar, um die Spannungsfestigkeit der Statorisolation nicht zu gefährden (siehe folgenden Abschnitt).



Abbildung 23: Statorblechpaket

2.4.4.1 Isolieren Blechpaket und Wickeln

Im zweiten Schritt erfolgte das Isolieren und Einbringen der Wicklung in das Statorblechpaket.

Hierbei wurde wie eingangs erwähnt das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Kupferfüllgrad zu erreichen. Vor diesem Hintergrund erfolgte die Auswahl des Materials, des Fertigungsverfahrens und der Wickeltechnik.

Um Nutfüllgrade $> 80\%$ realisieren zu können, wurden insbesondere an das Isolationssystem hohe Anforderungen gestellt.

Der Nutaufbau und das Isolationssystem sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

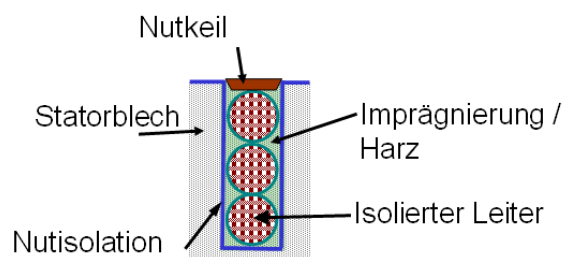


Abbildung 24: Nutaufbau und Isolationssystem

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Als weitere Randbedingung galten Bauraumabmessungen, die vor dem Hintergrund der leistungsdichten elektrischen Maschine zu einem sehr kurzen, kompakten Wickelkopf führten.

Um diesen hohen Anforderungen gerecht zu werden, erforderte es ein spezielles Wickelverfahren.

Zunächst wurde die Statorisolation, bestehend aus Stirn- und Nutisolation, in das Blechpaket eingebracht. Diese Bauteile dürfen dabei nicht beschädigt werden, um die Isolation in ihrer elektrischen Spannungsfestigkeit nicht zu beeinträchtigen.

Danach erfolgten das Biegen der Wicklung, das Aufbringen von zusätzlicher Isolation im Wickelkopfbereich und das Wicklungseinbringen in ein Magazin, wobei ebenfalls auf ein Vermeiden von Isolationsbeschädigungen sowie auf ein genaues Einhalten der Abmessungen zu achten war.

Die Wicklung wurde vom Magazin über den Zwischenschritt eines Werkzeuges in das isolierte Statorpaket eingebracht.

Um die Wicklungsstränge an definierten Statorpositionen enden zu lassen, ist ein Verschalten der Wicklungsenden nötig. Außerdem wurden als Abschluss dieses Fertigungsschritts Sensoren in die Wicklung eingebracht.

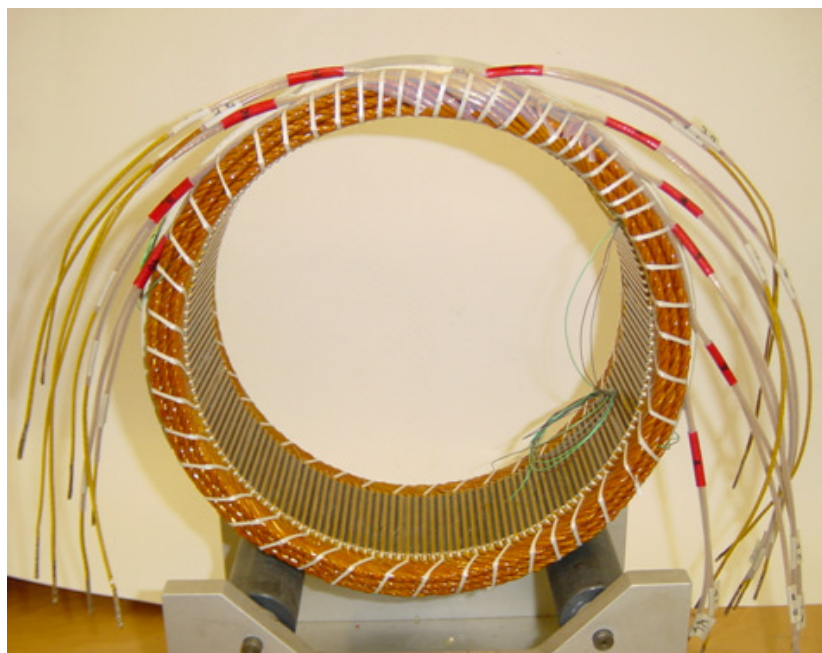


Abbildung 25: fertig gewickelter und verschalteter Stator

2.4.4.2 Wicklungsimprägnierung

Luft einschüsse im Bereich der Statorisolation führen zur lokalen Erhöhung der elektrischen Feldstärke und somit zur Entstehung von Teilentladungen. Diese Entladungen gefährden die Isolation hinsichtlich ihrer Lebensdauer.

Aus diesem Grund sowie zum mechanischen und akustischen Festigen des Stators erfolgte eine Wicklungsimprägnierung per VPI-Verfahren (vacuum pressure impregnation), welche von Behncke zusammen mit der Volkswagen Antriebsforschung durchgeführt wurde.

Dazu wurden zu Beginn Untersuchungen durchgeführt, um sowohl das Harz als auch die explizite Vergussprozedur hinsichtlich Temperatur, Vergussdauer, Vakuum und Abtropfzeit

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

für ein optimales Isolationssystem zu wählen. Nur exakt auf einander abgestimmte Komponenten und Verfahren ermöglichen eine langlebige sichere Statorisolation.



Abbildung 26: Imprägnieranlage

2.4.4.3 Abschließende Prüfungen

Nach Abschluss der Fertigung folgten folgende Prüfungen in der Volkswagen Antriebsforschung:

- Sichtprüfung
- Isolationswiderstands- und DC Messung 2,5kV
- Kapazitäts- Induktivitäts- und Widerstandsmessung

Außerdem wurden Teilentladungsmessungen vorgenommen. Diese Messungen dienen der abschließenden Analyse der Qualität des Isolationssystems. Sie erfolgten bei Raumtemperatur und bei 100°C des Stators und wurden mit einer 50Hz sin-Spannung durchgeführt.

2.4.4.4 Statorträger mit Kühlsystem

Der Stator wurde daraufhin in einen Statorträger, welcher das Kühlsystem beinhaltet, eingeschumpft. Dieser Statorträger wurde in Zusammenarbeit mit Fa. Hay entwickelt und gefertigt.

Im Anschluss daran wurde der Anbau und die Kontaktierung der Elektronik an die Maschinenstränge von der Volkswagen Antriebsforschung vorgenommen.

2.4.5 Fertigung Rotor

Der Rotor des Elektromotors besteht aus einer mechanischen Grundkonstruktion, die im Wesentlichen die Aufgabe hat, den magnetischen Fluss der Permanentmagnete zu führen und den Rotor zu lagern.

In diesem Arbeitspaket werden die Magnete magnetisiert. Anschließend wird der Rotor der Maschine gefertigt und die Magnete aufgebracht. Die Magnete werden bandagiert um einem Heraustreten der Magnete durch Fliehkräfte entgegenzuwirken.

Magnetlieferant ist hier die Geling GmbH. Magnetisiert werden die Magnete von MagSys.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Es wurden zwei Rotoren aufgebaut und mit Magneten bestückt (Abbildung 27).

Bei der Fertigung der Komponenten gilt es genau auf die Toleranzen zu achten und unter Hilfe von Messmaschinen die Qualität der Bauteile sicher zu stellen. Des Weiteren muss bei der Bestückung des Rotors mit Magneten auf höchste Präzision in Bezug auf die Positionierung geachtet werden.

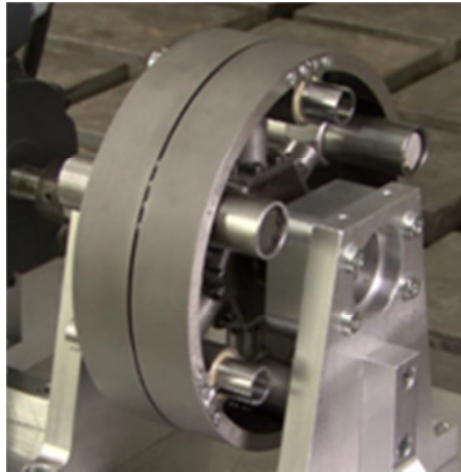


Abbildung 27: Gefertigtes Rotorteil

Um die Genauigkeit der Magnetposition sicher zu stellen, wird nach der Montage eine spezielle Magnetfeldmessung mit einer Hallsonde (Abbildung 28) durchgeführt.

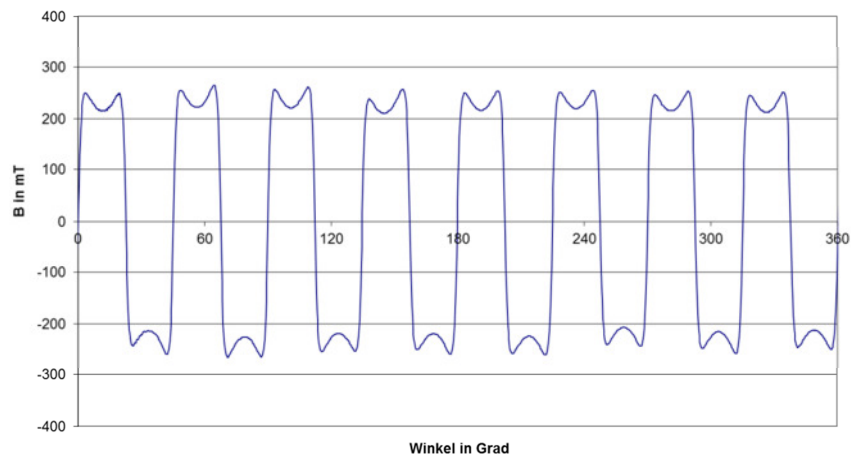


Abbildung 28: Messung der Magnetfeldspur am fertig aufgebauten Rotorsystem

Die Messungen ergaben, dass die einzelnen Magnete keine Auffälligkeiten in der Magnetisierung aufweisen. Der Abstand zwischen den geklebten Magneten ist immer innerhalb der definierten Toleranz. Die geringen Differenzen in den Spitzenwerten der Flussdichte entstehen durch die Toleranzen in der Polarisierung der Magnete (Herstellerdatenblatt).

2.4.6 Fertigung Maschinengehäuse und Vorrichtungen

In diesem Arbeitspunkt fließen Produktions- und Fertigungsaspekte in das Vorhaben ein um die künftige Montage des Antriebs realisieren zu können. Insbesondere die enge Anbindung der Leistungselektronikmodule erfordert hier neue Ansätze, um die Komponenten Stator, Rotor, Gehäuse und Leistungselektronik effizient zu montieren.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Das Gehäuse des elektrischen Antriebs beinhaltet die Aufnahme des Statorgehäuses und die Anbindung eines Untersetzungsgetriebe. Dieses Getriebe (eine Zahnradstufe + Differential) ist für den Betrieb der hier entwickelten elektrischen Maschine notwendig und wird sowohl für Prüfstandsversuche als auch im Fahrversuch eingesetzt. Es wird von Volkswagen intern entwickelt und gefertigt.

Werden Stator und Rotor zusammengeführt, sind Vorrichtungen notwendig, die die mechanische Führung und Abstützung der Bauteile realisieren. Diese Vorrichtungen (siehe Abbildung 29) müssen speziell für das Maschinenkonzept konstruiert und gefertigt werden, um im Anschluss an die Montage einen hinreichend genauen Luftspaltverlauf gewährleisten zu können.

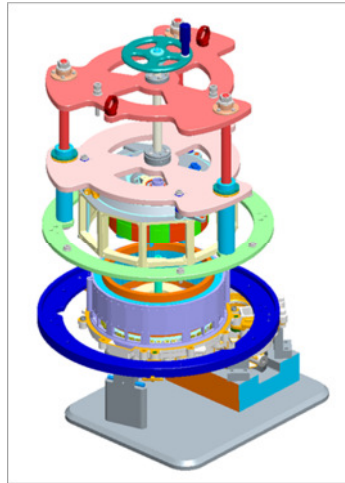


Abbildung 29: Fügevorrichtung

In Punkt Fertigung von Vorrichtungen wurden Maschinenaufnahmen und Flanschanbindungen konstruiert und gefertigt, sodass erste Prototypen der Maschine am Prüfstand getestet und erprobt werden können.

In diesem Arbeitspunkt wurde neben der Integration auf dem Prüffeld auch auf eine Detailtreue Lagerung des Aggregates analog zum Fahrzeug wert gelegt. Das bedeutet dass die Lagerung in Gummimetalllagern erfolgt wie Sie auch im Fahrzeug verwendet wird. Diese Form der Prüfstandsapplikation (Siehe Abbildung 30) gibt nicht nur besser in das Fahrzeug übertragbare Ergebnisse sondern auch die Möglichkeit das Zusammenspiel aus Aggregat und Lagerung zu testen.

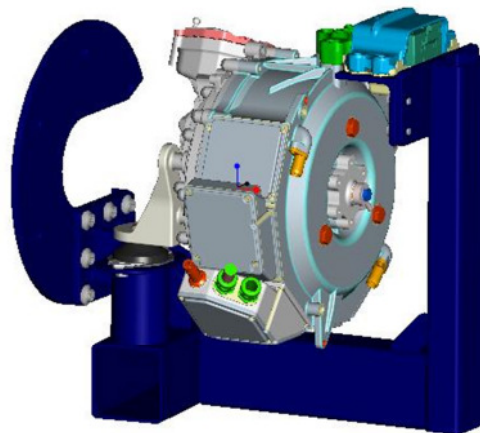


Abbildung 30: Aggregat inkl. Prüfstandhalterung

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

2.5 Konstruktion und Bau einer integrierten Leistungselektronik

In diesem Arbeitspaket wurde die Leistungselektronische Ansteuerereinheit der E-Maschine ausgelegt, aufgebaut und untersucht.

2.5.1 Auslegung der Halbleitermodule

Entsprechend der in Abschnitt 2.3.1 ausgeführten Daten wurde die leistungselektronische Endstufe ausgelegt. Nach dem hier verfolgten Integrationskonzept waren zehn Leistungsmodule um den Stator Kühlmantel herum anzuordnen und über diesen zu entwärmen. Wegen der Bauraum-, Montage- und Kontaktierungsanforderung im integrierten Verbau waren keine handelsüblichen Leistungsmodule einsetzbar. Da zudem der Elektromotor getriebefest und in hybridischer Anordnung direkt mit dem Motorgehäuse verbunden ist, waren zusätzlich entsprechend hohe Vibrationsbelastungsanforderungen zu stellen. Die Temperaturanforderungen sind in diesem Projekt die Anforderungen mit einer verhältnismäßig moderaten Kühlmitteltemperatur nicht zu hoch geschraubt worden. Allerdings sollten die entwickelten Module mit ihren jeweiligen Aufbautechniken das Potenzial für höhere Temperaturen aufweisen, weil diese in künftigen Serienanwendungen und insbesondere für Integrationsanwendungen gestellt werden müssen.

Wegen des hier erwarteten hohen Projektrisikos wurden zwei alternative Modulaufbautechniken ausgewählt, die diesen Anforderungen gerecht zu werden versprochen, und entsprechend anwendungsspezifische Leistungsmodule aufgebaut.

Das hier entwickelte Moldmodul (s. Abbildung 31) baut extrem flach, ist durch die Moldvergusstechnik besonders vibrationsunempfindlich und weist nach Angaben der Herstellerfirma sehr gute Zuverlässigkeitsdaten auf. Die Moldtechnologie ist damit potenziell sehr gut automotivegeeignet, ist allerdings in einem frühen Technologiestadium für große Leistungsmodule.

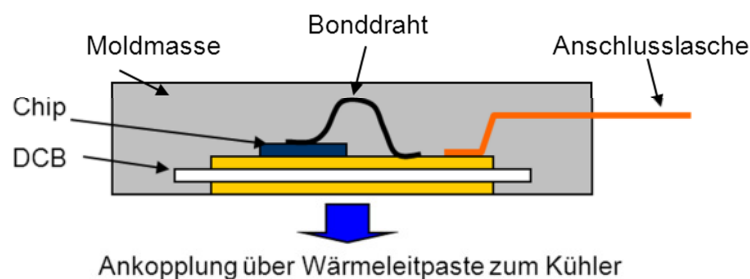


Abbildung 31: Aufbautechnik Moldmodul (Prinzipskizze)

Das alternativ aufgebaute Pinmodul (s. Abbildung 32) ist einem Serienprodukt für Solaranwendungen entlehnt. Es lässt mit einer speziellen Pinkontaktierung ebenfalls eine hohe Zuverlässigkeit im Serieneinsatz erwarten. Die leiterplattenbasierte Kontaktiertechnik ist zudem kostengünstig, variabel und kompatibel zum Treiberaufbau

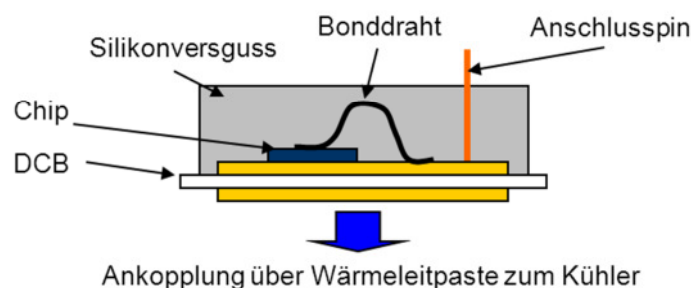


Abbildung 32: Aufbautechnik Pinmodul (Prinzipskizze)

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Zur Ansteuerung der Module wurden von Volkswagen zwei Treiberlösungen entwickelt, welche die Bauraumanforderungen der Integration erfüllbar machten. Auch hierbei wurden verschiedene Konzepte zur Signalverarbeitung verfolgt: Im Falle des Moldmodultreibers ist eine stromgetriebene Schnittstelle mit Optokopplertrennung umgesetzt, im Fall des Pinmodultreibers eine TTL-Pegel basierte Schnittstelle mit einem Übertragerglied.

Auch für die Chipbestückung der Module galten unterschiedliche Prämissen, so wurde das Moldmodul verlustoptimiert mit maximaler Stromtragfähigkeit (150A/Halbbrücke) bestückt und das Pinmodul kostenoptimiert mit kleinerer Chipfläche (Stromtragfähigkeit 60 A/Halbbrücke) und asymmetrischer Bestückung für den schnell taktenden und den langsam taktenden Schalter aufgebaut.

2.5.2 Fertigung Aufbau und Test des leistungselektronischen Systems

Der Aufbau des leistungselektronischen Systems umfasst die Leistungsmodule mit Ihren Treibern, den Kondensator,

Die Moldmodule wurden gemäß den oben umrissenen Anforderungen und in Abstimmung mit der Konstruktion mit einer Partnerfirma aufgebaut. Treiberentwicklung und -aufbau fanden bei Volkswagen statt. Ebenso die Montage der Treiber auf dem Modul. Modul und Treibergruppe sind in Abbildung 33 dargestellt.

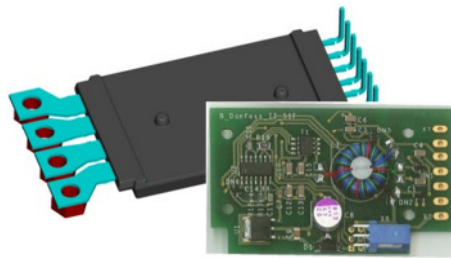


Abbildung 33: Leistungsmodul in Moldtechnik und zugehörig entwickelter Treiber

Das Leistungsmodul mit der Pin-Kontaktierungstechnik wurde komplett mit Treibergruppe bei einer Partnerfirma entwickelt und aufgebaut (s. Abbildung 34).

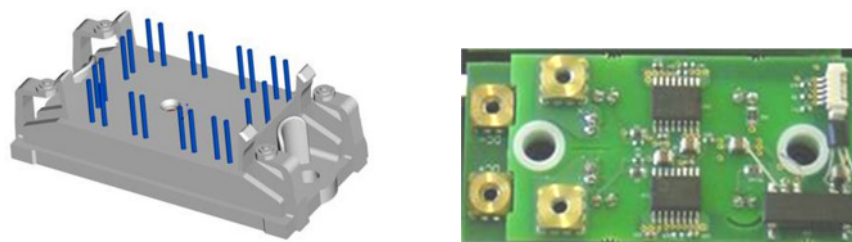


Abbildung 34: Leistungsmodul und zugehöriger Treiber beim Pinmodul

Beide Modulsysteme wurden einem betriebsnahem Belastungstest unterworfen, für den eine eigene Testeinrichtung aufgebaut wurde (s. Abbildung 35). Beide Systeme konnten erfolgreich bei der spezifizierten maximalen Spannung und bei maximalem Phasenstrom betrieben werden. Beispielhaft ist eine solche dynamische Messung in Abbildung 36 wiedergegeben.

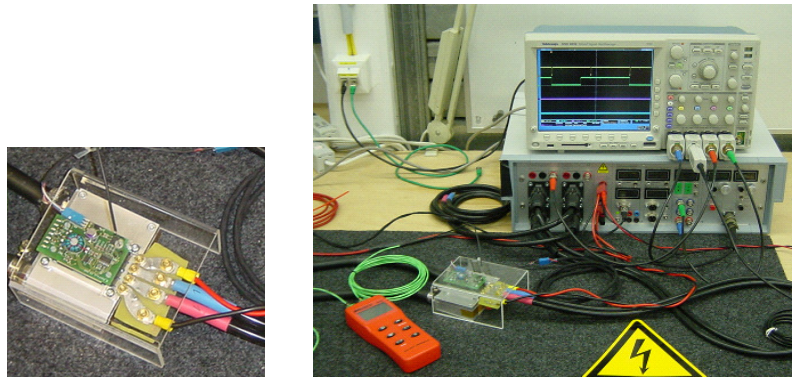


Abbildung 35: Dynamische Vermessung der Leistungsmodule und thermische Bewertung



gelb: Pulssignal, blau: Zwischenkreisspannung,
magenta: Phasenstrom, grün: Magnetphase

Abbildung 36: Dynamisches Verhalten der Vollbrückenmodule (exemplarisch)

Allerdings zeigte sich im Falle der Moldmodule, dass die Bodenverwölbung der Module so groß ausgefallen ist, dass die thermische Ankopplung der Module an den Kühler nur unzureichend war. Im Ergebnis findet man eine Temperaturüberhöhung im Bereich schlechter Kontaktierung. Daraus folgt, dass in der Maschinenanwendung nur ein eingeschränkter Betrieb möglich war. Eine Revision der Module wurde im Projektverlauf begonnen, konnte jedoch nicht mehr bis Projektende abgeschlossen werden.

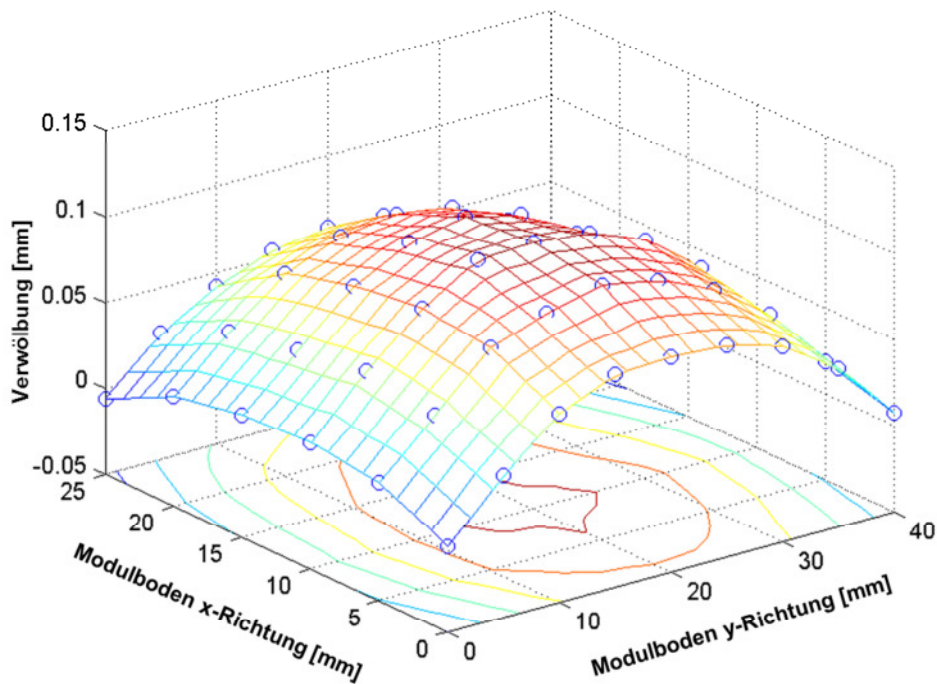


Abbildung 37: Vermessung der Bodenverwölbung

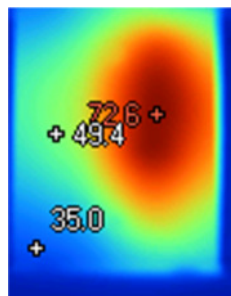


Abbildung 38: Thermische Untersuchung der Moldmodule; Korrelation mit Kontaktabdruck der Wärmeübergangsschicht;

Der Kondensator wurde hier wie schon beschrieben als Integrationselement verwendet, indem er neben der Darstellung der Zwischenkreiskapazität auch sowohl die DC-Verschiebung, als auch die extrem niederinduktive Modulkontaktierung realisiert (s. Abbildung 39). Er ist damit zentrales Element der Systemintegration.

Ein im Vorfeld dieses Vorhabens für Vorversuche aufgebauter Kondensator konnte im Projekt ohne größere Änderungen weiterverwendet werden, so dass die ursprünglich geplante Revisionierung entfallen konnte.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

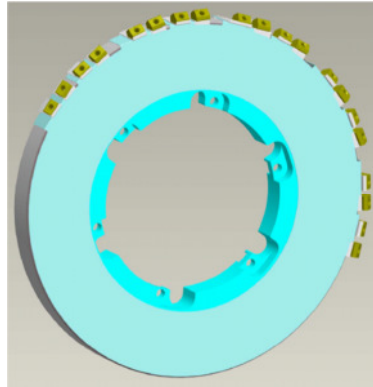


Abbildung 39: Ringkondensator mit integrierter Stromverschiebung und verteilten Modulanschlüssen

Das sensorische System der vorliegenden Elektromaschine besteht aus der Rotorpositionssensorik und der DC-Stromsensorik.

Für die DC-Stromsensorik wurde ein handelsüblicher Strommessring nach dem Kompensationsverfahren ausgewählt. Dieser ist in der Anschlussbox integriert.

Für die Positionssensorik wurden spezielle Nutabschlusskeile mit integriertem Hallsensor entwickelt (s. Abbildung 40).

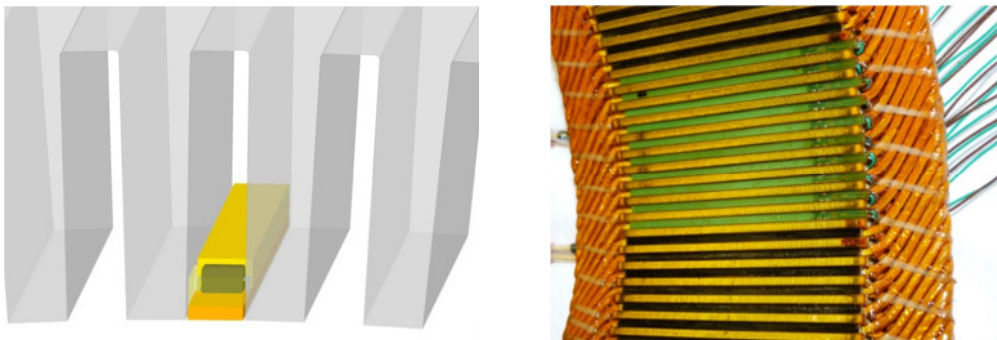


Abbildung 40: Positionssensorik mit in den Statornuten versenkten Hallsensoren

Sensoren und Module waren in der Systemmontage elektrisch mit dem Ansteuerboard zu verbinden. Der hierzu notwendige sehr aufwendige Kabelbaum wurde passgenau gefertigt und schließlich in der Elektromaschine verlegt.

2.6 Steuerung und Regelung des Antriebs

In diesem Arbeitspaket wurden die zur Ansteuerung der E-Maschine nötigen Regelalgorithmen zunächst in der Simulation untersucht und entworfen, anschließend fand deren Implementierung auf einem speziell ausgelegten Ansteuerboard statt.

2.6.1 Simulationsmodelle

Für die Entwicklung der Regelverfahren sind Simulationsmodelle erforderlich. Dabei sind nicht nur die E-Maschine sondern auch die Leistungselektronikkomponente und die Steuerungslogik in der Simulationsumgebung zu modellieren. Zunächst werden die Simulationsmodelle der E-Maschine und dann die Modelle für das gesamte System dargestellt.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

2.6.1.1 Elektrische Maschine

Die LDE-M wurde mit Hilfe einer Finite-Element-Methode (FEM) Software numerisch berechnet. Diese Maschine kann mit einem 2-dimensionalen (2D) Modell beschrieben werden, da Randeﬀekte vernachlässigt werden können.

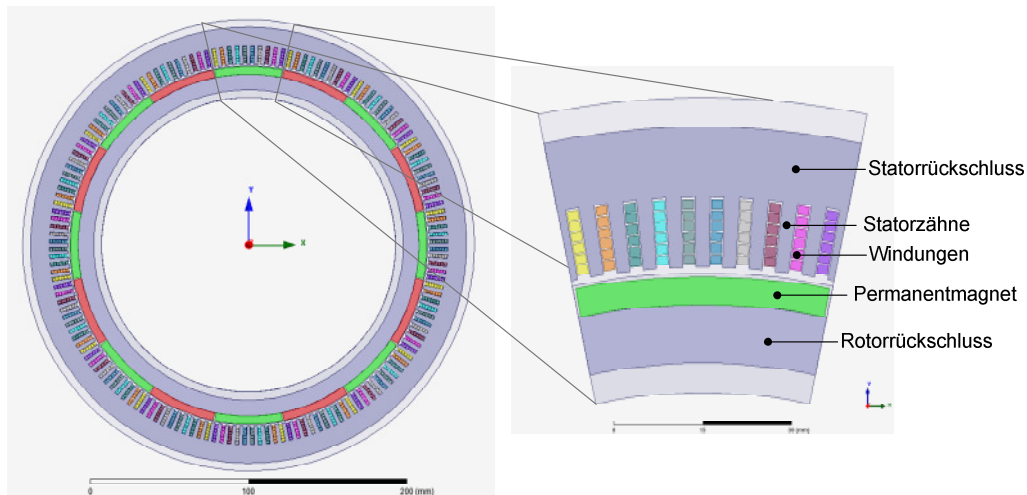


Abbildung 41: 2D-FEM Modell der LDEM

Im Abbildung 41 ist das 2D-FEM Modell der E-Maschine dargestellt. Die Modelle wurden sowohl im Auslegungsprozess (Kapitel 2.2.2.2) als auch für die Implementation der Ansteuerungsverfahren angewendet.

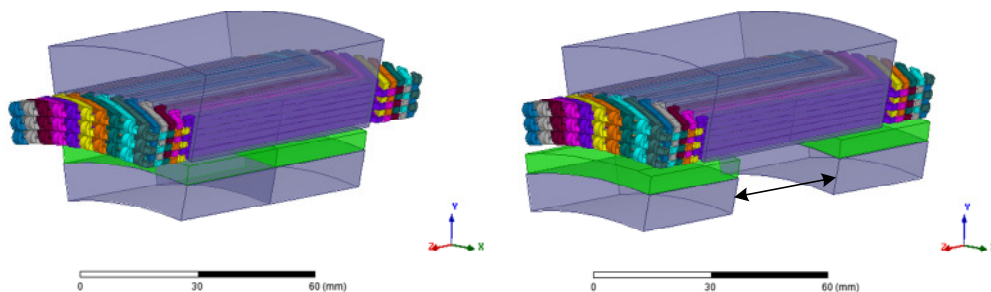


Abbildung 42: 2D-FEM Modell der E-Maschine ohne/mit mechanischen Feldschwächung

Im Feldschwächungsbereich ist ein 3-dimensionales Modell erforderlich um die drehzahlabhängigen Maschinenkonstanten, wie im Kapitel 2.4.2 beschrieben, zu berechnen. In Abbildung 42 sind die 3D-Modelle im Grunddrehzahl- und Feldschwächungsbereich dargestellt.

Die FEM ermöglicht eine sehr detaillierte Betrachtung der elektromagnetischen Felder in der E-Maschine. Das Verfahren ist jedoch sehr zeitaufwendig und erfordert hohe Rechnerleistung. Für die Entwicklung von Ansteuerkonzepten ist es ausreichend die E-Maschine mit einem Ersatzschaltbildmodell basierend auf mathematischen Gleichungen zu beschreiben. Eine 10-phasige bürstenlose Gleichstrommaschine kann mit den folgenden mathematischen Formeln definiert werden:

Anhand dieser Modelle können die elektromagnetischen Felder statisch und transient berechnet werden. In der FEM ist es möglich die nicht linearen Eigenschaften der magnetischen Werkstoffe zu berücksichtigen und elektromagnetische Größen, wie die Flussverketung und Flussdichte, in den unterschiedlichen Betriebszuständen zu berechnen.

Formel 1: Spannungsgleichung einer 10-Phasigen bürstenlosen Gleichstrommaschine

$$\begin{array}{c} u_{ph1} \\ u_{ph2} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{ph10} \end{array} = R_{ph} \begin{array}{c} i_{ph1} \\ i_{ph2} \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{ph10} \end{array} + \underbrace{\begin{array}{c} L_{11}(I, \vartheta) \quad L_{12}(I, \vartheta) \quad \cdot \quad \cdot \quad L_{1/10x}(I, \vartheta) \\ L_{12}(I, \vartheta) \quad L_{22}(I, \vartheta) \quad \cdot \quad \cdot \quad L_{2/10}(I, \vartheta) \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad L_{10/10}(I, \vartheta) \end{array}}_{\text{Induktivitätsmatrix}} \cdot \frac{d}{dt} \begin{array}{c} i_{ph1} \\ i_{ph2} \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{ph10} \end{array} + \underbrace{\begin{array}{c} u_{ph1_ind}(\omega, \vartheta) \\ u_{ph2_ind}(\omega, \vartheta) \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{ph10x_ind}(\omega, \vartheta) \end{array}}_{\text{induzierte Spannung}}$$

Formel 2: Elektromagnetisches Drehmoment

$$M(t) = \sum_{n=1}^{10} u_{phn_ind}(t) \cdot i_{phn}(t)$$

In diesen Formeln stehen u_{phn} , R_{ph} , i_{phn} , L_{nm} , u_{phn_ind} für die Klemmenspannung der Phase-n, den Phasenwiderstand, den Phasenstrom der Phase-n und die induzierte Spannung der Phase-n. Wie in der Formel ersichtlich erfordert die Implementierung eines systemebenen Modells die Berechnung der Induktivitätsmatrix und der induzierten Spannungen. Im Rahmen dieser Studie wurden diese unbekanntes Größen durch FEM-Modelle berechnet und diese Werte in Tabellenform gespeichert. Zur Reduzierung der Rechenzeit sind vereinfachte Annahmen im Modellbildungsprozess getroffen worden, zum Beispiel sind die nicht linearen Eigenschaften der weichmagnetischen Werkstoffe nur teilweise berücksichtigt (siehe Abbildung 43).

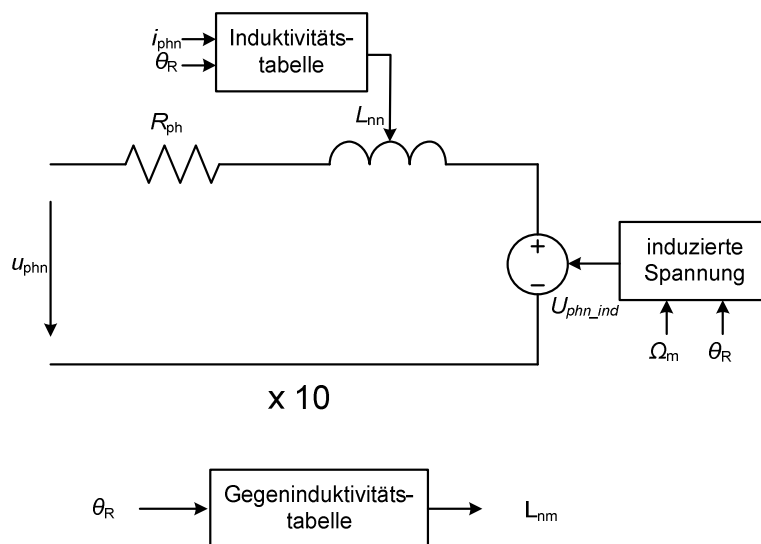


Abbildung 43: Systemebene-Simulationsmodell

Das Systemebene-Simulationsmodell ermöglicht sehr schnelle Simulationen mit ausreichender Genauigkeit. Deswegen wurde dieses Modell in der Systemsimulation verwendet, um die unterschiedlichen Ansteuerungsstrategien zu simulieren.

2.6.1.2 Systemsimulation im Grunddrehzahlbereich

Kooperation zwischen 2D-FEM Modell in Maxwell und Circuit Editor

Die verwendete FEM-Software (Maxwell von Ansys GmbH) bietet eine zusätzliche Software (Circuit Editor), geeignet für die Implementierung einfacher Schaltvorgänge. Die Leistungselektronikschalter können in dieser Software implementiert werden, um die elektrische

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Kommutierung des Phasenstromes zu realisieren. In diesem Sinne können das FEM-Modell der E-Maschine und die Steuerung miteinander verbunden werden und das gesamte System in vertretbaren Simulationszeiten betrachtet werden. Deswegen wurde diese Kooperation zwischen 2D-FEM Modell in Maxwell und Circuit Editor angewendet, um eine einfache einschaltzeitdauergesteuerte Ansteuerung zu implementieren und damit die elektrischen Größen, wie DC-Strom, Phasenstrom, Phasenspannung und elektromagnetisches Drehmoment und auch die elektromagnetischen Größen, wie Flussdichte und Flussverketzung zu berechnen. Allerdings ist dieses System Modell nicht für komplexe Steuerungsverfahren geeignet und auch mechanische Transienten können nicht berücksichtigt werden.

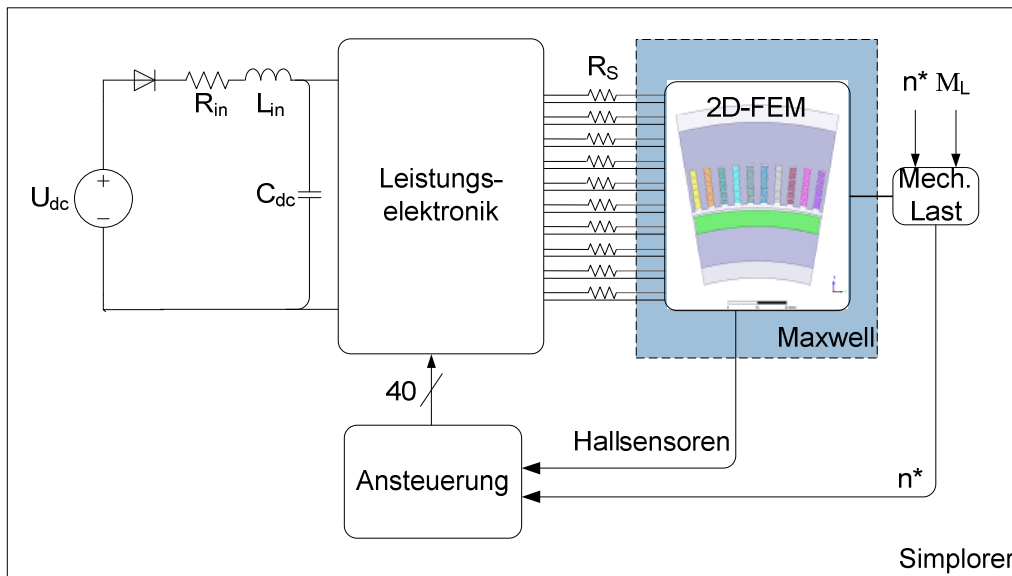


Abbildung 44: Kooperation zwischen 2D-FEM Modell in Maxwell

Kooperation zwischen 2D-FEM Modell in Maxwell und Simplorer

Eine weitere Möglichkeit für die Systemsimulation ist die Kooperation zwischen einem 2D-FEM Modell in Maxwell und Simplorer. Simplorer ist ein multi-domain Systemsimulator und ermöglicht die Implementierung elektrischer Schaltkreise, mechanischer Systeme und Petri-Netz-Elementen.

Die Vorteile dieses Modells gegenüber der Kooperation zwischen Maxwell und Circuit Editor sind die Möglichkeiten:

- komplizierte Ansteuerungsverfahren zu implementieren,
- mechanische Transienten zu berücksichtigen,
- und die Sensorik (Hallensensoren) zu modellieren.

Allerdings ist die Verbindung zwischen Maxwell und Simplorer langsamer und es ist eine ca. 8-fache Simulationszeit im Vergleich zum ersten Modell nötig.

Systemebenen-Simulation-Modell

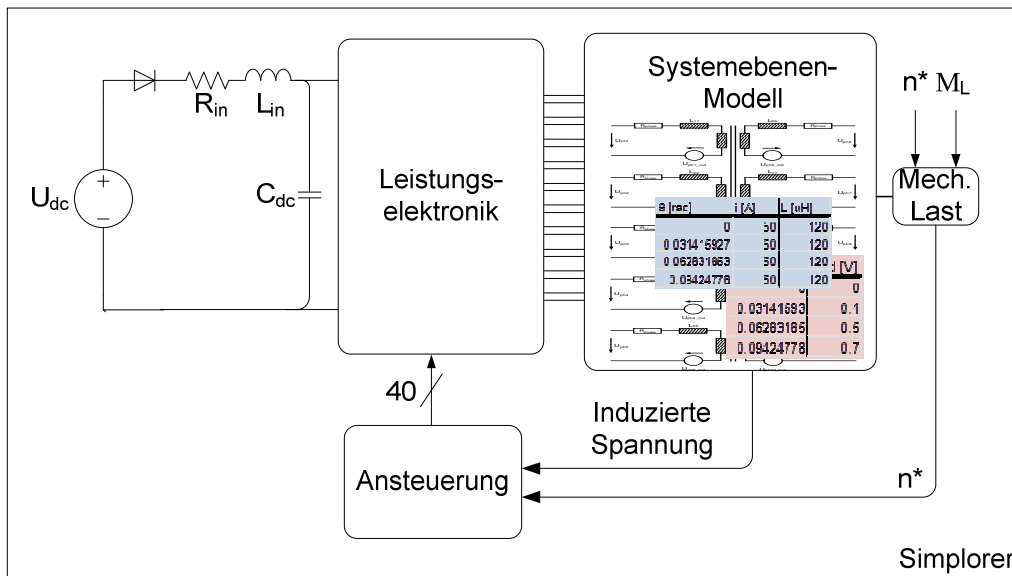


Abbildung 45: Systemebenen-Simulation-Modell

Die Systemsimulationsmodelle, welche mit FEM-Modell der E-Maschine direkt verbunden sind, liefern sehr genaue Ergebnisse und ermöglichen auch die Optimierungsmöglichkeit des Magnetkreises. Deswegen sind sie in der Frühphase der Untersuchungen von Vorteil. Für die Simulation der Ansteuerungsverfahren ist es jedoch nicht nötig den Magnetkreis in jedem Zeitschritt neu zu berechnen. Daher können die elektromagnetischen Größen für den gesamten Betriebsbereich einmal berechnet werden und für weitere Untersuchungen diese Werte genutzt werden. In diesem Sinne sind sehr schnellere numerische Berechnungen mit sehr guter Genauigkeit realisierbar.

Die Vorteile des Systemebenen-Simulationmodell sind;

- sehr kurze Simulationszeiten (~2% im Vergleich zum Modell mit 2D-FEM Modell in Maxwell und Simplorer)
- Implementierung komplizierter Steuerungsverfahren

Demzufolge ist dieses Modell *sehr* gut für die Simulationen der Ansteuerungsverfahren geeignet.

2.6.1.3 System Simulation im Feldschwächungsbereich

Es ist nur mit sehr hohem Zeit- und Rechenaufwand möglich, 3D-FEM-Modelle mit dem Systemsimulator direkt zu verbinden. Die LDE-M kann im Feldschwächungsbereich durch mehrere 2D-FEM-Modelle mit gewissen Annahmen modelliert werden. Allerdings ist es derzeit nicht möglich, mehrere 2D-FEM-Modelle mit dem Systemsimulator zu koppeln. Demzufolge kann der Antrieb nur anhand des Systemebenen-Simulation-Modells numerisch berechnet werden. Dazu ist ein LDE-M-Modell mit angepassten Parametern in Abhängigkeit von der Rotorverstellung erforderlich. Dieses Modell kann durch die Berechnung der 2D-FEM-Modelle generiert werden.

2.6.2 Regelungsverfahren

Die Kommutierung des Phasenstromes in Abhängigkeit von der Position der E-Maschine ist für den Betrieb einer bürstenlosen Gleichstrommaschine erforderlich. In Abhängig von der

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Lage des Polrades werden die Ströme im Stator des E-Motors von einer Wicklung auf die nächste weiter geschaltet und damit der richtige Winkel zwischen dem Magnetfeld und dem Stator eingestellt. Für einen optimalen Betrieb ist der blockförmige Verlauf des Phasenstroms (Abbildung 46) erforderlich, was durch die Regelung realisiert werden muss. In diesem Projekt wird der bidirektionale Phasenstrom in jeder Phase durch voneinander elektronisch entkoppelte H-Brücken geregelt (siehe Kapitel 2.3.1).

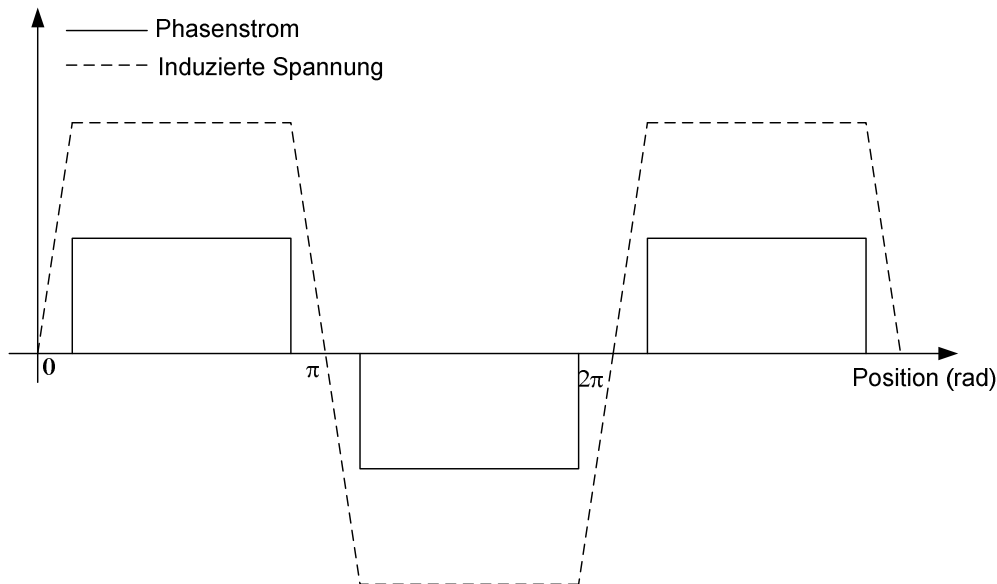


Abbildung 46: Optimale Regelung einer bürstenlosen Gleichstrommaschine

Eine bürstenlose Gleichstrommaschine ist durch unkomplizierte Methoden steuerbar. Die Position kann durch die Hallensoren ermittelt und die Phasenströme können durch PWM geregelt werden. Dennoch ist die PWM-Strategie wegen der kleinen Phaseninduktivitätswerte, der hohen Gegeninduktivitäten zwischen den Phasen und der begrenzten maximalen Schaltfrequenz der Leistungsmodule für die LDE-M nur mit Einschränkungen umsetzbar (Kapitel 2.3.1).

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden zwei Steuerungsstrategien, bezeichnet mit einschaltdauergesteuerte (einfache) Ansteuerung und Stromglättung durch Nachbarstrang-Pulsabschaltung, erklärt.

2.6.2.1 Einschaltdauergesteuerte (Einfache) Ansteuerung

Das Funktionsprinzip der einfachen Steuerung kann mit folgender graphischer Darstellung erläutert werden. Durch die Definition der drei Konstanten int_1 , int_2 und int_3 wird die Einschaltdauer jeder Phase bestimmt. Zum Zeitpunkt t_{ein} wird die Phase eingeschaltet und der Strom fließt bis zum Zeitpunkt t_{fl} . Ab diesem Zeitpunkt beginnt das Freilaufintervall und zum Zeitpunkt t_{aus} wird der Phasenstrom abgeschaltet. Die Richtung des positiven drehmomentbildenden Stroms wird anhand der magnetischen Feldrichtung, diese Information wird von den Hallensoren geliefert, bestimmt. Unterschiedliche Drehmomente sind durch die Anpassung der DC-Spannung mit Hilfe einer Tiefsetzstellerfunktion (DC/DC Wandler) realisierbar.

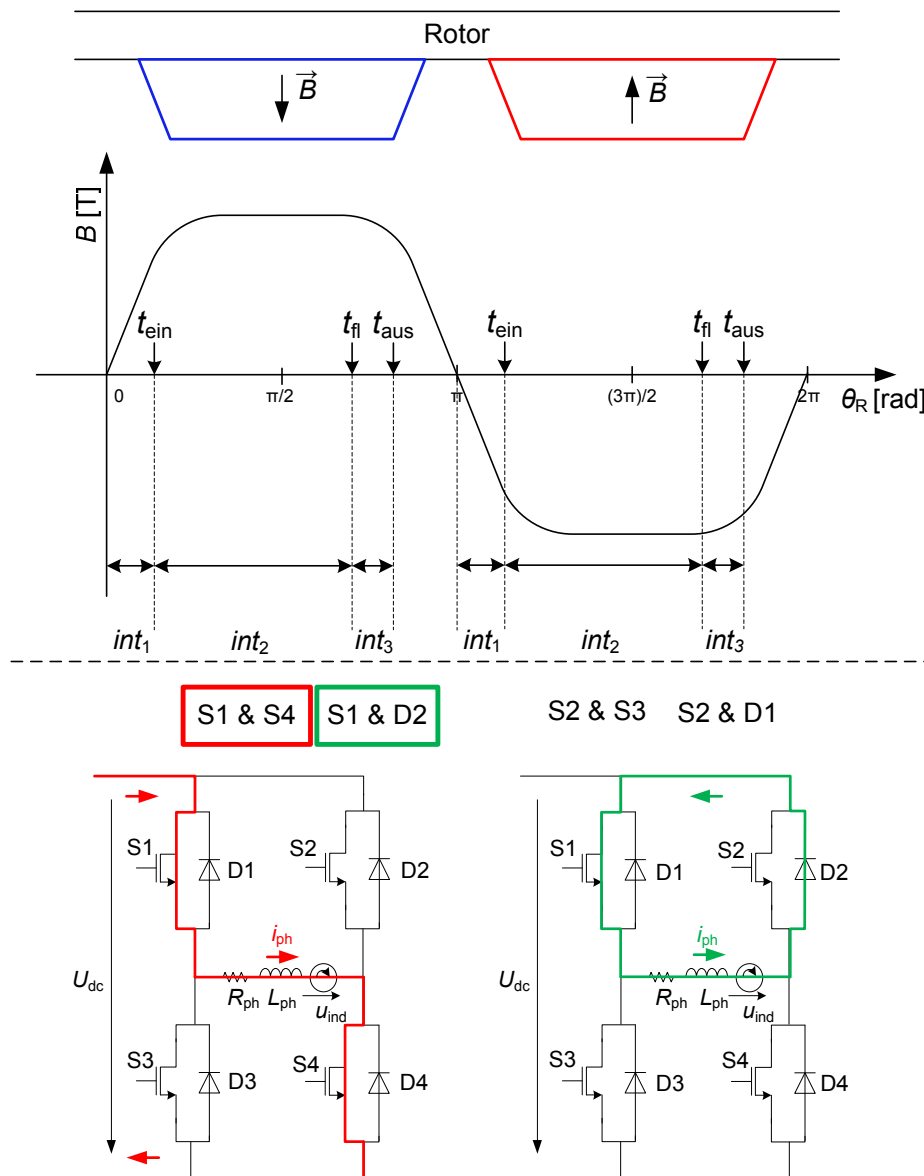


Abbildung 47: Das Funktionsprinzip der einfachen Steuerung

Die Eingangsgröße der Regelstrecke ist der Drehmomentsollwert. Der Sollwert des Summenstroms ergibt sich mit der Hilfe der Maschinengleichungen, die im Kapitel 2.2.2 erläutert sind. Der Unterschied zwischen Soll- und Istwert des Summenstroms, die *Regelabweichung* (e), wird mit einem PI-Regler geregelt indem diese Stellgröße im eingeschwungenen Zustand minimiert wird. Der Sollwert der DC-Spannung wird aus der Ausgangsgröße des PI-Reglers und dem Maximalwert der induzierten Spannung gebildet. Der DC/DC-Wandler stellt die angeforderte Spannung ein. Die Steuerungssignale der Leistungsmodulen werden anhängig von der Ansteuerungsvariablen und der Rotorposition ermittelt und mit diesen Signalen erfolgt die elektrische Kommutierung.

Im Feldschwächungsbereich ist die Maschinenkonstante ($k\Phi$) abhängig von der axialen Rotorverstellung. Diese Abhängigkeit wird im Regelkreis durch die Anpassung der aktiven Länge des Leiters ($L(\Omega)$) berücksichtigt.

Die einschalt-dauer-gesteuerte Ansteuerung ist einfach zu implementieren und erfordert nur eine Strommessung. Allerdings sind die Phasenströme nicht direkt geregelt sondern nur der

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Summenstrom aller Phasen (I_{Σ}). Darüber hinaus fließen ungleichmäßig verteilte Ströme in den Phasen. Das führt tendenziell zu hohen Verlusten und auch das maximale Drehmoment ist durch die Spitzen dieses Stromes begrenzt, da die Leistungselektronikkomponenten auf diesen Spitzenstrom ausgelegt werden müssen (Kapitel 2.5.1).

In folgendem Abschnitt werden zuerst die Simulationsergebnisse dargestellt um das Verständnis über die Systemeigenschaften zu vertiefen und anschließend die Simulationsergebnisse mit Prüfstandmessungen validiert.

Simulationsergebnisse und Validierung

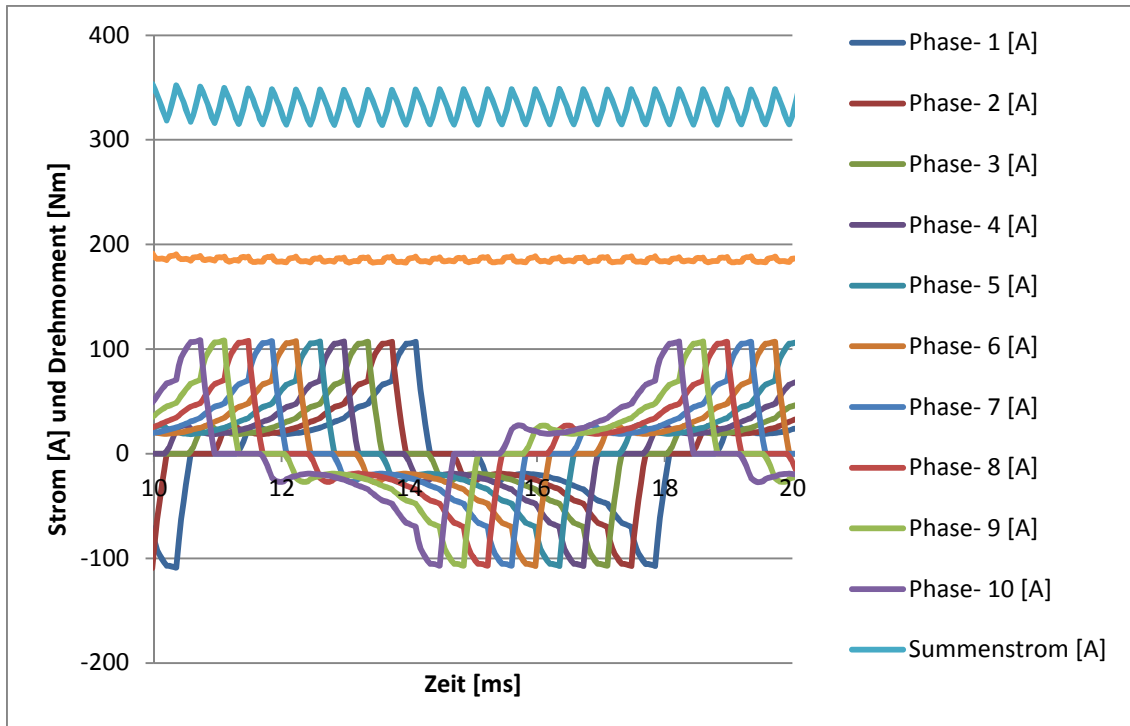


Abbildung 48: Bei Rotordrehzahl von 1000rpm und elektromagnetischen Drehmoment von 185Nm

In Abbildung 48 sind die simulierten Phasenströme, der Summenstrom und das Drehmoment bei einer Rotordrehzahl von 1000rpm und dem elektromagnetischen Drehmoment von 185Nm zu sehen. Die Steuerungskonstanten sind $int_1=5\%$, $int_2=70\%$ und $int_3=10\%$ (5%70%10%). Hier sehen wir dass die Phasenstromverläufe ungleichmäßig sind weil die nicht direkt geregelt sind. Dennoch ist trotz dieser ungewünschten Phasenstromverläufe der Drehmomentrippel unter 5%. Bei der LDE-M sind, wegen der hohen Anzahl an Phasen, kleine Drehmomentrippel zu erwarten. Bei einer detaillierten Betrachtung der Stromverläufe ist es möglich auch die Interaktionen zwischen Phasen zu sehen. Zum Beispiel, wenn Phase-9 eingeschaltet ($t=15ms$) ist, nimmt der Strom in Phase-10 ab oder wenn Phase-10 ausgeschaltet ($t=18ms$) ist, steigt der Strom in Phase-9 stark ein. Hauptsächlich bestimmen die Kopplungen zwischen den Nachbarsträngen die Eigenschaften der Phasenströme.

Wegen der kleinen Zeitkonstanten sind die Eigenschaften der Phasenströme nicht stark von der Drehzahl abhängig aber vom Drehmoment, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** auch zu sehen. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Abbildung 52 sind Phasenstromverläufe für unterschiedliche Drehmomente bei 500rpm, 1000rpm und 6000rpm dargestellt.

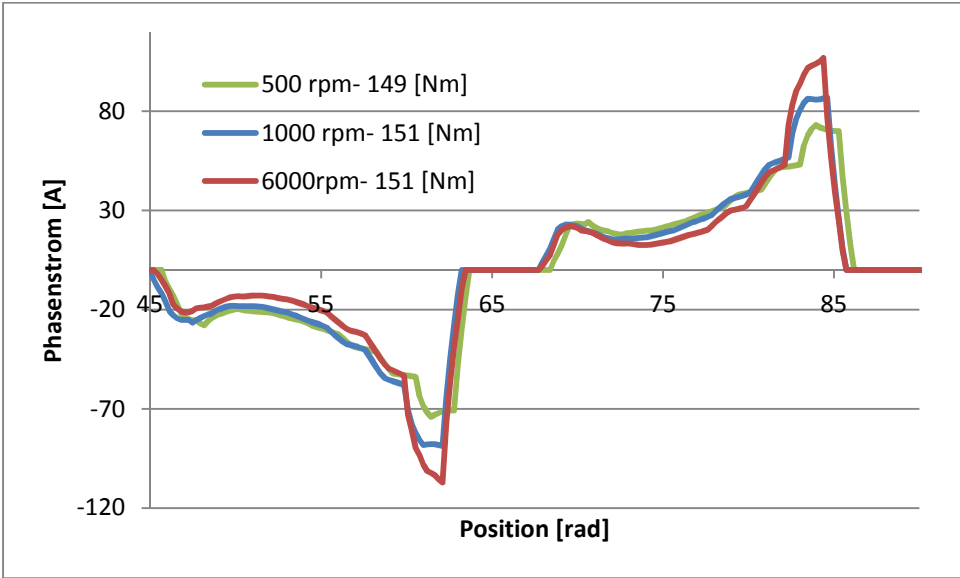


Abbildung 49: Drehmoment ca. 150Nm

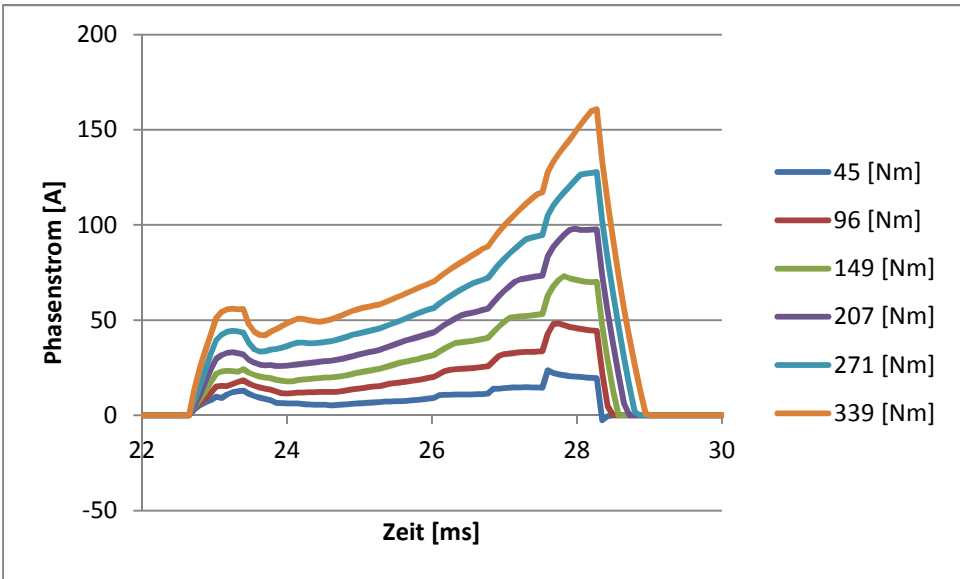


Abbildung 50: Rotordrehzahl = 500rpm

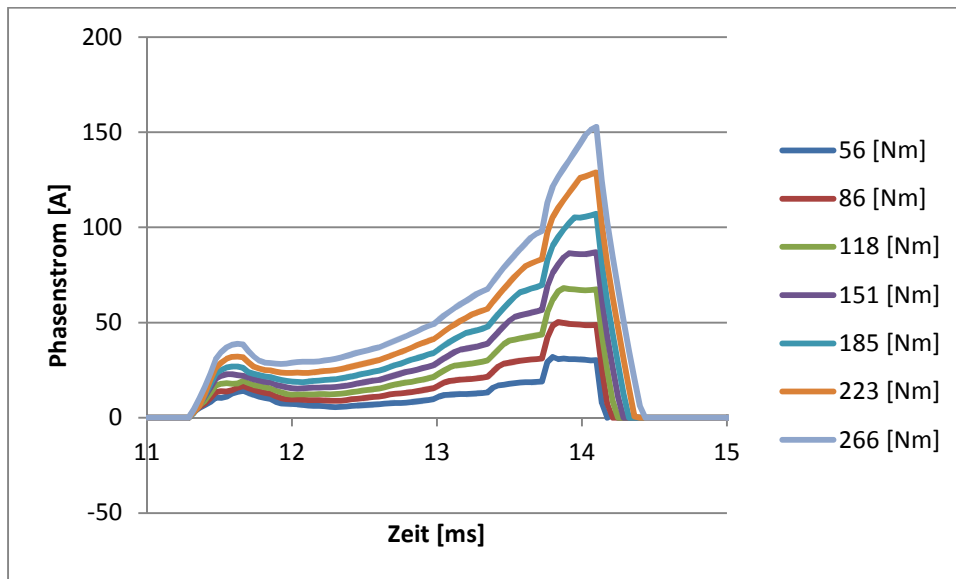


Abbildung 51: Rotordrehzahl = 1000rpm

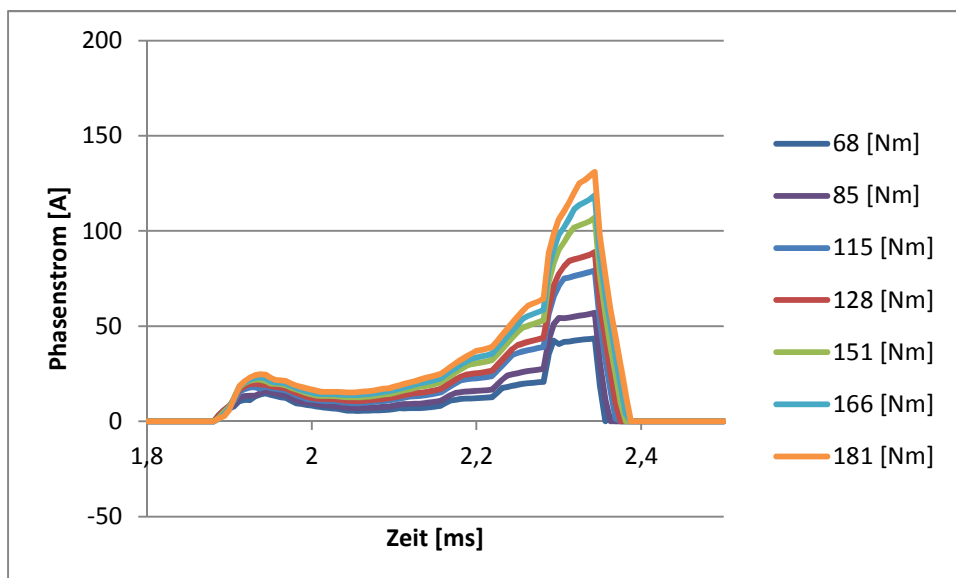


Abbildung 52: Rotordrehzahl = 6000rpm

Die numerisch berechneten und gemessenen induzierten Spannungsverläufe sind in Abbildung 62 mit einander verglichen und die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die Simulationsergebnisse für die Phasenstromverläufe für zwei Betriebszustände mit Prüfstandmessungen verglichen. In diesen Bildern sehen wir, dass die Simulationsmodelle in der Lage sind die Realität *sehr* gut abzubilden. Die maximale Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten ist unter 10% und die Verläufe sind sehr ähnlich.

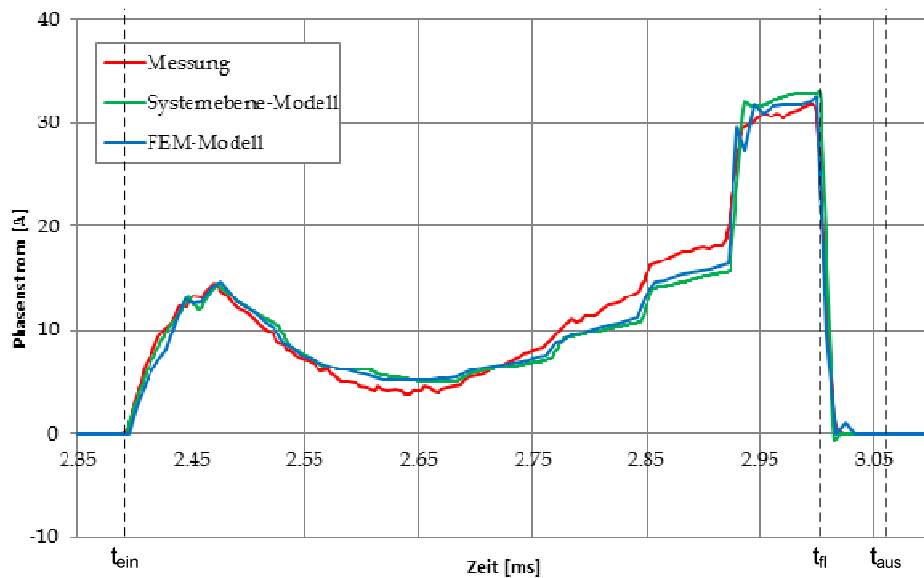


Abbildung 53: Vergleich – 4457rpm, 100Nm

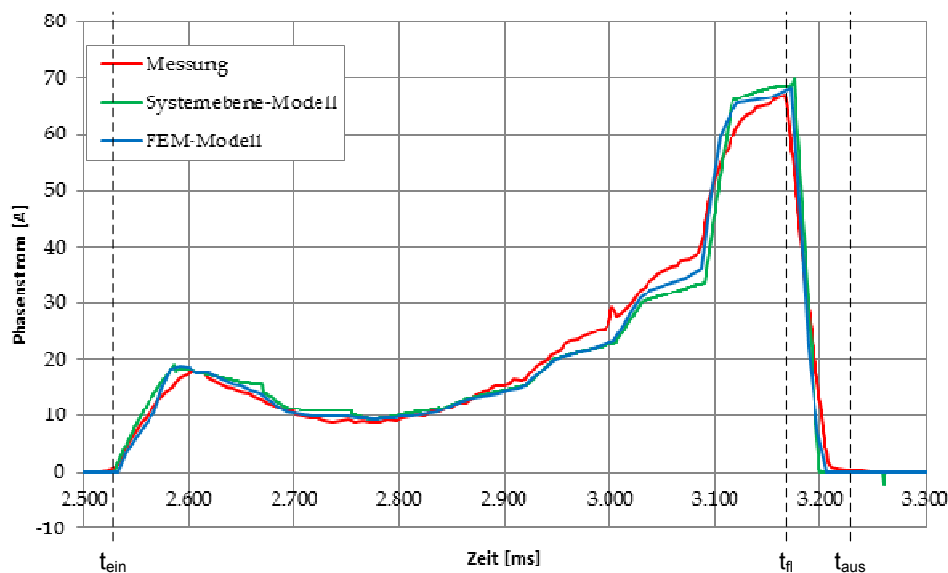


Abbildung 54: Vergleich – 4711rpm, 50Nm

2.6.2.2 Stromglättung durch Nachbarstrang-Pulsabschaltung

Um die Effizienz und die Leistungsdichte des Antriebs zu erhöhen, sind gleichmäßige Phasenströme erforderlich. Da die Ursachen für nicht optimale Verläufe bekannt sind, können Maßnahmen zur Verbesserung definiert werden. Die Endspitzen im Phasenstromverlauf basieren auf Transformatoreffekten zwischen Nachbarphasen. In anderen Worten: die gespeicherte elektromagnetische Energie in der Phaseninduktivität wird in die nachfolgende Phase abgeleitet wenn diese Phase ausgeschaltet wird (siehe Abbildung 55(a)). Demzufolge sind die Zeitpunkte in denen die Phasenströme ansteigen bekannt.

Eine offensichtliche Maßnahme ist die Pulsabschaltung der Phase, die mit dem ausschaltenden Strang elektromagnetisch gekoppelt ist. Auf diese Weise wird bei jedem Abschalten (t_{ri}) auch der nachfolgende Nachbarstrang für eine gewisse Zeit ausgeschaltet. Das führt jedoch dazu, dass die im Magnetfeld gespeicherte Energie in den zweiten Nachbarstrang abgeleitet

wird. Mit dieser Maßnahme, können die Endspitzen in den Stromverläufen zu einem früheren Zeitpunkt verschoben werden (siehe Abbildung 55(b)).

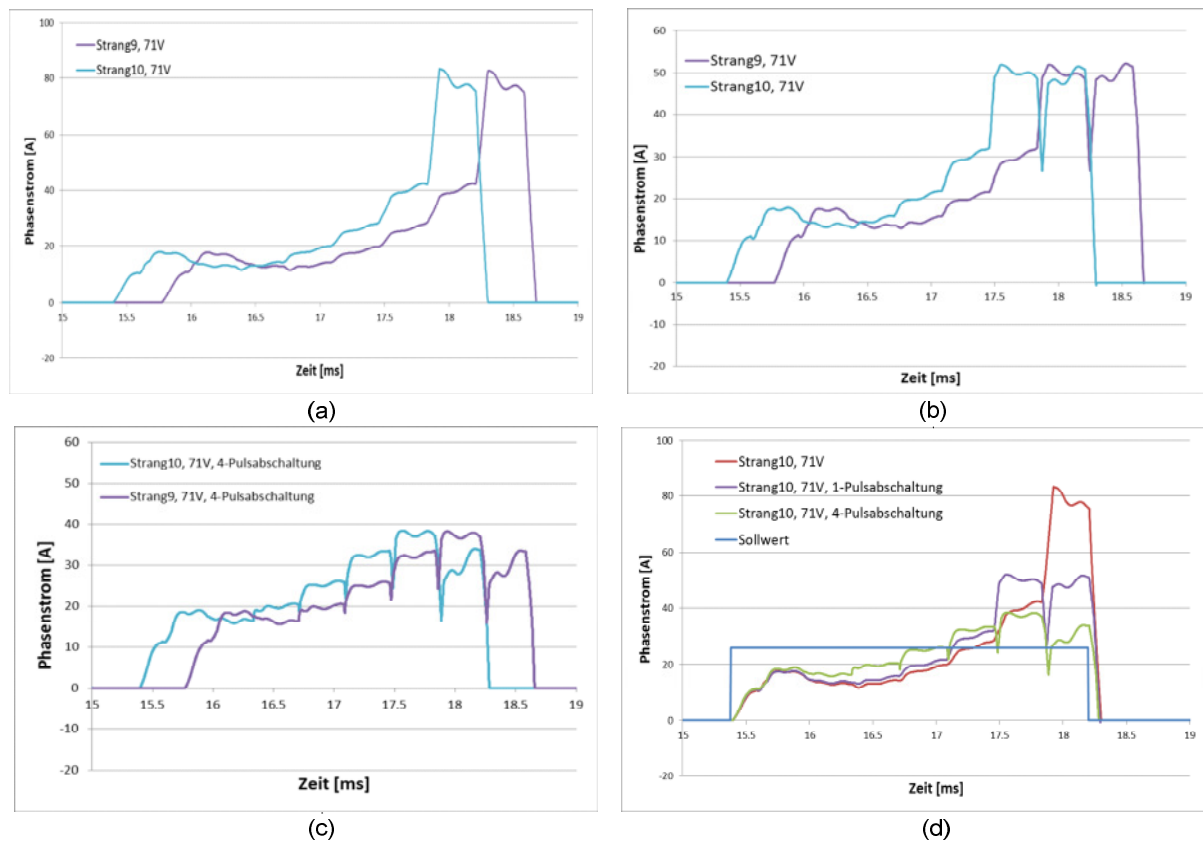


Abbildung 55: Stromglättung durch Nachbarstrang-Pulsabschaltung

In Abbildung 55(d) sind die Phasenstromverläufe mittels Systemsimulation mit einfacher Ansteuerung, einer extra Pulsabschaltung, vier extra Pulsabschaltungen und Sollwert des Stromes dargestellt. Diese Verläufe sind anhand des Systemebene-Simulations-Modells berechnet. Hier sehen wir, dass durch Nachbarstrang-Pulsabschaltung ($n_{pa}=1\dots7$) es möglich ist, deutlich gleichmäßigere Verläufe zu erreichen. Bis zu sieben extra Nachbarn-Pulsabschaltungen sind mit dieser Methode möglich. Die Berechnungen und Vergleiche haben gezeigt, dass die Methode mit 4 extra Nachbarn-Pulsabschaltungen optimal ist. Durch vier Pulsabschaltungen erreichen wir einen gleichmäßigeren Stromverlauf und die Dauer der Pulsabschaltungen ist in der Ansteuerungselektronik implementierbar. Die Homogenität der Phasenstromverläufe wird nachfolgend mit dem Faktor (h) bewertet. Dieser hat einen Wert von ‚1‘ für den Sollstrom. Die Kupferverluste sind quadratisch anhängig von dem RMS-Wert des Stromes und der Mittelwert des Phasenstromes bildet das Drehmoment. Deswegen ist es vorteilhaft dieser Faktor möglichst klein zu halten.

Formel 3

$$h = \frac{I_{rms}}{I_{avg}}$$

Die Bestimmung der Pulsabschaltdauer ist für eine extra Nachbar-Pulsabschaltung (N-PA) nicht kompliziert, aber für mehrere Pulsabschaltungen erhöht sich wegen der Phaseninteraktionen die Komplexität. Deswegen sind diese extra Pulsabschaltdauern mit Hilfe einer Gleichung definiert, die zwei Koeffizienten und die Anzahl der Pulsabschaltungen (n_{pa}) als Variablen enthält. Der Koeffizient „ d_{fall} “ ist die Abfallzeit des Stroms am Ende der halben Periode und „ k “ ist der Kopplungsfaktor zwischen zwei Nachbarphasen. In dieser Gleichung repräsentiert „ d_{pax} “ die Dauer der x . Pulsabschaltung.

Formel 4

$$t_{pax} = t_{fl} - \left(\frac{T_{elec}}{2 \cdot n_{-p}} \right) \cdot x; \quad x = 1 \dots 7$$

$$d_{pa1} = d_{fall} \left(1 - \frac{1}{1 + k + \dots + k^{n_{pa}}} \right); \quad n_{pa} = 1 \dots 7$$

$$d_{pax} = d_{pa(x-1)} \left(1 - \frac{1}{1 + k + \dots + k^{(n_{pa}+1-x)}} \right); \quad n_{pa} = 1 \dots 7, x = 1 \dots 7$$

Phasenstromverlauf mit 6 extra NPA und die dazugehörigen Steuerungssignalen sind in folgender Abbildung dargestellt. Hier sind die Zeitpunkte und die Dauer der extra N-PA zu sehen.

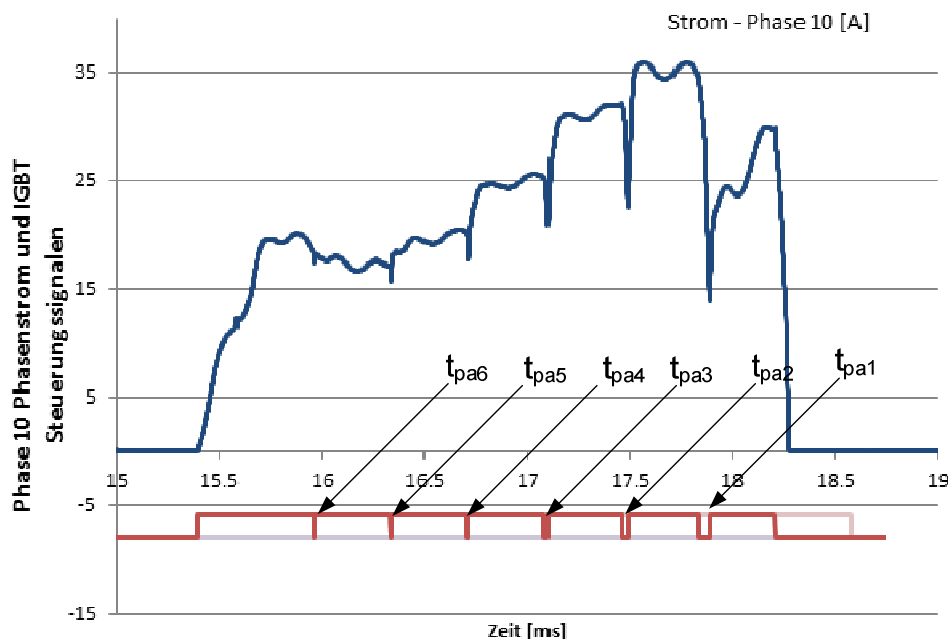


Abbildung 56: Phase 10 - Phasenstrom und IGBT Steuerungssignalen mit 6 Nachbarstrang-Pulsabschaltungen

Dieses Ansteuerungsverfahren ist unter Nutzung des gleichen Regelkreises wie bei einfacher Einsteuerung umsetzbar. Die Logik muss jedoch geändert werden. Zusätzlich müssen die Variablen „ d_{fall} “ und „ k “ für unterschiedliche Betriebszustände bestimmt werden. Dann können diese Information in Tabellenform gespeichert und in der Logik weiter verwendet werden.

2.6.3 Implementierung in der Hardware

Für die Ansteuerung der Elektromaschine wurde zunächst ein Ansteuerboard erstellt, das zur funktionalen Umsetzung ausschließlich auf einer FPLD-Logik beruht (s. Abbildung 57). Im weiteren Projektverlauf wurde das Board um einen Controller erweitert und ermöglicht damit die Implementierung auch der beschriebenen aufwendigeren Regelstrategien.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

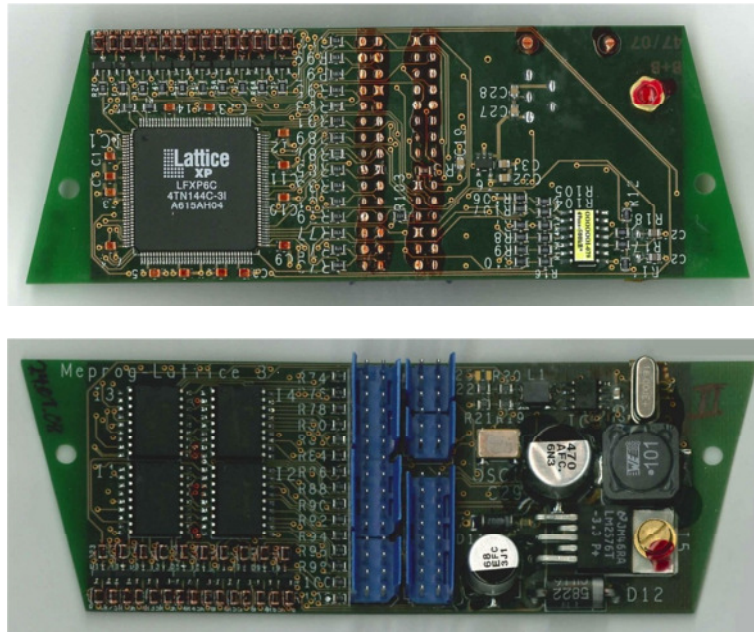


Abbildung 57: Ansteuerboard

So sind basierend auf den in AP 5 durchgeführten Berechnungen und Simulationen zur weitergehenden Untersuchung im realen System die jeweiligen Regelstrategien in dem Ansteuerboard implementiert worden. Dabei war insbesondere in eine effiziente Gestaltung der Softwarealgorithmen zu achten, da aufgrund der kleinen elektrischen Zeitkonstanten sehr schnelle Berechnungen notwendig sind. Weiterhin musste zur Realisierung einer ausreichend abgesicherten Ansteuerung eine umfassende Softwareanalyse durchgeführt werden, die redundante Berechnungen und Plausibilisierungen von Eingangs- und Ausgangsgrößen beinhaltet.

2.7 Sicherheitstechnologie

Eine direkte Radankopplung von elektrischen Antrieben bietet gewisse Vorteile in Ersparnis von teuren Getriebestufen und ist aus heutiger Sicht Stand der Technik bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Zuverlässigkeit solcher Antriebe und das richtige Handling der E-Maschine in allen möglichen Betriebspunkten sind zwei zentrale Punkte für die Sicherheit in einem Fahrzeug. Wird eine oder mehrere sicherheitsrelevante Bedingungen nicht angehalten, so kann es in einem Fahrzeug zu einer Gefahrsituation kommen. Mögliche Gefahrsituationen, die durch einen elektrischen Antrieb oder eine Leistungselektronik hervorgerufen werden können:

1. Isolationbeschädigung
Mögliche Folgen: Kurzschluss, Erwärmung, Stromschlag, Brand
2. Ausfall elektronischer Bauteile
Mögliche Folgen: Falsche Drehmomente, Kurzschluss, Erwärmung, Brand
3. Ausfall mechanischer Bauteile
Mögliche Folgen: Unzulässige Bremsmomente
4. Falsche Ansteuerung
Mögliche Folgen: Falsche Drehmomente

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Die Zuverlässigkeit der in diesem Projekt betrachteten LDE-M kann durch Optimierung der erprobten Wickelverfahren und durch den Einsatz der Teilentladungsmessung garantiert werden. Eine zusätzliche Absicherung kann durch regelmäßige Isolationsprüfungen am Fahrzeug während der Wartungsintervalle garantiert werden. Darüber hinaus ist der Einsatz eines Iso-Wächters beim Einbau der LDE-M in ein Prototypenfahrzeug vorgesehen.

Der Ausfall von elektronischen und mechanischen Bauteilen wird bei der LDE-M durch die ausreichende Reserve bei ihrer Dimensionierung minimiert. Durch eine intensive Erprobung und Dauerläufe auf dem Prüfstand wird das Ausfallsrisiko für Bauelemente im Fahrzeug minimiert. Die Einhaltung von serienrelevanten Normen für die Fahrzeugsicherheit sowie die Durchführung von dafür erforderlichen Fehleranalysen würde den Projektrahmen sprengen und wäre durch eine kleine Mannschaft im dafür vorgesehenen Zeitraum nicht zu bewältigen. Stattdessen wurde der Schwerpunkt der Sicherheit bei der LDE-M auf die Vermeidung bzw. auf die Erkennung offensichtlicher Fehler gelegt. Eine solche Betrachtung ist für Prototypenfahrzeuge zulässig.

2.7.1 Sicherheit Leistungselektronik

Um die Sicherheit der Leistungselektronik gewährleisten zu können, ist in erster Linie eine geeignete Sensierung aller erforderlichen Signale notwendig.

Durch die Verwendung der Hall-Sensoren zur Bestimmung der Rotorlage ist eine hohe Redundanz des Drehzahlsignals gewährleistet. Bei einer entsprechenden Auswertung in der Software können somit Fehler zuverlässig erkannt und eine entsprechende Reaktion eingeleitet werden.

Eine durchdachte thermische Sensierung spielt bei der Sicherheit der LDE-M eine entscheidende Rolle. Im laufenden Projekt wurden bei der Auslegung der Ansteuerungselektronik ausreichend Analogeingänge für die Auswertung der Thermosignale vorgesehen. Somit wird sowohl die Wicklungstemperatur als auch die Halbleitertemperatur überwacht. Optional ist eine Überwachung der Kühlplattentemperatur bzw. der Temperatur vom Kühlmedium möglich. In der Software werden die einzelnen Thermosignale überwacht und plausibilisiert. Für die Auswertung der Thermosignale sind angemessene Reaktionen auf verschiedenen Ebenen vorgesehen. Einerseits werden die Temperaturen an die übergeordneten Steuergeräte auf Fahrzeugebene gemeldet. Bei Überschreitung einer kritischen Temperatur leiten die übergeordneten Geräte auf Fahrzeugebene einen globalen sicheren Zustand ein. Andererseits sind auch interne Reaktionen der Leistungselektronik selbst vorgesehen. Durch Zusammenziehen ihrer Drehmomentgrenzen kann die Leistungselektronik z.B. dem Überhitzen der Komponenten vorbeugend entgegen steuern.

Eine wichtige Rolle bei der Sicherheit elektrischer Antriebe stellt die Reaktion des Antriebes in einem so genannten „Sicheren Zustand“. Die herkömmlichen dreiphasigen Synchronmaschinen werden im „Sicheren Zustand“ erfahrungsgemäß kurzgeschlossen. Das Kurzschließen der E-Maschine führt oft zu nicht unerheblichen Kurzschlussströmen und Bremsmomenten. Im Falle der in diesem Projekt betrachteten LDE-M ist das Kurzschließen der Wicklungen nicht erforderlich. Durch eine geeignete Dimensionierung der Leistungshalbleiter und der EMK der Maschine ist bei LDE-M möglich die EM im „Sicheren Zustand“ im Leerlauf zu betreiben und somit sowohl die Kurzschlussströme als auch die Bremsmomente zu vermeiden.

2.7.2 Sicherheit Gesamtkonzept

Bei dem fahrzeugspezifischen Sicherheitsgesamtkonzept wurden folgende Bestimmungen aus dem Automobilbereich beachtet:

1. Redundante Abschaltwege bis hin zur Treiberansteuerung sollen durchgehend gewährleistet werden

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

2. Ansteuerung der Leistungselektronik erfolgt über CAN-Bus. Hierbei sind folgende sicherheitsspezifische Randbedingungen zu beachten:

- a) Botschaftszähler
- b) CRC8-Checksumme
- c) Timeout-Alive-Überwachung

Die entsprechende Struktur ist im nachfolgenden Bild dargestellt:

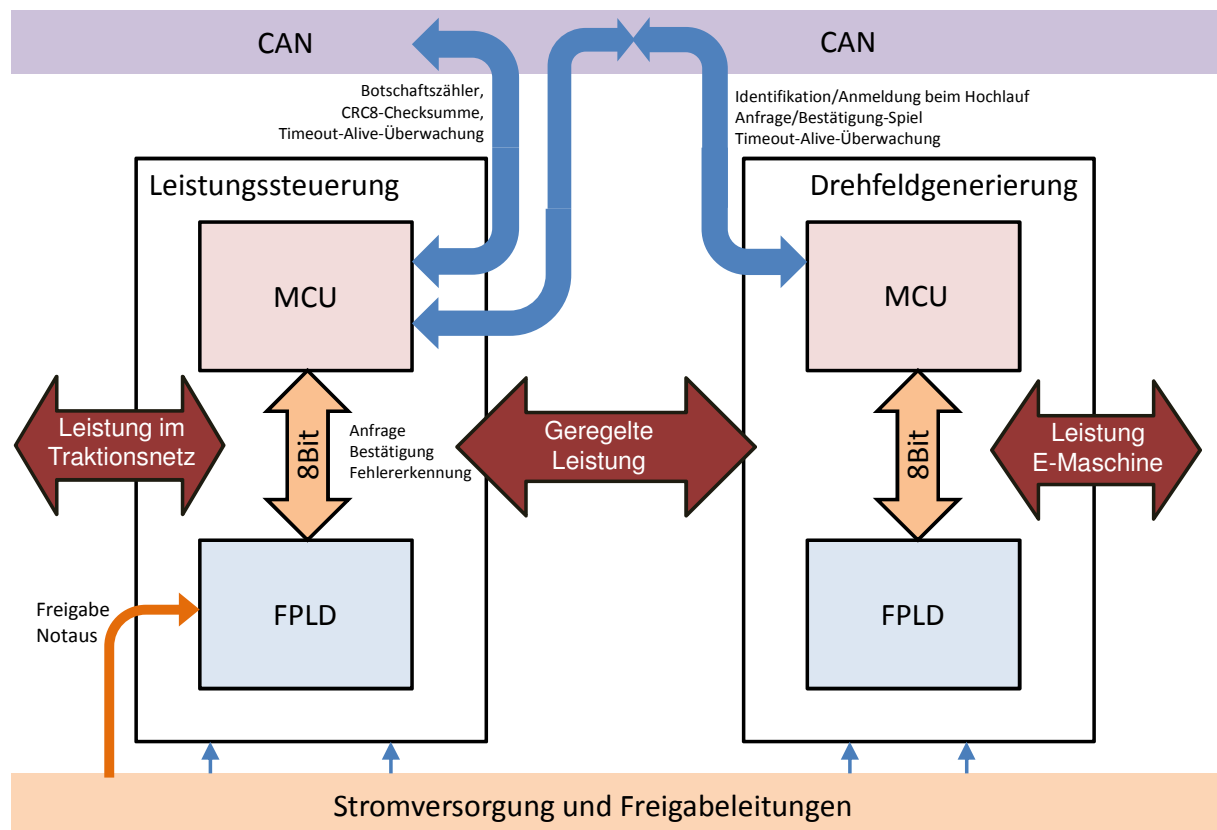


Abbildung 58: Strukturbild Sicherheitskonzept

Im „Sicheren Zustand“ wird der Leistungsfluss durch die Leistungssteuerung unterbrochen. Dies kann sowohl über CAN als auch über die Freigabe-Leitung (Notaus) erfolgen. Die Freigabe schaltet die Treiberstufen der Leistungsmodulen direkt ab. Der „Sichere Zustand“ kann auch per CAN von der übergeordneten Fahrzeugsteuerung angefordert werden. Die Zykluszeit der sicherheitskritischen CAN-Botschaften beträgt 10ms. Mit dieser Zeit ist die Reaktionszeit für CAN-gesteuerte Überwachung bemessen. Fehler und Unterbrechungen auf dem CAN-Bus werden dank Botschaftszähler und CRC8-Checksumme rechtzeitig erkannt und für eine bestimmte Anzahl der CAN-Botschaften (3-5) toleriert.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

2.8 Prüfstandsuntersuchungen

2.8.1 Prüfstandstests Kühlung

Um die Wirksamkeit der Kühlung auf Komponentenebene messtechnisch nachzuweisen wurde ein Messaufbau (siehe Abbildung 59) erstellt. Dieser besteht aus einem im Kühlträger integrierten Stator, dessen Wicklung zusammenschaltet an eine Konstant-Stromquelle angeschlossen ist. Somit ist es möglich verschiedene Wärmeleistungen über die Wicklung in das System einzubringen. Bei dieser Messung ist aber drauf zu achten, dass sie im Wesentlichen einen Wert für die Kühlleistung bezogen auf die ohmschen Verluste beim Betrieb der Maschine liefert. Der Wärmeleitungswiderstand für Blechverluste ist geringer, da Sie im Blech entstehen und damit eine direkte Anbindung an das Kühlsystem haben. Bei den Wicklungen gibt es zusätzlich noch den Wärmeleitwiderstand durch die elektrische Isolation der Kupferleiter gegenüber dem Gehäuse.

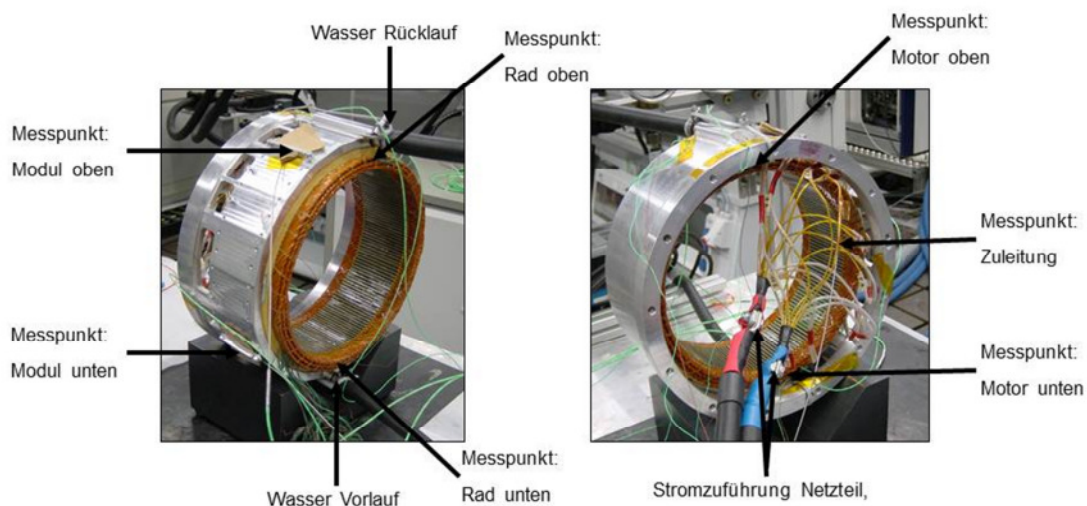


Abbildung 59: Messaufbau Kühlung statisch

Bei den statischen Messungen zur Kühlung liegt neben der Gesamtwärmeabfuhr, die dem Auslegungspunkt entsprechen muss, der Schwerpunkt auf den Leistungsmodulkühlflächen. Im Messdiagramm ist gut zu erkennen, dass die beiden gemessenen Modulkühlflächen nur einen minimalen Temperaturhub durch den Wärmeeintrag der Stators erfahren. Die gemessenen $\Delta 5^\circ\text{C}$ entsprechen dabei der Auslegung und stellen somit eine ausreichende Kühlung der Leistungsmodule sicher. Der Wärmeeintrag aus den Leistungsmodulen wurde bei dieser Messung nicht berücksichtigt. Da die Kühlflächen der Leistungsmodule sich jedoch nur minimal erwärmen und die Kühlwassererwärmung durch die 3,3kW Verlustleistung auch gering ist, kann die Modulkühlung als nahezu separat betrachtet werden und ist damit in den Auslegungsgrenzen.

Die Gesamt-Kühlleistung liegt bei diesem Messaufbau bei 3,3kW für spezifizierte maximale Wickelkopftemperatur von 170°C im Betrieb und entspricht damit der Maschinenauslegung, welche bei 1350kW Kühlleistung liegt.

Kühlmessung LDE-M, Kühlwasser 60°C Vorlauf, Volumenstrom 7,25L

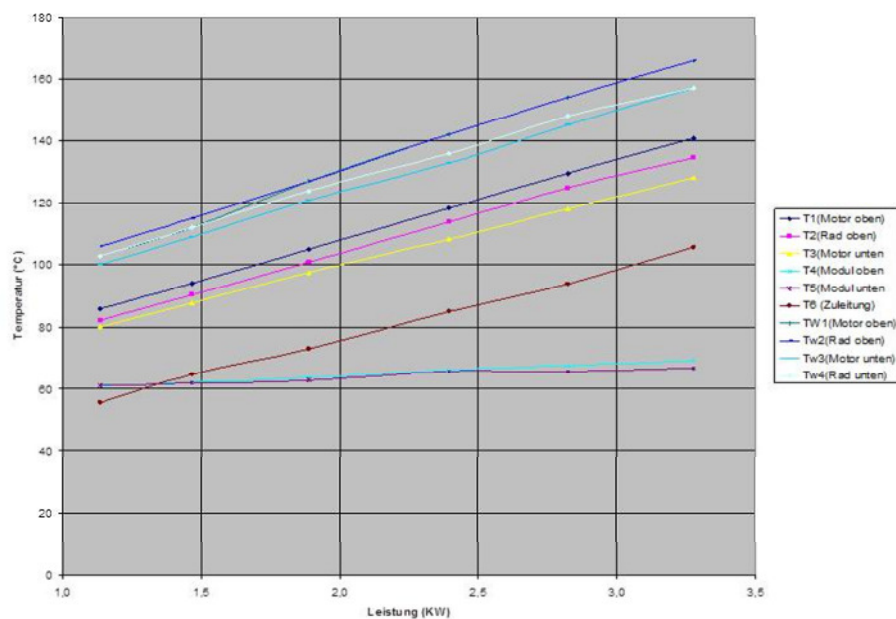


Abbildung 60: Messaufbau Statorkühlung

2.8.2 Prüfstandtests Rotorverstellung

Um die Rotorverstellung im Betrieb sicherzustellen und Informationen über die Funktion des Rotors zu bekommen, wurde ein separater Rotorprüfstand (Siehe Abbildung 61) aufgebaut. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem separaten Antriebssystem für Drehzahlen bis 12.000 U/min und der Lagerung für den separaten Rotor ohne Gehäuse, sowie Messtechnik zur Messung von Drehzahl und Verstellposition.

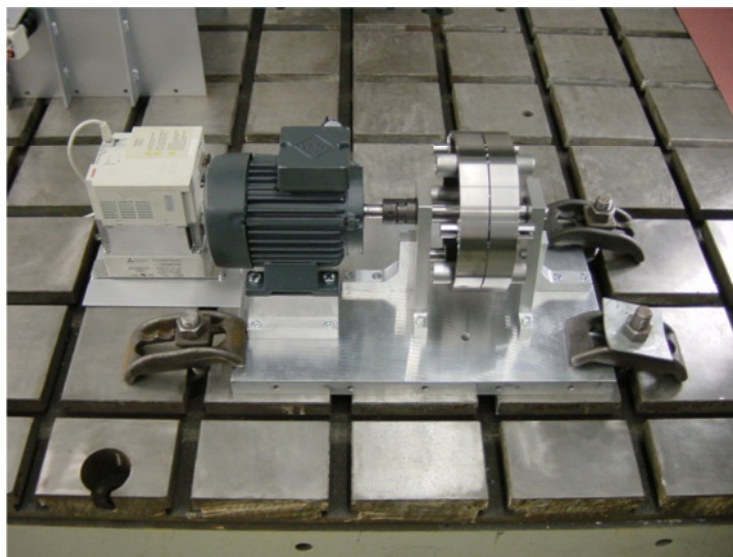


Abbildung 61: Schleuderprüfstand zu Rotorverifikation

Im Rahmen der Messungen wurden verschieden Drehzahlen angefahren und das Verstellverhalten des Rotors in diesen Betriebspunkten dokumentiert und verglichen mit den Anforderungen aus der Systemauslegung. Hierbei zeigt sich im Verstellverlauf eine Hysterese, welche im Wesentlichen auf Reibungen im Verstellsystem zurückzuführen ist. Beeinflussen

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

lässt sich diese im Wesentlichen durch Variation der Oberflächengüte und die Anpassung der relevanten Toleranzen im Hydrauliksystem der Verstellung.

2.8.3 Inbetriebnahme und Vermessung des Aggregats

Die Elektromaschine wurde auf dem Antriebsstrang-Prüfstand vermessen. Die Induktionsspannung der Maschine hat den geplanten rechteckförmigen Verlauf und entspricht der Simulation. Sie hat eine hohe Flankensteilheit im Polwechsel und einen konstanten Dachverlauf und ist somit sehr gut für eine Gleichstrommaschine geeignet.

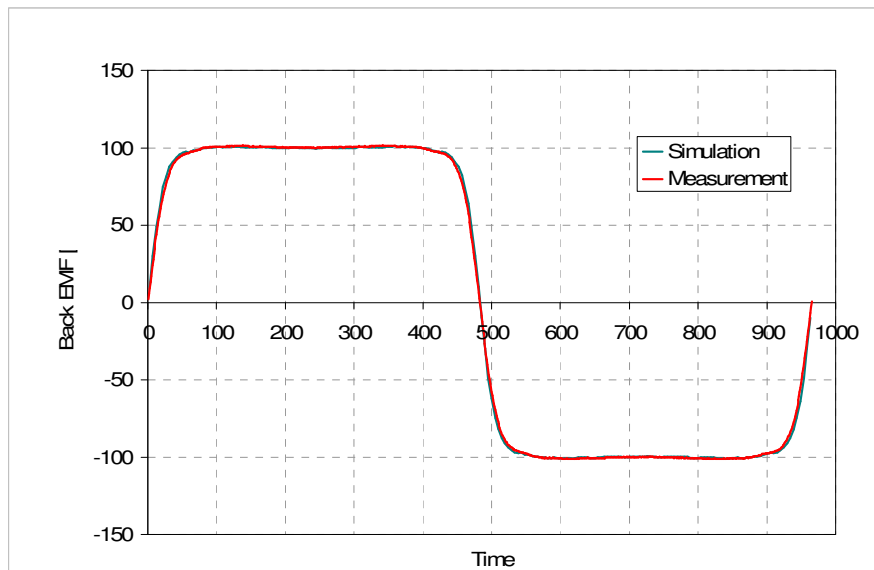


Abbildung 62: Induktionsspannungsverlauf Messung und Simulation bei 1550 1/min

Die Abhängigkeit zwischen Drehmoment und Strom ist im geplanten Drehmomentbereich bis 300 Nm linear. Messung und Simulation sind nahezu Deckungsgleich.

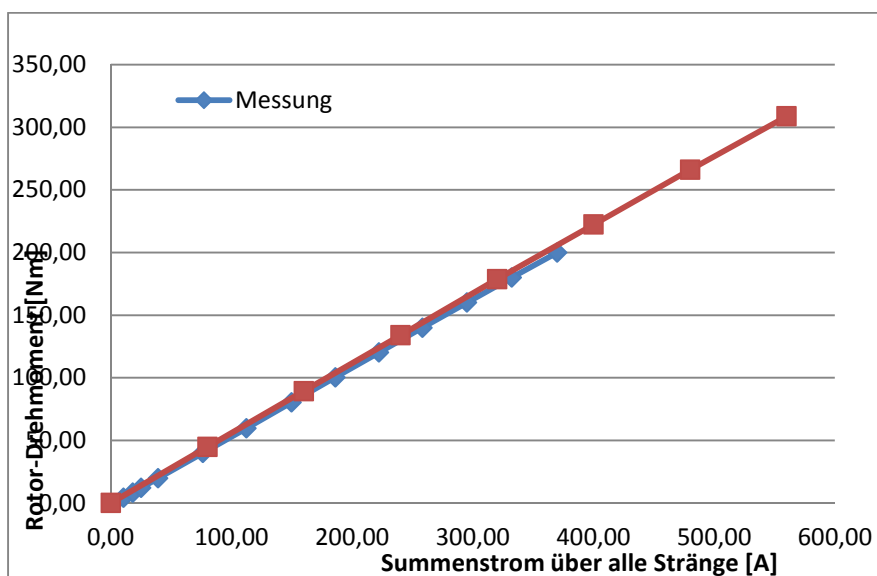


Abbildung 63: Vergleich Drehmoment/Strom Messung – Simulation

Wird die Elektromaschine mit einer einfachen Kommutierung angesteuert, so wird der Stromverlauf nicht geregelt. Beim Ausschalten eines Stranges wird ein Teil seiner Energie in

die Nachbarstränge übertragen. Dies führt dazu, dass der Strom zum Ende der Einschaltphase drastisch ansteigt.

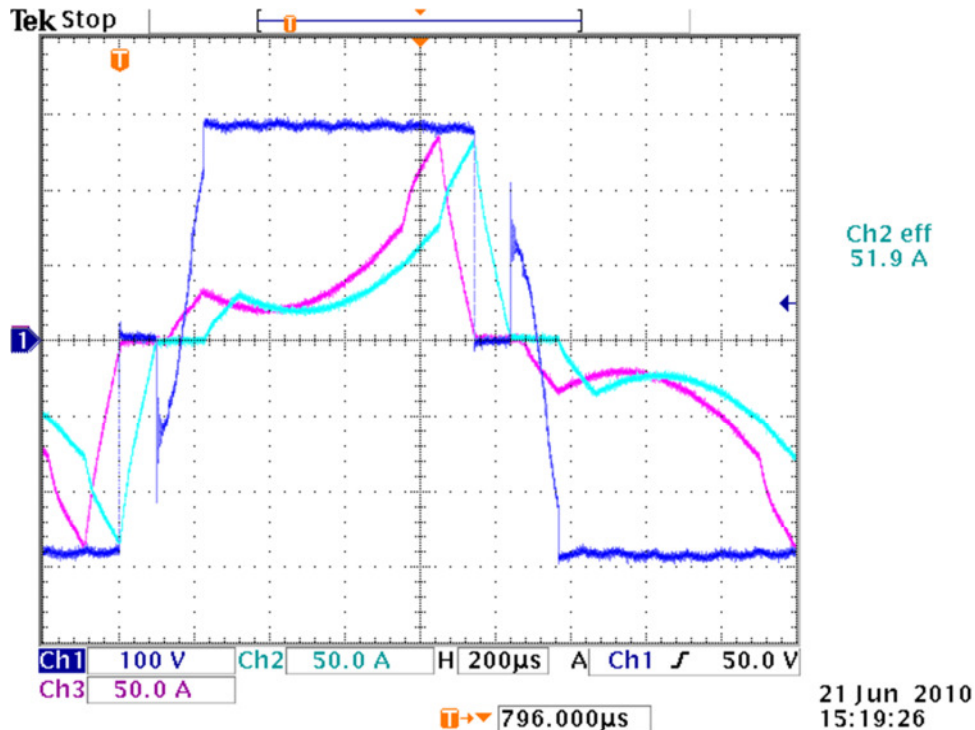


Abbildung 64 Stromverlauf bei 200Nm, 4500 1/min
 Abszisse = Zeit, 200μsec / Segment
 CH1 = Spannung Strang 1, 100 V / Segment
 CH2 = Strom Strang 1, 50 A / Segment
 CH3 = Strom Strang 2, 50 A / Segment:

Der maximale Strom der IGBTs ist auf 150A ausgelegt, der bei einem Moment von 200 Nm erreicht wird (Abbildung 64).

Wie im Kapitel 2.6.2.2 dargestellt, kann durch ein geeignetes Ansteueremuster der Strom geglättet werden. Wird beim Abschalten eines Stranges der Pulstransistor eines Nachbarstranges kurz ausgeschaltet, so lässt sich der maximale Strom um ein Drittel reduzieren. Werden vier Nachbarstränge einbezogen so lässt sich der maximale Strom halbieren (siehe Abbildung 55(d)).

Damit wird es möglich, einen größeren Mittleren Strom und somit ein Drehmoment bis zu 300 Nm zu erreichen.

Die Abschaltung des Pulstransistors des nächsten Nachbarstrangs wurde in der Ansteuerung implementiert und zeigte die in der Simulation vorhergesagten Änderungen des Stromverlaufs.

In Abbildung 65 ist eine Messung dargestellt, bei der beim Abschalten eines Stranges der Pulstransistor des Nachbarstrangs für kurze Zeit (hier 18 μs bei 500 1/min und 30 Nm) abgeschaltet wird. Der Stromanstieg im letzten Teil der Einschaltung konnte hiermit vollständig unterdrückt werden.

LDE-M Vergleich ohne Pulsabschaltung mit 18us Pulsabschaltung
500 1/min, 30 Nm

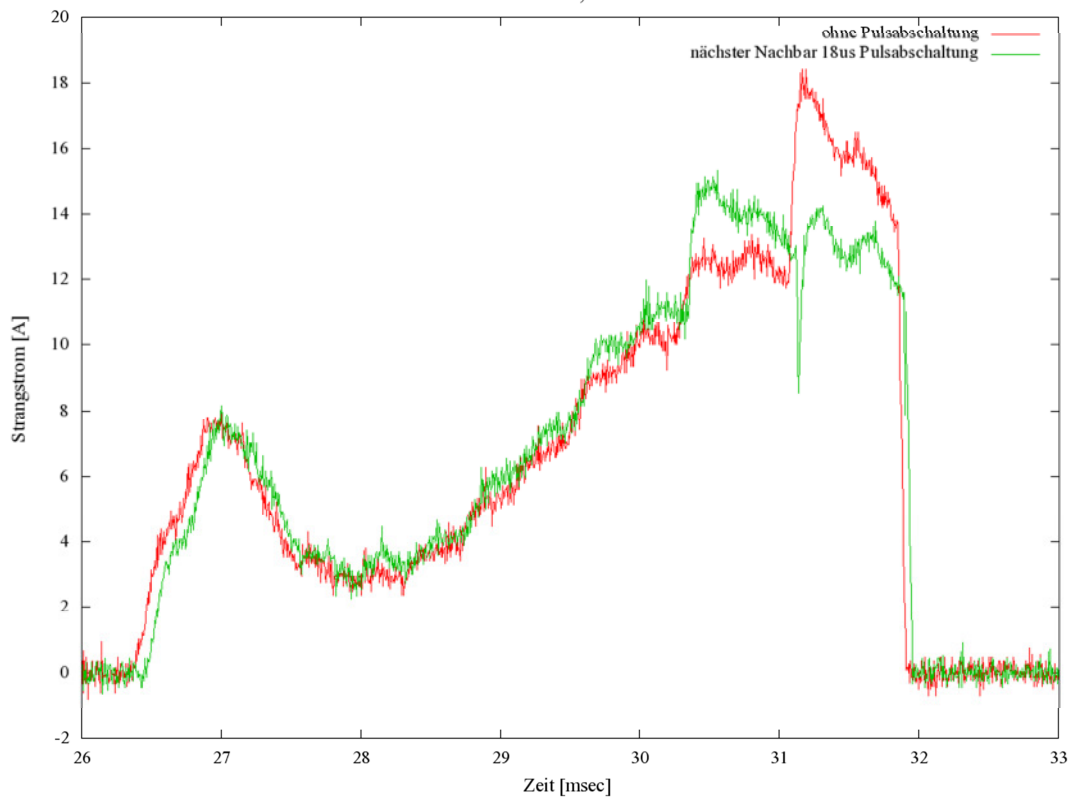


Abbildung 65: Messung Stromverlauf mit und ohne Pulsabschaltung

Kennfeldmessung

Zur Kennfeldmessung wurden die Eingangsspannung der Elektromaschine und das Bremsmoment des Prüfstands geregelt. Das Kennfeld wurde bis zu einem Rotordrehmoment von 200 Nm und einer Rotordrehzahl von 6000 1/min aufgenommen. Dabei wurde die Peakleistung von 85kW erreicht und konnte kurzzeitig auch überschritten werden.

Die Nachbarstrang-Pulsabschaltung stand bei Vermessung der Maschine noch nicht zur Verfügung. Deshalb wurden die Messungen an der Elektromaschine mit einer einfachen Kommutierung durchgeführt und das maximale Drehmoment auf 200 Nm eingeschränkt.

In Abbildung 66 ist die Messpunktverteilung für die Kennfeldmessung angegeben. Das Wirkungsgradkennfeld ist in Abbildung 67 abgebildet.

Wirkungsgraddiagramm Messpunktverteilung LDE-M

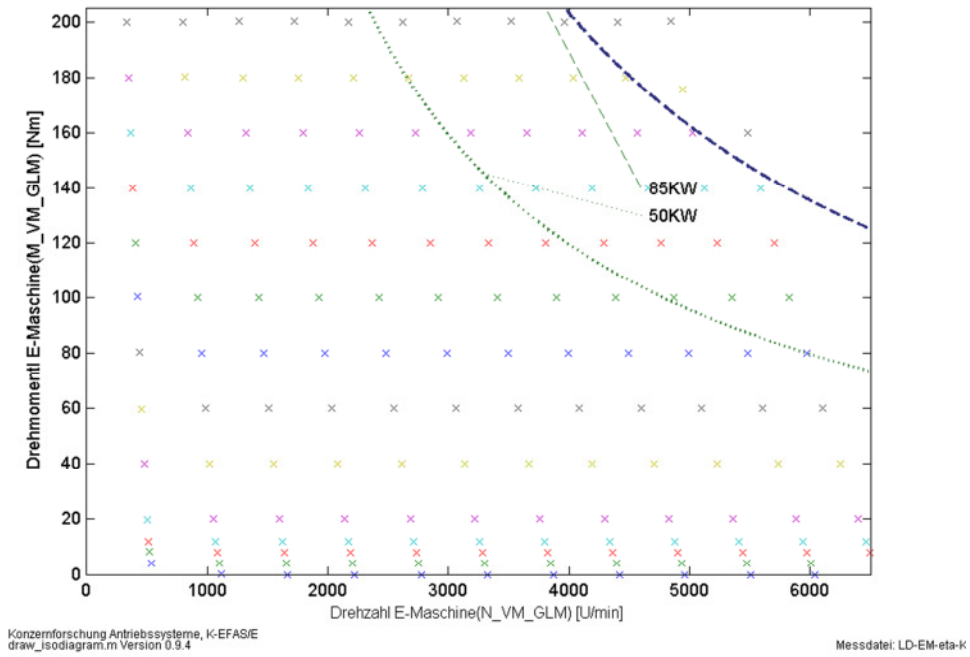


Abbildung 66: Messpunktverteilung Wirkungsgradkennfeld

Wirkungsgraddiagramm LDE-M

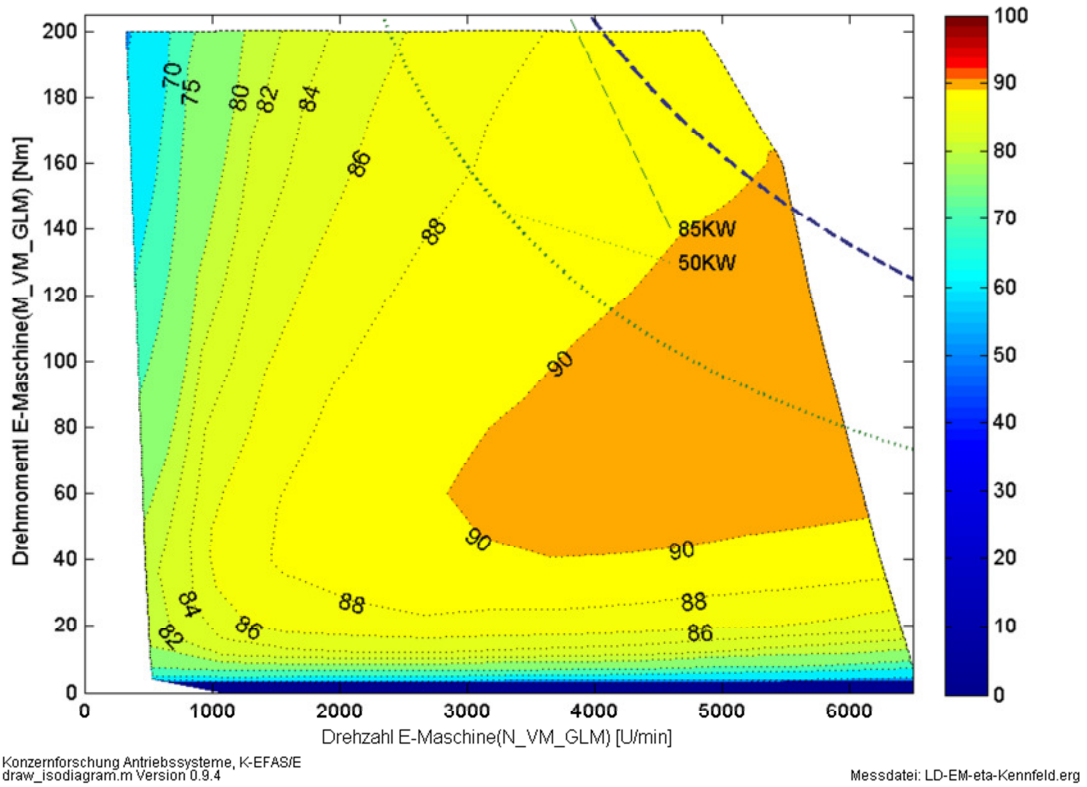


Abbildung 67: Wirkungsgradkennfeld

Die Kennfeldmessung wurde mit feststehendem Rotor durchgeführt. Die Rotordrehzahl der Elektromaschine wurde dabei auf etwa 6000 1/min beschränkt, da in diesem Punkt die Induktionsspannung der Maschine die Auslegungsgrenze von 400V erreicht.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Thermische Untersuchungen

Bei der Kennfeldaufnahme wurden die 85kW Messpunkte für etwa 10 Sekunden gehalten. Dabei hat sich der Stator maximal auf 20K über Kühlwassertemperatur aufgeheizt. Die thermischen Grenzen sind nach 10 Sekunden dementsprechend bei weitem noch nicht ausgeschöpft, so dass die Leistung von 85kW für deutlich mehr als 10 Sekunden gehalten werden kann.

Eine thermische Untersuchung der Elektromaschine zur Bestimmung der Dauerleistung wurde messtechnisch nicht durchgeführt.

2.8.4 Konstruktion und Fertigung mechanischer Verbindungen

Zur Aufnahme des in dem Vorhaben aufzubauenden elektrischen Antriebs auf einen Prüfstand sind mechanische Verbindungselemente nötig, die eine Prüfung der Maschine durch Lastmaschinen gewährleisten können. Hier sind Konstruktionsarbeiten und Fertigungsarbeiten zu leisten. Bei diesen Konstruktionsleistungen unterstützt Fa. Gerhartl.

2.9 Feldversuchnaher Test

Der fertiggestellte Antriebs sollte nach abgeschlossener Prüfstandserprobung in ein Fahrzeug der TwinDrive®-Flotte aus dem Förderprojekt „Flottenversuch Elektromobilität“ verbaut werden, das allerdings mit diesem Antrieb nicht innerhalb des Flottenbetriebs einsetzbar gewesen wäre, weil die notwendigen Sicherheitsanforderungen für den Einsatz vor Kunde nicht mit dem vorliegenden Prototypenstand erfüllt würden.

2.9.1 Integration des Antriebs in Prototypenfahrzeug

Die Integration des Antriebs in ein TwinDrive® Zielfahrzeug wurde daher entsprechend vorbereitet. Dies betraf die Gehäusekonstruktion mit Flanschen, mechanischen Halter und Wellenadapter, wie auch die Anpassung und Abstimmung der Kommunikationsschnittstellen.

Die oben geschilderten Schwierigkeiten, die sich bei der Antriebserprobung ergaben, resultieren derzeit noch in einer starken Performanceeinschränkung für einen Fahrzeugbetrieb. Daher wurde die Integration des Antriebs in das Fahrzeug zu Projektende nicht mehr als sinnvoll erachtet und musste somit für die Umsetzung im Rahmen des Projektes aufgegeben werden.

2.9.2 Erprobung des Antriebs im Fahrzeug

Mit dem Unterbleiben der Fahrzeugintegration konnte entsprechend die geplante Untersuchung des neuen Antriebs im Fahrversuch nicht im Rahmen des Projektes stattfinden.

2.10 Ausblick

Es ist möglich, die interne Leistungselektronik, die bisher nur zur Kommutierung und Stromglättung verwendet wird, auch zur Stromregelung zu verwenden. Damit kann nicht nur die gesteuerte Stromglättung entfallen, sondern dies ist auch Grundlage für eine interne Spannungsstellung. Dazu würden die IGBTs mit einem Pulsmuster angesteuert, um den Strom zu glätten und den Strommittelwert zu regeln. Hierzu wurden bereits einige Voruntersuchungen mit fester Pulsweite durchgeführt (s. Abbildung 68).

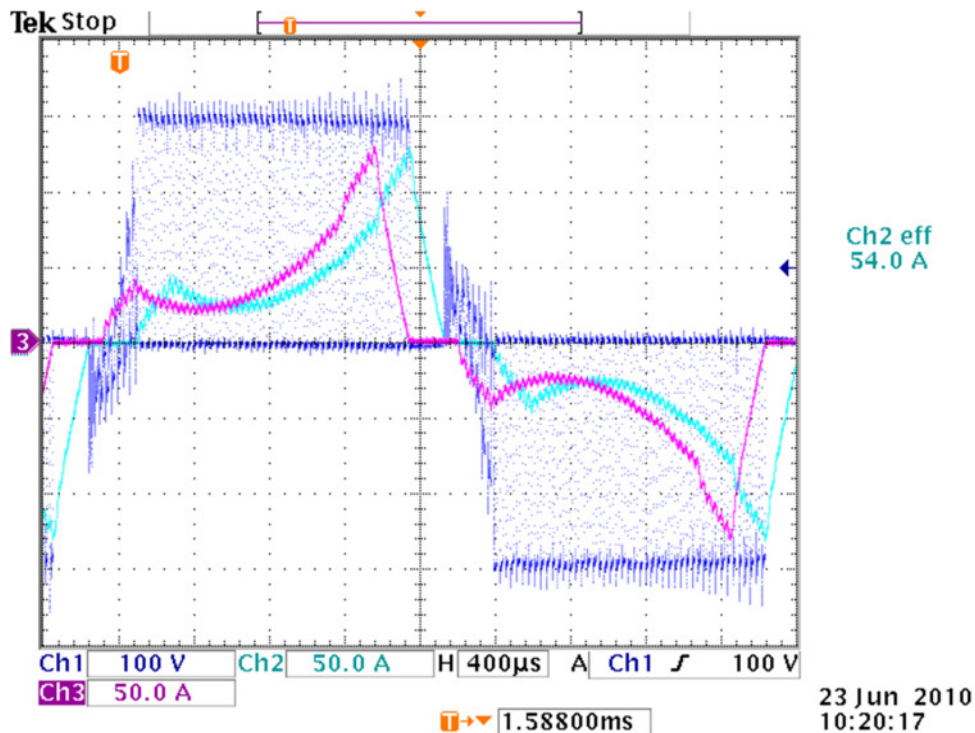


Abbildung 68: Stromverlauf bei 200 Nm, 2000 1/min mit gepulster Ansteuerung

Abszisse = Zeit, 400µsec / Segment
 CH1 = Spannung Strang 1, 100 V / Segment
 CH2 = Strom Strang 1, 50 A / Segment
 CH3 = Strom Strang 2, 50 A / Segment

2.11 Zusammenfassung

Im Zentrum dieses Vorhabens stand die Definition und Erforschung eines sehr leistungs- und drehmomentdichten elektrischen Antriebs. Dieser wurde mit dem Konzept der blockgeschalteten Gleichstrommaschine und dem Ansatz einer mechatronischen Integration der leistungselektronischen Komponenten identifiziert. Dieses Maschinenkonzept impliziert eine Vollbrückensteuerung der Einzelstränge und eine elektronische Nachführung der Maschinenspannung, die sinnvollerweise stromgeregelt eingestellt wird. Diese Spannungsstellung erfolgte im Projekt zunächst der Kommutierelektronik vorgelagert über eine DC/DC-Wandlung. Die Umsetzung der im Konzept vorgesehenen PWM-Modulation konnte im Projekt nur ansatzweise untersucht werden.

Ergänzend zu dem Maschinenkonzept wurde mit der Rotorschalenverstellung eine mechanische Lösung für die Flussschwächung im höheren Drehzahlbereich eingeführt. Diese Flussschwächung ist gleichzusetzen mit der Adaption der Maschinenkonstanten und ermöglicht damit die Verwendung von Halbleitern der 600V Bauelementklasse, obwohl die Nenn-EMK der Maschine bei nichtverstelltem Rotor ca. 800V für das spezifizierte Drehzahlmaximum beträgt.

Bei der Umsetzung der Maschine wurden gezielt neue Materialien und Aufbauverfahren eingesetzt – wie feine Blechung, Magnetstückelung, dünnwandige Isolation, Rechtecklitzedraht, Moldmodultechnik, feine Kühlerstrukturen.

Im Laufe der Untersuchung stellte sich heraus, dass durch die bewusst gewählte vielsträngige Mäanderwicklung die Nachbarstrangkopplung das Einstellen eines ideal rechteckförmigen Strangstromes schwierig macht. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch Ansätze gesteuerter Mitpulsens mehrerer Stränge oder durch Einzelstrangregelung ein nahezu recht-

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

eckförmiges Strombild erreicht werden kann. Eine vollständige Umsetzung in der Antriebssteuerung steht aus.

3 Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung

Konzeptentwicklung, physische Umsetzung und Prüfstandsbetrieb eines neuen, ganzheitlichen Maschinenansatzes für Hochleistungsdichte Elektromaschinen für Hybridfahrzeuge konnten im Rahmen dieses Vorhabens erreicht werden. Damit ist eine umfangreiche Bewertbarkeit dieses Konzeptes möglich geworden. Verglichen mit dem Stand der Technik konnte ein Antrieb dargestellt werden, der bei vergleichbarer Performance und bei vergleichbarem Außendurchmesser des Antriebs nur 70 mm Statorbreite aufweist, anstatt ca. 110 mm bei einer optimierten, seriennahen dreiphasigen permanentenerregten-Sinusmaschine.

Die mechatronische Integration der Leistungselektronik spart zusätzlich ein Großteil des benötigten Systemvolumens ein.

Bezogen auf den vorgesehenen Arbeitsplan ist das Projekt in den überwiegenden Arbeitspaketen erfolgreich zum Ziel gebracht worden. Die Probleme der Stromverlaufsoptimierung und die Schwierigkeiten mit der Bereitstellung der anwendungsspezifisch gefertigten Leistungsmodule mit ausreichender Toleranz verhinderten zum jetzigen Projektstand die Darstellung der vollen Maschinenperformance über den gesamten spezifizierten Betriebsbereich. Die abschließend geplante und vorbereitete Integration in ein Versuchsfahrzeug ist daher im Rahmen des Vorhabens nicht mehr möglich gewesen.

Insgesamt ist das Projektziel sehr erfolgreich erreicht worden. Die Darstellung und Untersuchung eines derart neuartigen und leistungsdichten Antriebs in einer sehr kurzen Projektlaufzeit ist gelungen und seine großen Potenziale konnten messtechnisch nachgewiesen werden. Damit konnte die Kernaufgabe des Projektes gut erfüllt werden.

4 Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

Die dargestellte Maschine zeigt die Potenziale eines ambitionierten, aber nicht utopischen Einsatzes moderner Materialien, Verfahren und innovativer Konzepte für Traktionselektromaschinen im Automobil. Wenn es gelingt, diese Technologien kostengünstig in Serienantrieben einzusetzen, ist damit ein erheblicher Bauraumvorteil für Hybridfahrzeugkonzepte – wie den TwinDrive® – zu erzielen.

Die Beherrschung der starken Überkopplung der Stränge verlangt wie in Kapitel 2.10 beschrieben weitere tiefgehende Untersuchungen. Diese werden im Nachgang zu diesem Vorhaben durchgeführt werden.

Aus diversen Ergebnissen der vorliegenden Prototypuntersuchung ergibt sich für die Vorbereitung des Konzepts im Vorfeld einer Serienanwendung die Notwendigkeit des noch tieferen Verständnisses der dynamischen Effekte und einer detaillierteren Optimierung.

In Bezug auf die Einschätzung der Technologiemöglichkeiten beim elektrischen Fahrzeugantrieb sind die Ergebnisse für zukünftige Antriebsstrang- und Fahrzeugkonzepte von sehr hohem Wert. Es konnten wichtige Erfahrungen bei der Statorfertigung zu Einsatz und Umgang mit den neuen Materialien gewonnen werden.

Trotzdem darf insgesamt nicht übersehen werden, dass der technologische Stand einer blockgeschalteten Gleichstrommaschine für Traktionsanwendung im Fahrzeug noch weit entfernt ist von dem der feldorientiert geregelten Dreiphasen-Sinusmaschinen.

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

Intensiver Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist notwendig, um den theoretischen Vorteil des Konzepts zu realisieren und unter Serien- und Kostenaspekten wettbewerbsfähig zu machen.

Die Resultate dieses Projektes werden intern der Serienentwicklung zur Verfügung gestellt und werden dort zur konkreten Einschätzung von Anwendbarkeit und Termin eines Serieneinsatz der Technologien führen. Dieses Wissen ist elementar und von großem Nutzen für die weitere technologische Roadmap. Gleichzeitig werden auch die Technologieerfahrungen den Fertigungsstellen verfügbar und somit an anderer Stelle einer Anwendung der Weg ebnet.

In diesem Projekt gewonnene Ergebnisse zu Blech- und Isolationstechnologie sind bereits in Vorentwicklungsprojekte im Bereich der Komponente Elektromaschine eingeflossen.

5 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des BMU (Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

Wie oben erläutert ermöglichen Vollhybridantriebe bereits erhebliche Verbrauchseinsparungen und tragen damit zur Senkung der CO₂-Emissionen bei. Um letztendlich schrittweise in für die breite Masse finanzierbaren und attraktiven Fahrzeugen das Potenzial von regenerativ erzeugter elektrischer Energie für den Fahrzeugantrieb zu nutzen, müssen Fahrzeuge der Plug-In-Klasse mit deutlichen rein elektrischen Reichweiten zum Einsatz kommen. Da diese ihre notwendige Antriebsleistung sowohl elektrisch als auch verbrennungsmotorisch installiert bekommen müssen, ist Leistungs- und Drehmomentendichte des elektrischen Antriebssystems unter den gegebenen Bauraumeinschränkungen von eminenter Bedeutung.

Ein hochkompakter, leistungsstarker Elektroantrieb nach dem hier untersuchten Konzept könnte bei Serienumsetzung Antriebsstränge ermöglichen, die über verschiedene Fahrzeugklassen hinweg bei großem Kundengefallen zu akzeptablen Kosten ein weitgehend elektrisches Fahren ermöglichen. Damit wäre dies ein großer Schritt auf dem Weg zur Elektromobilität.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Auf der Hannover Messe 2011 wurde die Projektidee einer Hochleistungsdichten Elektromaschine mit hohem Integrationsgrad präsentiert. Mit Hilfe eines Exponats zu den aktiven Maschinenkomponenten:

- Stator mit vielphasiger Mäanderwicklung und dünnen, hochsilizierten Blechen
- Rotor mit Oberflächenmagneten

veranschaulicht.

7 Literatur

- [1] Mertens, C.:
Anforderungen an integrierte Leistungselektronik im Hybridfahrzeug bei hohem Kühltemperaturniveau, Braunschweiger Hybridsymposium, Braunschweig 2009.
- [2] Mertens, C.:
Silbersintern für zuverlässige Hochtemperaturleistungselektronik, IMAPS Seminar 2009, Ilmenau

Leistungsdichte Elektromaschine LDE-M	FKZ 16EM0034
Abschlussbericht	

- [3] Henke, M.:
Elektrische Maschinen und Leistungselektronik im Kraftfahrzeug,
Autostadt Wolfsburg 2009
- [4] Böhm, T.; Hofmann, L.:
Electrification of the drive train – challenges and opportunities,
FISITA 2008, München
- [5] Böhm, T.; Kube, R.; Hofmann, L.
Energiemanagement für Hybridantriebsstränge. Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, Februar 2006.
- [6] Rius-Sambeat, B.; Kube, R.
Anforderungen an Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge. Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, Februar 2006.
- [7] Kube, R.; Böhm, T.
Storage systems in the automotive sector including hybrid electric cars.
ECPE Seminar Energy Storage Technologies, Aachen, June 2007.
- [8] Steiger, W.
Neue Kraftstoffe für zukünftige Brennverfahren? 5. Dresdner Motorenkolloquium
"Zukünftige Brennverfahren für Dieselmotoren", Dresden, Juni 2003.
- [9] Steiger, W.; Scholz, I.; Petersen, R.; Kube, R.
Faszination Fahrzeugantrieb. VDI Tagung "Getriebe in Fahrzeugen 2006", Friedrichshafen,
Juni 2006.
- [10] Hofmann, L.; Steiger, W.; Böhm, T.; Willand, J.
Technik und Potenziale des Volkswagen-Vollhybrid-Konzepts. 14. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2005.
- [11] Steiger, W. Böhm, T., Schulze, B.-G.
Direkthybrid – eine Kombination von Verbrennungsmotor mit einem elektrischen
Getriebe. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [12] Stöhr, G.
Untersuchungen zum Aufbau einer hocheffizienten Kühlung einer elektrischen
Maschine mit großer Leistungsdichte, Dissertation TU Berlin 2007
- [13] Neuschl, Zdeno
Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisen-
verluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionalem Axial-
fluss, Dissertation Technische Universität Cottbus, 2007
- [14] DE 199 45 368 A 1, Magnetoelektrische Maschine, Volkswagen AG

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel LDE-M – Leistungsdichte E-Maschine	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Amecke, Holger; Besch, Christiane; Bostanci, Emine; Martin, Sven; Dr. Mertens, Christian; Dr. Neuschl, Zdeno; Dr. Plikat, Robert; Rauch, Oliver; Schulze, Elisabeth; Strauss, Henning; Wetzels, Hermann	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2011
	6. Veröffentlichungsdatum 31.10.2011
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Volkswagen AG Konzernforschung – Antriebe Brieffach 1778 38436 Wolfsburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EM0034
	11. Seitenzahl 63
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Alexanderstraße 3 10178 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 68
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen der fortschreitenden Elektrifizierung von Antriebssträngen in Kraftfahrzeugen werden leistungs- und drehmomentdichte elektrische Maschinen benötigt, deren technische Eigenschaften den Anforderungen an die Fahrzeugtraktion entsprechen. Die elektrischen Antriebe, bestehend aus leistungselektronischen Stellgliedern und elektrischer Maschine müssen nicht nur sehr restriktiven Bauraumvorgaben genügen sondern auch speziell auf die Erfordernisse und Umwelteinflüsse im Automobil abgestimmt sein. In den zurzeit realisierten Elektro- und Hybridfahrzeugen werden Leistungselektronik und Elektromaschine als separate Komponenten im Fahrzeug verbaut. Dies erfordert separat ausgeführte Kühlsysteme und einen erheblichen Aufwand an Leitungsverlegung. Im Rahmen des Projektes LDE-M wurde eine hochleistungs- und drehmomentdichte Elektromaschine in mechatronischer Integration mit der Leistungselektronik aufgebaut. Dabei wurde das Prinzip einer elektronisch kommutierten DC-Maschine verfolgt. Im Vordergrund standen die Simulation, Auslegung, Optimierung und die Prüfstandserprobung des Hochleistungselektroantriebs. Bei der Umsetzung der Maschine wurden gezielt neue Materialien und Aufbauverfahren eingesetzt. Im Laufe der Untersuchung stellte sich heraus, dass durch die vielsträngige Wicklung die Nachbarstrangkopplung das Einstellen eines ideal rechteckförmigen Strangstromes schwierig macht. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch Ansätze gesteuerten Mitpulsens mehrerer Stränge oder durch Einzelstrangregelung ein nahezu rechteckförmiges Strombild erreicht werden kann.	
19. Schlagwörter Hochleistungsdichte Elektromaschine, Leistungselektronik-Integration, Elektrobleche, Elektromobilität, elektrifizierter Antriebsstrang	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title LDE-M – Leistungsdichte E-Maschine	
4. author(s) (family name, first name(s)) Amecke, Holger; Besch, Christiane; Bostanci, Emine; Martin, Sven; Dr. Mertens, Christian; Dr. Neuschl, Zdeno; Dr. Plikat, Robert; Rauch, Oliver; Schulze, Elisabeth; Strauss, Henning; Wetzel, Hermann	5. end of project 30.09.2011
	6. publication date 31.10.2011
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Volkswagen AG Corporate research - powertrain Letterbox 1778 D-38436 Wolfsburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 16EM0034
	11. no. of pages 63
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Alexanderstraße 3 10178 Berlin	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures 68
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract With ongoing electrification of cars a growing need for electrical machines of highest power and torque density is observed. Such machines have to fit the special technical requirements of automotive powertrain. The electric powertrain system consisting of power electronic switches and electric machine have to fulfill the constructed space restrictions and the special ambient requirements. Today the electric power train of EV or HEV consists of two separate components for electric machine and power electronics with separate coolers and a lot of effort for electrical contacts and wiring. In the project LDE-M a mechatronically integrated electrical machine of high power and torque density was invented and investigated. It worked on the principle of a brush-less DC-machine. The investigation covered design, simulation, construction, optimization, set-up and testing of the integrated traction system. In the design of the machine new materials and set-up technologies were applied selectively. The investigations turned out that the multiphase winding is associated by a high degree of phase coupling which hinders the adjustment of an ideal rectangular run of the current. By subsequent analyses it could be proved that a parallel pulsing of multiple phases or a single phase control strategy will result in a nearly rectangular run of the current.	
19. keywords Electrical traction machine, high power density, Integration of power electronics, electromobility, electrical sheet, electrification of power train	
20. publisher	21. price