

BMW-Verbundprojekt: TOPMAGNET

Topologische Optimierung für einen
energieeffizienten elektrischen Fahrzeugantrieb
bei verbesserter Magnetmaterialnutzung

Teilvorhaben

Entwicklung einer Werkstoffdifferenzierungsmethode
mit Erprobung

Schlussbericht

Volkswagen AG

vom 01.06.2016 bis 31.12.2019

Förderkennzeichen: 01MY15008A

Autoren:

Dr.-Ing. Harald Decker

Dr.-Ing. Steffen Rothe

Dr.-Ing. Bettina Schröder

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
I. Kurzdarstellung des Projekts	5
I1. Aufgabenstellung.....	5
I2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	6
I3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
I4. Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
I5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II. Eingehende Projektdarstellung	11
II1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
II1.1. Übersicht der Ziele, der Ergebnisse und der Verwendung	11
II1.2. Erzielte Ergebnisse in eingehender Darstellung.....	15
II1.2.1. Anforderungen und Zielstellung.....	15
II1.2.2. Methodenbausteine.....	20
II1.2.3. Methodenevaluation	23
II1.2.4. Optimierungsalgorithmus in der Anwendung	27
II1.2.5. Mechanische Berechnung.....	36
II1.2.6. Elektromagnetische Berechnung.....	37
II1.2.7. Thermische Berechnung	38
II1.2.8. Strukturdynamische Berechnung	40
II1.2.9. Vorbereitung Erprobung.....	42
II1.2.10. Durchführung Erprobung.....	44
II1.2.11. Auswertung und Analyse Versuch/Simulation	48
II1.2.12. Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse.....	52
II2. Zahlenmäßiger Nachweis	53
II3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	54
II4. Verwertbarkeit nach Verwertungsplan	55
II5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens.....	56
II6. Ergebnisveröffentlichung	56
Literaturverzeichnis	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Halbschnitt eines e-Golf-Antriebs (Quelle: http://emobility.volkswagen.ch)	15
Abbildung 2:	Verlauf von Drehmoment und Spannung über der Drehzahl	16
Abbildung 3:	Verlauf von Drehmoment und Leistung über der Drehzahl	17
Abbildung 4:	Prinzipielle Darstellung der Drehmomentwelligkeit	17
Abbildung 5:	Bewertung der Entmagnetisierung	18
Abbildung 6:	Beispiele für die Umschaltfunktionen der remanenten Flussdichte und der relativen magnetischen Permeabilität in Abhängigkeit der Entwurfsvariablen.....	21
Abbildung 7:	Beispiele für die Umschaltfunktionen des Elastizitätsmoduls und der Dichte in Abhängigkeit der Entwurfsvariablen.	22
Abbildung 8:	Übersicht Methodenbeispiele	23
Abbildung 9:	Ergebnis einer elektromagnetischen Optimierung.....	24
Abbildung 10:	Ergebnis der strukturmechanischen Optimierung	25
Abbildung 11:	Ergebnis einer gekoppelten strukturmechanischen und elektromagnetischen Optimierung	26
Abbildung 12:	Übersicht der Optimierungsaufgabe mit Zielfunktion und Nebenbedingungen	29
Abbildung 13:	Optimierungsprozess	30
Abbildung 14:	Grundoptimierungsmodell.....	30
Abbildung 15:	Startverteilung der Topologieoptimierung.....	31
Abbildung 16:	Optimierungsgebiet (gelb) der Magnet-Eisen-Luft Optimierung.....	32
Abbildung 17:	Ergebnis der Magnet-Eisen-Luft Optimierung	32
Abbildung 18:	Startverteilung der Eisen-Luft Optimierung	33
Abbildung 19:	Optimierungsgebiet (gelb) der Eisen-Luft Optimierung	33
Abbildung 20:	Ergebnis der Eisen-Luft Optimierung.....	34
Abbildung 21:	Ergebnisse der Rotorschrägungswinkeloptimierung	35
Abbildung 22:	CAD-Geometrie des Rotorblechschnitts des Demonstrators	35
Abbildung 23:	Von Mises Spannungen im Demonstrator (links), plastische Dehnungen (rechts)	36
Abbildung 24:	Maximaldrehmomentkennlinie (links), Leistungs-Drehzahl Kurve (rechts)	38
Abbildung 25:	Simulierte Temperaturverteilung im Dauerbetrieb des Demonstrators	39
Abbildung 26:	Simulierte Temperaturverteilung im Dauerbetrieb der Referenzmaschine	39
Abbildung 27:	Simulierte Drehmomentwelligkeiten, Referenzmaschine und Demonstrator	40
Abbildung 28:	Simulierte radiale dynamische Luftspaltkräfte, Referenzmaschine und Demonstrator	41
Abbildung 29:	Fertiges Lamellenpaket (links), Schrägung des Rotors (Mitte), gefügter Rotor (rechts).....	42
Abbildung 30:	Verlauf des radialen magnetischen Feldes über ein Polpaar	43
Abbildung 31:	Kabelführung innerhalb des Telemetrieaufbaus.....	43
Abbildung 32:	Experimenteller Vergleich Referenzmaschine/Demonstrator: EMK (links), Maximaldrehmomentkennlinie (rechts).....	45

Abbildung 33: Experimenteller Vergleich Referenzmaschine/Demonstrator: Dauerkennlinie.....	46
Abbildung 34: Vergleich der E-Maschinenverluste mit eingetragenem WLTP-Zyklus	46
Abbildung 35: Akustische Fingerabdrücke der relevanten E-Maschinenordnungen	47
Abbildung 36: Vergleich Simulation und Messung des Demonstrators: EMK	49
Abbildung 37: Temperaturentwicklung während der Messung der Maximaldrehmomentkennlinie	49
Abbildung 38: Vergleich Simulation und Messung des Demonstrators: Maximaldrehmomentkennlinie	50
Abbildung 39: Gemessene Magnettemperatur im Dauerbetrieb	51
Abbildung 40: Simulierte Temperaturverteilung im Rotor und Stator des Demonstrators.....	51
Abbildung 41: Aufteilung der Aufwendungen im Teilvorhaben	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitplan des Teilvorhabens.....	7
Tabelle 2: Geplante und umgesetzte Arbeitspakete innerhalb des Verbundvorhabens	10
Tabelle 3: Leistungsdaten der ausgewählten Referenz-E-Maschine	16
Tabelle 4: Definition von drei Magnetklassen.....	18
Tabelle 5: Typische Werte für die Materialparameter der betrachteten Materialien	20
Tabelle 6: Kenngrößenvergleich Referenzmaschine / Demonstrator.....	37
Tabelle 7: Verwertungsplan	55

I. Kurzdarstellung des Projekts

I1. Aufgabenstellung

Die Erforschung energieeffizienter elektrischer Maschinen und die Erschließung der damit verbundenen Vorteile ist ein Beitrag zur Etablierung dieser Technologie in der Automobilbranche. Ziel des Verbundvorhabens ist es, neue hocheffiziente Rotortopologien für elektrische Antriebsmaschinen mittels innovativer numerischer Optimierungsverfahren zu entwickeln, simulativ durch eine Toolkette zu bewerten und anhand einer prototypischen Erprobung zu validieren. Des Weiteren sind alternative Herstellungsverfahren für die entstehenden neuen Magnetgeometrien zu untersuchen. Die Ziele des Teilvorhabens „Entwicklung einer Werkstoffdifferenzierungsmethode mit Erprobung“ sind:

- Analyse bestehender Anforderungen an Antriebsmaschinen elektrischer Fahrzeuge und Spezifikation der Leistungsdaten sowie des Maschinenkonzepts der zu optimierenden Maschine
- Entwicklung eines Algorithmus zur Rotortopologieoptimierung für Magnet-, Eisen- und Lufträume unter Berücksichtigung mechanischer und elektromagnetischer Phänomene
- Entwurf geeigneter Testbeispiele zur Bewertung und Verbesserung der Methodik
- Überführung von Teilergebnissen in eine Toolkette zur automatisierten Bewertung und weiteren Verbesserung
- Optimierung einer elektrischen Maschine mit elektromobilen Anforderungen
- Validierung des Optimierungsergebnisses mittels eines Prototyps

Mit Hilfe des im Teilvorhaben entwickelten Algorithmus lassen sich folgende Zielsetzungen der Förderausschreibung „Antriebstechnologien für die Elektromobilität (ATEM)“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erreichen:

- Erhöhung der Reichweite mit elektrischer Traktion
(Erreichung durch verbesserte E-Maschineneffizienz)
- Kompaktere Bauweise
(höhere Leistungsdichte erlaubt kleinere Bauform)
- Senkung von Kosten und Umweltbelastung
(Ressourcenschonung durch geringeren Materialeinsatz)
- Erhöhung der Sicherheit
(verbesserte mechanische Eigenschaften durch Berücksichtigung innerhalb der Optimierung)

I2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit 12 unabhängigen Marken, mit über 100 Produktionseinrichtungen weltweit und einer diversifizierten Produktpalette ist der Volkswagen Konzern einer der größten weltweit aktiven Automobilhersteller. Im Jahr 2019 wurde mit nahezu 11 Millionen verkauften Kraftfahrzeugen sowie fast 670.000 Angestellten ein weltweiter Marktanteil von etwa 8 % erzielt. Für die Bereiche Forschung und Entwicklung (FuE) werden große Aufwendungen getätigt. In den letzten Jahren haben sich dabei die FuE-Aktivitäten auf die Entwicklung von umweltfreundlichen, sicheren und schadstoffarmen Autos und deren Komponenten konzentriert, auch um zukünftig Zero-Emission-Vehicles (ZEV) zu entwickeln. In diesem Rahmen ist die Volkswagen AG seit 1970 in die Forschung, Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen mit elektrischen und hybriden Antriebssystemen involviert.

Am Volkswagen-Standort Kassel beschäftigt sich seit über 10 Jahren eine Entwicklungs- und Planungsgruppe unter anderem mit der Konzeption und Entwicklung von elektrischen Antrieben und Hybridmodulen. Dazu wurden Kompetenzen und Kapazitäten im Bereich der E-Maschinenauslegung und –berechnung, der Konstruktion, der Prozessentwicklung und der Erprobung aufgebaut. Des Weiteren wurden Fertigungslinien geplant und im Werk installiert, um diese Antriebe in Großserienstückzahl herzustellen. Der Herstellungsprozess der E-Antriebe umfasst verschiedene Vorfertigungs- und Vormontageschritte der Einzelkomponenten, bevor in einer Endmontage die Komplettierung erfolgt. Die wesentlichen Hauptprozesse in der E-Maschinenherstellung sind dabei das Stanzen von Stator- und Rotorblechen, die Rotormontage, das Statorwickeln, die Prüfprozesse sowie die Gesamtmontage. So ist es bisher gelungen elektrische Antriebe z. B. für den e-Golf, den e-up! und das neue elektrische Fahrzeug ID.3 zu entwickeln und auch am Standort herzustellen.

Darüber hinaus wurden in der Entwicklung am Standort Kassel in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern erfolgreich Forschungsprojekte mit dem BMWi durchgeführt, wie zum Beispiel das Projekt „PräDEM“ und „VerfaS“. Neben der Durchführung der Forschungsprojekte sind die Mitarbeiter auch in die laufenden Entwicklungen für aktuelle E-Antriebe involviert und leisten Knowhow-Transfer sowohl aus den Entwicklungsprojekten in das Forschungsprojekt als auch aus den Forschungsprojekten in die aktuellen Entwicklungen.

Somit bestehen für dieses Projekt hervorragende Voraussetzungen, um mit den vorhandenen Kompetenzen und Erprobungsmöglichkeiten die geplante Optimierungsmethode zu entwickeln, einen Demonstrator aufzubauen und diesen zu erproben.

I3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Folgende Arbeitspakete sind in diesem Teilvorhaben bearbeitet worden:

- Arbeitspaket AP1: Anforderungen und Spezifikationen
- Arbeitspaket AP2: Topologieoptimierung
- Arbeitspaket AP3: Integrierte Werkzeugkette
- Arbeitspaket AP5: Aufbau des Demonstrators, Konzeptvalidierung

In Tabelle 1 ist die Zeitplanung dieser Arbeitspakete dargestellt. Dort ist im Vergleich zum Zeitplan in der Teilvorhabenbeschreibung berücksichtigt, dass eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts bis Ende des Jahres 2019 erfolgt ist.

Tabelle 1: Zeitplan des Teilvorhabens

	Arbeitspaket Arbeitschritt	2016		2017				2018				2019			
		Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
0	Projektmanagement	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1000	AP1 - Anforderungen und Spezifikationen														
1010	Recherche und Abgleich	■													
1020	Anforderungen Topologieoptimierung	■	■												
1030	Spezifikation Kenndaten		■	■											
M1	Anforderungen und Spezifikationen abgestimmt			■											
2000	AP2 - Topologieoptimierung														
2011	Identifikation und Auswahl Entwurfsvariablen		■	■											
2017	Analyse und Auswahl Zielfunktionen			■	■										
2021	Entwicklung elektromagnetische Optimierung				■	■	■								
2027	Erweiterung um mechanische Optimierung					■	■	■	■						
2030	Implementierung und Testen						■	■	■	■	■	■	■		
M2	Machbarkeit des Konzepts nachgewiesen						■								
3000	AP3 - Integrierte Werkzeugkette														
3010	Implementierung Datenschnittstelle		■	■											
3020	Aufbau elektromagnetische Berechnung			■	■	■	■	■	■						
3030	Aufbau thermische Berechnung				■	■	■	■	■	■					
3040	Aufbau strukturdynamische Berechnung					■	■	■	■	■					
4000	AP4 - Magnetfertigungsverfahren														
5000	AP5 - Aufbau des Demonstrators, Konzeptvalidierung														
5011	Topologieoptimierung für Demonstrator							■	■	■	■	■			
5024	Aufbau Demonstrator								■	■	■	■			
5032	Vermessung Demonstrator											■	■		
5041	Validierung Topologieoptimierung												■	■	■
M3	Konzept validiert														■

14. Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Auslegung von Permanent-Magnet-Synchron-Maschinen (PMSM) für Fahrzeugantriebe basiert häufig auf heuristischem Wissen sowie analytischen und empirischen Formeln zur Festlegung der Grunddaten der Maschine. Die komplexen und stark nichtlinearen Zusammenhänge sind jedoch analytisch schwer zu beschreiben. Daher wird meistens auf bekannte Maschinekonzepte, erprobte Wicklungsausführungen und einfache Geometrien für Magnete, Luft- und Eisenbereiche zurückgegriffen. Variationsmöglichkeiten bestehen zum Beispiel in der:

- Anzahl der Phasen, Pole und Zähne sowie Wicklungsausführung,
- Luftspaltdimensionierung, Rotorschrägung und Zahnform,
- Dimensionierung der Magnete und deren Positionierung bei festgelegter Geometrie,
- Geometrie der Lufttaschen und des Blechschnitts.

Im klassischen Auslegungsprozess wird somit auf Basis derart erstellter Grundkonfigurationen die Anordnung der Magnet-, Eisen und Luftstrukturen innerhalb des Rotors festgelegt. Eine oft getroffene Einschränkung dabei ist die Verwendung von rechteckigen Magneten. Mittels langjähriger Erfahrung werden die Strukturen im Anschluss für den konkreten Anwendungsfall verbessert. Dabei stellt sich die Frage, ob die nachfolgenden Variationen tatsächlich das Optimum bilden. Die Entwürfe werden dann mit Hilfe von Finite Elemente Methoden detailliert analysiert, um vielfältige Kriterien wie:

- Erreichbares maximales und Dauer-Drehmoment über einen definierten Drehzahlbereich,
- Kupfer- und Eisenverluste, Wirkungsgradkennfeld und thermisches Verhalten,
- Betriebsfestigkeit,
- Strukturmechanik und akustisches Verhalten der Maschine,

zu bewerten. Dabei kommt es fast immer zu deutlichen Zielkonflikten zwischen elektromagnetischer und mechanischer Auslegung die nur in aufwändigen Anpassungsschleifen aufgelöst werden können.

Es gibt jedoch auch Ansätze einzelne Schritte der Auslegung mittels Optimierungsverfahren zu verbessern. In dem Artikel von [18] wird die Entwicklung und Optimierung der E-Maschine des Chevrolet Spark erläutert. Die Autoren in [10] gehen auf die Modellierung und Optimierung der E-Maschinen durch Ersatzmodelle ein. In [9] wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung des Blechschnitts hinsichtlich des Drehmomentrippels und der Verluste unter Berücksichtigung zweier Fahrzyklen verwendet. Dabei werden verschiedene geometrische Parameter der Kavitäten/Flussbarrieren im Rotor und Stator mit dem Ziel einer robusten Lösung variiert. Ein genetischer Algorithmus wird ebenfalls in [17] und [16] zur Topologieoptimierung verwendet.

Im Allgemeinen zielt die Topologieoptimierung darauf ab, den bestmöglichen Aufbau einer Struktur hinsichtlich der Materialart und -verteilung innerhalb eines vorgegebenen Gebietes unter der Vorgabe bestimmter Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel Randbedingungen oder aufgeprägte Lasten, zu finden, vgl. [2]. Durch die elektromagnetisch notwendige Verwendung von verschiedensten Materialkombinationen müssen jedoch auch Multi-Material Strategien implementiert und validiert werden. Erste Ansätze dazu sind in [26], [31], [21] und [28] zu finden. Doch auch primär elektromagnetische Gesichtspunkte wirken sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften der Maschine aus. Dementsprechend ist ein Optimierungsalgorithmus zu generieren, der es ermöglicht verschiedene elektromagnetische sowie strukturmechanische Fragestellungen gekoppelt zu betrachten.

Ein Überblick der unterschiedlichen Entwicklungen im Bereich reiner strukturmechanischer Topologieoptimierung ist in [27], [12] und [7] dargestellt. Das Werk von [12] zeigt zudem auch Analogien zwischen Optimierung und Variationsrechnung auf und liefert grundlegende mathematische Zusammenhänge verschiedenster Optimierungsfragestellungen unter anderem bei der Analyse von Mikrostrukturen. Ein weiteres Grundlagenwerk bildet das Buch von [2]. Problemstellungen, die zusätzlich zu Totlasten gebietsabhängige Lasten in Erwägung ziehen, sind in [15] zu finden. Dabei wird neben dem Eigengewicht auch der Einfluss der Zentrifugalkraft untersucht. Dieser Aspekt steht in enger Verbindung zum Design von E-Maschinen, da diese auf Grund der hohen Drehzahlen stark durch Fliehkräfte charakterisiert sind.

Erste multiphysikalische Problemstellungen, die die Kopplung verschiedener physikalischer Felder innerhalb der Topologieoptimierung berücksichtigen, werden in dem Buch von [8] behandelt. Insbesondere wird die Optimierung von elektrothermischen, thermo-mechanischen sowie thermomagnetischen Systemen untersucht.

Der Überblick zeigt, dass es verschiedene Ansätze zur Optimierung von E-Maschinen gibt. Insgesamt dominieren stochastische Verfahren. Weiterhin werden elektromagnetische und strukturmechanische Fragestellungen hinsichtlich elektrischer Antriebe nicht gekoppelt optimiert.

Die Topologieoptimierung spielt in der E-Maschinenentwicklung eher eine untergeordnete Rolle, wobei sie das größte Potential bietet, da frei entschieden werden kann, wo welches Material sinnvoll ist. Ziel dieses Projekts ist es daher, eine gekoppelte elektromagnetomechanische Multi-Material Topologieoptimierungsmethode zu entwickeln, die darüber hinaus zahlreichen Anforderungen an die E-Maschine, die auch häufig konkurrierend sind, berücksichtigt.

I5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Verbundprojekts TOPMAGNET („Topologische Optimierung für einen energieeffizienten elektrischen Fahrzeugantrieb“) wurde mit zwei Partnern in zwei Teilvorhaben zusammengearbeitet. Die Partner und Teilvorhaben sind:

- Fachgebiet Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik (FSG), Universität Kassel.
Das FSG bearbeitete das Teilvorhaben „Integrierte Werkzeugkette“, in dem eine Werkzeugkette zur Bewertung der optimierten Geometrie entwickelt wurde. Dies beinhaltet eine elektromagnetische, thermische und strukturdynamische Berechnung. Die Berechnungsverfahren wurden mit Hilfe von Prüfstandversuchen validiert.
- MS-Schramberg GmbH & Co. KG (MSS)
Die MSS bearbeitete das Teilvorhaben „Magnetfertigungsverfahren“. In diesem Rahmen wurden geeignete Fertigungsprozesse zur Realisierung von unregelmäßigen Magnetformen entwickelt und bewertet. Darüber hinaus wurden die Magnete für den Demonstrator gefertigt, vermessen und zur Verfügung gestellt.

In Tabelle 2 sind die einzelnen Arbeitspakete mit der Zuordnung auf die beteiligten Projektpartner dargestellt.

Tabelle 2: Geplante und umgesetzte Arbeitspakete innerhalb des Verbundvorhabens

Arbeitspakete und Arbeitsteilung		VW	MSS	FSG
AP0 Projektmanagement	Koordination Berichterstellung Kommunikation mit PT			
AP1 Anforderungen/ Spezifikationen	Bauraum u. Leistungsdaten Maschinenkonzept Anforderungen Werkzeugkette Kenndaten Magnete			
AP2: Toplogooptimierung	Entwurfsvariablen Zielfunktion u. Nebenbeding. Optimierungsalgorithmus Implementierung u. Berechnung			
AP3: Integrierte Werkzeugkette	Integrationskonzept Datenschnittstellen und Datenbasen Elektromag, therm u. strukturd. Berechnungen			
AP4: Magnetfertigungs- verfahren	Legierungen Fertigungsverfahren Umsetzung Prozesskette Magnetherstellung			
AP5: Aufbau des Demonstrators/ Konzeptvalidierung	Prototypische Umsetzung Vermessung u. Validierung Optimierung			
		Leitung und Arbeitsschwerpunkt		
		Arbeitsschwerpunkt		
		Mitarbeit		

Während der gesamten Projektlaufzeit fand neben den gemeinsamen Meilensteintreffen ein intensiver, regelmäßiger und erfolgreicher Austausch zur Abstimmung der Arbeitsinhalte statt. Dies erfolgte durch Treffen vor Ort, durch Online-Sitzungen und per E-Mail.

Darüberhinaus gab es keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

II. Eingehende Projektdarstellung

In diesem Abschnitt werden die Projektergebnisse des Teilvorhabens seitens der Volkswagen AG dokumentiert.

II1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Eine Übersicht der vorgegebenen Ziele und erzielten Ergebnisse sowie der erreichten Meilensteine und der Verwendung der Zuwendung ist im nächsten Abschnitt zusammengestellt. Anschließend erfolgt eine ausführliche Beschreibung der Inhalte des Teilvorhabens, der Ergebnisse und der gesammelten Erfahrungen.

II1.1. Übersicht der Ziele, der Ergebnisse und der Verwendung

Arbeitspaket AP1: Anforderungen und Spezifikationen

- **Vorgegebene Ziele:**

Das allgemeine Ziel des Arbeitspakets ist die Definition der Anforderungen an die zu erzielenden Ergebnisse sowie die Rahmenbedingungen für die geplanten Arbeiten festzulegen. In diesem Teilvorhaben erfolgt die spezifische Festlegung der Ziele der Topologieoptimierung und die dabei zu beachtenden Nebenbedingungen. Der verfügbare Bauraum wird identifiziert und die Leistungsdaten der Maschine werden festgelegt. Daraus erfolgt schließlich die Auswahl eines Maschinenkonzepts.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Die Anforderungen für die Optimierung der E-Maschine wurden festgelegt (u. a. Drehmoment, Leistung, Drehzahl, Spannung, elektromotorische Kraft, Drehmomentwelligkeit, Magnetmasse und mechanische Festigkeit) und die einzuhaltenden Nebenbedingungen wurden formuliert. Als Referenzmaschine wurde die E-Maschine des e-Golfes ausgewählt. Darüber hinaus wurden folgende Ziele für die Optimierung definiert:

- Reduktion und optimale Verteilung der Magnetmasse
- Reduktion und optimale Verteilung der Eisenmasse
- Optimierung des Wirkungsgrads der E-Maschine

- **Meilenstein:**

Die Arbeitspunkte aus dem Meilenstein M1 „Anforderungen und Spezifikationen ausgearbeitet und abgestimmt“:

- Leistungsdaten der topologieoptimierten Maschine festgelegt
- Maschinenkonzept festgelegt

wurden erfüllt.

- **Verwendung der Zuwendung:**

Die Zuwendungen wurden für Personalkosten, Abschreibungen und Lizenzgebühren der Software für die multiphysikalischen Simulationen und Optimierungen sowie für Reisekosten verwendet.

Arbeitspaket AP2: Topologieoptimierung

- **Vorgegebene Ziele:**

Das allgemeine Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Topologieoptimierung für Magnet-, Eisen- und Lufträume in einem vorgegebenen Suchraum. Dabei soll die mechanische Festigkeit integriert werden.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der Optimierungsalgorithmus zur Topologieoptimierung für Magnet- Eisen und Lufträume in einem vorgegebenen Lösungsraum (Rotorbereich) entwickelt und implementiert. Dabei sind die Zielfunktion und die Nebenbedingungen mathematisch in Zusammenhang mit den Entwurfsvariablen formuliert und die Entwurfsvariablen mit den Werkstoffeigenschaften verknüpft worden.

Der Lösungsraum wurde vernetzt und die elektromagnetischen sowie mechanischen Gleichungen gelöst. Des Weiteren wurde eine gekoppelte elektromagnetische und mechanische Optimierung entwickelt. Zudem wurden Algorithmen zur Berücksichtigung der Drehmomentwelligkeit, der Entmagnetisierung der Magnete sowie der Verluste erarbeitet und in das Optimierungsverfahren eingebunden.

Das entwickelte Optimierungsverfahren wurde auf die Anforderungen der Referenzmaschine angewendet. Daraus entstand eine neue Topologie der Rotorblechgeometrie und der Magnetgeometrie. In einer elektromagnetischen und mechanischen Prevalidation wurde diese Geometrie grundsätzlich bestätigt, zeigte jedoch noch Abweichungen in einzelnen Anforderungspunkten, die im Arbeitspaket AP5 durch weitere Anpassungen reduziert werden konnten.

- **Meilenstein:**

Die Arbeitspunkte aus dem Meilenstein M2 „Machbarkeit des Konzepts nachgewiesen“:

- Entwurfsvariablen definiert und Zielfunktion ausgearbeitet
- Verknüpfung elektromagnetischer und mechanischer Optimierungen realisiert
- Optimierungsalgorithmus lauffähig

wurden erfüllt.

- **Verwendung der Zuwendung**

Die Zuwendungen wurden für Personalkosten, Abschreibungen und Lizenzgebühren der Software für die multiphysikalischen Simulationen und Optimierungen sowie für Reisekosten verwendet.

Arbeitspaket AP3: Integrierte Werkzeugkette

- **Vorgegebene Ziele:**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wird eine integrierte Werkzeugkette aufgebaut, mit der eine Analyse und Bewertung des elektromagnetischen, thermischen und strukturdynamischen Verhaltens der topologieoptimierten Maschine erfolgen soll. Die Werkzeugkette besteht aus FE-Berechnungswerkzeugen, einem Tool zur Sicherstellung einer konsistenten Datentransformation zwischen den verschiedenen Datenbasen und einer Messmethodik zur gezielten Validierung der Berechnungsergebnisse und Anpassung der Berechnungsparameter.

Dieses Arbeitspaket umfasst die Arbeiten an der integrierten Werkzeugkette seitens der Universität Kassel in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Eine Werkzeugkette wurde entwickelt, die das elektromagnetische, strukturdynamische und thermische Betriebsverhalten von Permanent-Magnet-Synchron-Maschinen berechnen kann. Die Berechnung erfolgt nach der Eingabe aller Eingangsinformationen vollständig automatisch.

In enger Abstimmung zwischen dem FSG der Universität Kassel und der Volkswagen AG wurde das Berechnungskonzept entwickelt, die Schnittstellen zwischen den Berechnungswerkzeugen definiert und der Aufbau der drei Teilbereiche (elektromagnetische, strukturdynamische und thermische Berechnung) erarbeitet. Seitens der Volkswagen AG wurden für diese Teilbereiche die Randbedingungen ermittelt, die Materialdaten bereitgestellt und wichtige Modellparameter für die Sensitivitätsanalysen definiert. Darüber hinaus wurde der Nachweis der mechanischen Festigkeit in die Werkzeugkette integriert, sowie eine automatisierte Berichtserstellung erarbeitet.

- **Verwendung der Zuwendung**

Die Zuwendungen wurden für Personalkosten, Abschreibungen und Lizenzgebühren der Software für die multiphysikalischen Simulationen und Optimierungen verwendet.

Arbeitspaket AP5: Aufbau des Demonstrators, Konzeptvalidierung

- **Vorgegebene Ziele:**

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist der Nachweis des Nutzens und des Potentials des hier vorgeschlagenen Optimierungskonzepts anhand eines Demonstrators. Ein topologieoptimiertes Maschinenkonzept wird prototypisch aufgebaut und auf dem Prüfstand vermessen. Die elektromagnetischen, thermischen und strukturdynamischen Eigenschaften des Antriebs werden über den vorher definierten Drehzahl- und Drehmomentbereich aufgenommen und analysiert. Der Vergleich mit den erwarteten Werten aus den Finite-Elemente-Berechnungen gibt Aufschluss über die tatsächliche Güte des Optimierungsergebnisses und deckt eventuelle Schwachstellen und Ungenauigkeiten bei den durchgeführten FE-Berechnungen auf.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Auf Grundlage des in Arbeitspaket AP2 entwickelten Optimierungsverfahrens wurde das finale Design für die Rotorblechgeometrie und die Magnetgeometrie der optimierten E-Maschine ermittelt und konstruktiv umgesetzt. Es wurde durch elektromagnetische Berechnungen, durch eine mechanische Festigkeitsanalyse, durch thermische Berechnungen und strukturdynamische Analysen bestätigt, dass die Anforderungen und Ziele erfüllt werden.

Die erforderlichen Konstruktionsdaten für den Aufbau des Demonstrators wurden erstellt, die von der Referenzmaschine abweichenden Bauteile wurden gefertigt und es wurden insgesamt vier Rotoren mit neuem Design gefertigt und in E-Maschinen verbaut. Eine dieser E-Maschinen wurde zusätzlich mit Temperatursensoren für die thermischen Analysen versehen.

An den Prüfständen wurden diese E-Maschinen mit neuem Rotordesign und Referenzrotor vermessen, um die Daten der elektromagnetischen, thermischen und strukturdynamischen Größen zu ermitteln. In der Validierung konnten das Optimierungsergebnis, und somit das Optimierungsverfahren und die Berechnungsmethoden bestätigt werden.

- **Meilenstein:**

Die Arbeitspunkte aus dem Meilenstein M3 „Konzept validiert“:

- Topologieoptimierte Maschine aufgebaut
- Messungen durchgeführt
- Berechnungen und Messungen verglichen

wurden erfüllt.

- **Verwendung der Zuwendung**

Die Zuwendungen wurden für Personalkosten, Abschreibungen und Lizenzgebühren der Software für die multiphysikalischen Simulationen und Optimierungen und für Materialkosten für den Demonstrator verwendet.

II1.2. Erzielte Ergebnisse in eingehender Darstellung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die im Teilvorhaben bearbeiteten Inhalte und die erzielten Ergebnisse eingehend erläutert. Dies beginnt mit der Definition der Anforderungen an die E-Maschine, der Auswahl einer geeigneten Referenzmaschine und der Festlegung der Ziele und Nebenbedingungen für die Optimierung. Anschließend werden die entwickelten Verfahren innerhalb der topologischen Optimierung eingebettet und auf drei Methodenbeispiele angewendet. Darauf aufbauend wird das entwickelte Optimierungsverfahren auf die E-Maschine übertragen, um einen optimierten Rotorblechschnitt für den Demonstrator zu generieren. Abschließend werden der Aufbau des Demonstrators, die ermittelten Versuchsergebnisse und der Vergleich zu den Simulationsergebnissen erläutert.

II1.2.1. Anforderungen und Zielstellung

Für die Entwicklung des Demonstrators und für die Anwendung des im Projekt entwickelten Optimierungsalgorithmus ist es wichtig eine Referenzmaschine zu definieren. Diese dient als Ausgangspunkt für die Optimierung und ermöglicht so die Definition der zugehörigen Ziele und Anforderungen sowie die Überprüfbarkeit ihrer Einhaltung. Im ersten Schritt wurde dazu eine Analyse der vorhandenen E-Maschinen bei der Volkswagen AG und bei verschiedenen Wettbewerbern bezüglich der Leistungsparameter, der technischen Relevanz, der Verfügbarkeit und der Kosten durchgeführt. Dies hat gezeigt, dass es sinnvoll ist die Anforderungen an eine aktuelle E-Maschine, einer Anwendung in einem reinen E-Fahrzeug, zu orientieren.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde daher festgelegt, dass für dieses Projekt eine bestehende und bekannte E-Maschine als Referenz ausgewählt werden soll. Als Referenzmaschine wurde die aktuelle E-Maschine der Produktaufwertung des e-Golfes (e-Golf PA) ausgewählt, siehe Abbildung 1.

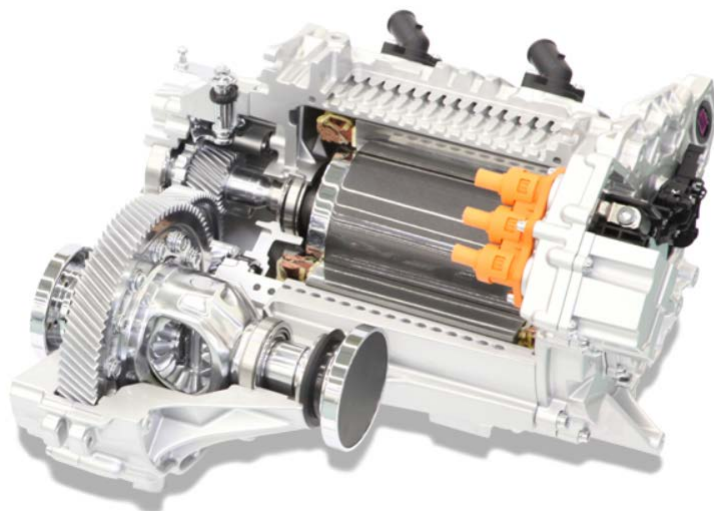


Abbildung 1: Halbschnitt eines e-Golf-Antriebs (Quelle: <http://emobility.volkswagen.ch>)

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Leistungsdaten genannt. Es handelt sich hierbei um eine permanenterregte Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten.

Tabelle 3: Leistungsdaten der ausgewählten Referenz-E-Maschine

Max. Drehmoment	290 Nm
Max. Leistung	100 kW
Max. Drehzahl	12000 1/min

Da diese E-Maschine bei der Volkswagen AG in der Entwicklung im Werk Kassel entwickelt wurde, sind alle erforderlichen Maschinendaten bekannt. Dies ermöglicht die einzelnen Anforderungen an die Demonstrator E-Maschine und somit auch an den Optimierungsalgorithmus zu spezifizieren.

Anforderungen an Drehmoment und Spannung

Aus den Daten des Antriebs ergeben sich direkt die Anforderungen an das Drehmoment, die Drehzahl sowie die Leistung der E-Maschine. Das heißt, es kann eine Maximaldrehmomentkennlinie definiert werden, welche die E-Maschine erfüllen muss, siehe Abbildung 2. Beim Betrieb der E-Maschine wird zwischen zwei Bereichen unterschieden: Im Grundstellbereich erfolgt die Regelung der Maschine nach dem Prinzip des maximalen Drehmoments pro Stromeinheit. Das heißt, es wird das geforderte Moment bei minimalem Strom gesucht. Im Feldschwächbereich nimmt die Klemmenspannung mit steigender Drehzahl zu, so dass die Umrichterspannung überstiegen werden könnte. Daher muss das in der Maschine erzeugte Magnetfeld durch einen in die Maschine eingprägten d-Strom abgeschwächt werden. Der Eckpunkt bzw. der Übergang vom Grundstellbereich in den Feldschwächbereich hängt von der begrenzenden maximalen Spannung und dem Strom ab.

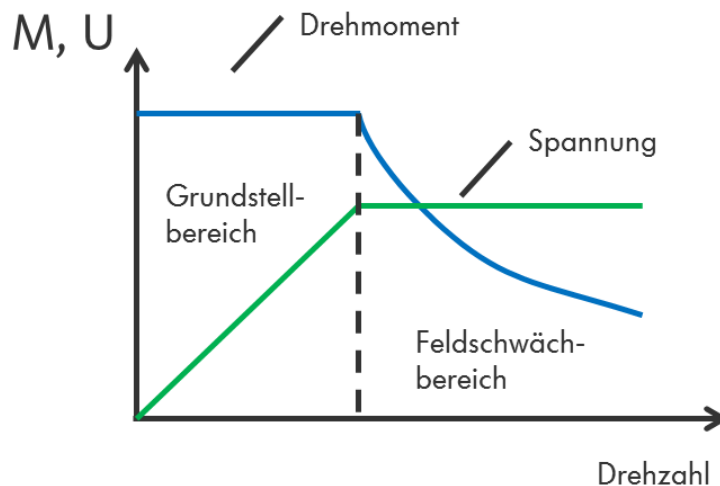


Abbildung 2: Verlauf von Drehmoment und Spannung über der Drehzahl

Bei Überschreiten der Eckdrehzahl nimmt die Leistung zu, obwohl die Maschine an der Spannungs- und Stromgrenze betrieben wird. Der Grund dafür ist, dass die Drehzahl stärker steigt als das Drehmoment abfällt, siehe Abbildung 3.

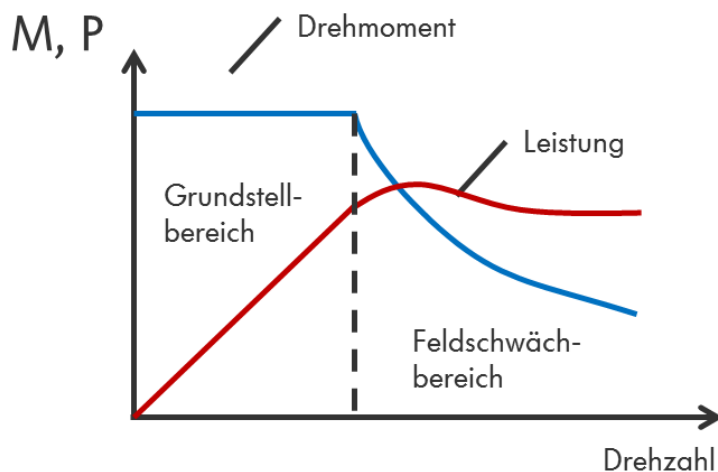


Abbildung 3: Verlauf von Drehmoment und Leistung über der Drehzahl

Anforderungen an die EMK

Weiterhin ist es wichtig, dass bei einem Störfall der Leistungselektronik die Komponenten der E-Maschine nicht zerstört werden. Daher darf die induzierte Spannung der E-Maschine im unbestromten Fall, auch als elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet, einen Maximalwert nicht überschreiten.

Anforderungen an die Drehmomentwelligkeit

Eine weitere wichtige Größe in der Auslegung von E-Maschinen ist die Drehmomentwelligkeit. Aufgrund der Topologie des Stators, welcher Zähne und Nuten aufweist, entsteht ein so genanntes Nutrastmoment. Aufgrund der Rotation ändert sich beim Übergang von Statorzahn zu Statornut der magnetische Widerstand im Luftspalt, weswegen sich das Drehmoment in Abhängigkeit des Rotorwinkels verändert. Weitere Gründe für auftretende Oberwellen in der E-Maschine können aus der Stromspeisung, den Wicklungen, sowie der Inhomogenität des Magnetflusses resultieren. Ziel in der Auslegung ist es diese Welligkeit, wie in Abbildung 4 prinzipiell dargestellt, zu minimieren.

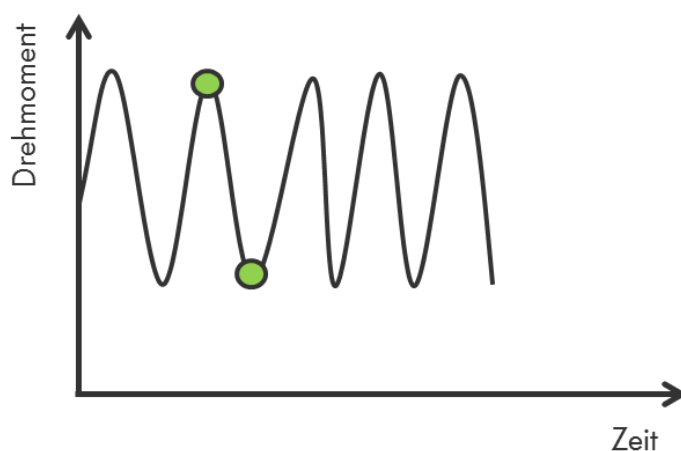


Abbildung 4: Prinzipielle Darstellung der Drehmomentwelligkeit

Anforderungen an die Magnetmasse und das Magnetmaterial

Ein wichtiges Auslegungskriterium wird durch die Kosten der Magnete bestimmt. Aufgrund der hohen Rohstoffpreise für Neodym und insbesondere für schwere seltene Erden gilt es in der Auslegung bzw. Optimierung der E-Maschine das Magnetmaterial auf ein Minimum zu reduzieren. Dabei muss aber beachtet werden, dass die Magnete im Betrieb nicht entmagnetisieren, vgl. Abbildung 5. Für die Entmagnetisierung der Magnete ist der worst-case Fall der aktive Kurzschluss (AKS) von Bedeutung. Im Fehlerfall wird durch den aktiven Kurzschluss verhindert, dass Komponenten in der Leistungselektronik beschädigt werden. Dazu werden die drei Phasen kurzgeschlossen und die Klemmspannungen zu null gesetzt. Infolge dessen bilden sich ein Kurzschlussstrom und ein Kurzschluss-Bremsmoment aus. Insbesondere das transiente Verhalten des Stroms ist für die Magnete von Bedeutung. Es können kurzzeitig sehr große Ströme auftreten, wodurch entmagnetisierende Felder erzeugt werden.



Abbildung 5: Bewertung der Entmagnetisierung

Gleichzeitig hängen die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke des Magnetmaterials von der Temperatur ab, die durch die Leistungsdichte und die auftretenden Verluste beeinflusst wird. Hohe Temperaturen haben einen negativen Effekt auf die Entmagnetisierungsfestigkeit der Neodym-Magnete.

Die Eigenschaften der Magnete hängen im Wesentlichen von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Herstellung ab. Um die Vielfalt bei der Wahl von Magnetmaterialien einzugrenzen, wurde festgelegt, in diesem Projekt hauptsächlich drei Klassen von Magneten zu betrachten. In Tabelle 4 sind typische Werte für die wichtigsten magnetischen Parameter zusammengestellt.

Tabelle 4: Definition von drei Magnetklassen

	Remanenz Br (20°C) / mT	Koerzitivfeldstärke Hcj (20°C) / kA/m	Tmax °C	Koerzitivfeldstärke Hcj (Tmax) / kA/m
Topmagnet 1	1300	1100	120	490
Topmagnet 2	1335	1600	140	630
Topmagnet 3	1370	2100	160	770

Anforderungen an die mechanische Festigkeit und das übertragbare Drehmoment

Eine weitere Anforderung an die E-Maschine bzw. den Blechschnitt bildet die mechanische Festigkeit. Aufgrund der Drehzahl treten im Rotor Zentrifugalkräfte auf, die der Blechschnitt ertragen muss. Insbesondere die Stegbereiche an den Magneten und die Kavitäten in der Nähe des Luftspalts sind häufig hoch belastet. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Übertragbarkeit des aus elektrischen Kräften resultierenden Drehmoments auf die Rotorwelle. Zwischen Rotorwelle und den Blechpaketen liegt eine Übermaßpassung vor. Diese wird so ausgelegt, dass bei Betriebsdrehzahl und minimaler Überdeckung noch mit ausreichender Sicherheit ein Moment übertragen werden kann. Eine weitere Anforderung ist ein möglichst geringes Gewicht der elektrischen Maschinen, wodurch auch das Trägheitsmoment des Antriebs verringert wird.

Zielstellung

Mit den definierten Anforderungen gilt es einen Optimierungsalgorithmus zu entwickeln, um die Referenzmaschine zu verbessern. Ein Ziel soll dabei auf der verbesserten Nutzung des kostenintensiven Magnetmaterials gelegt werden. Darüber hinaus führt der Einsatz nicht rechteckiger und unregelmäßiger Magnetgeometrien zu einem innovativen Ansatz elektrische Antriebstechnologien in ihrer Effizienz weiter zu verbessern. Auf Grund der vielfältigen Anforderungen lässt sich jedoch sagen, dass bei der Optimierung einer elektrischen Maschine nicht nur mehrere Zielgrößen gleichzeitig optimiert, sondern auch verschiedenste Nebenbedingungen erfüllt werden müssen. So gilt es, ein definiertes Drehmoment sowie eine vorgegebene Leistung zu erreichen und dabei möglichst wenig Magnetmasse zu verwenden, um Kosten einzusparen.

Als Ziele für die Optimierung der Referenzmaschine ergeben sich somit:

- Reduktion und optimale Verteilung der Magnetmasse
- Reduktion und optimale Verteilung der Eisenmasse
- Optimierung des Wirkungsgrads der E-Maschine

Dabei müssen folgende Nebenbedingungen der elektrischen Maschine beachtet werden:

- Solldrehmoment im Grundstellbereich
- Solldrehmoment bei maximaler Drehzahl
- Einzuhaltender Grenzwert für die Drehmomentwelligkeit
- Einhaltung der maximalen Spannung im Grundstellbereich und bei maximaler Drehzahl
- Einhaltung der zulässigen Entmagnetisierung im aktiven Kurzschluss (AKS) bei maximaler Temperatur
- Einhaltung der Leerlaufspannung (EMK) bei maximaler Drehzahl
- Sicherstellung der Rotorfestigkeit
- Sicherstellung des übertragbaren Drehmoments zwischen Rotorwelle und Blechpaketen bei gegebenen Fertigungstoleranzen

II1.2.2. Methodenbausteine

Die im vorhergehenden Abschnitt II1.2.1 dargestellten Anforderungen und Ziele zeigen, dass das Optimierungsproblem sich in zwei physikalische Gebiete aufgliedert. Zum einen gilt es die Maxwell'schen Gleichungen für die Elektromagnetik zu lösen, zum anderen muss die Gleichgewichtsbedingung für die Strukturmechanik erfüllt werden. Aus beiden Teilgebieten gilt es eine Zielfunktion zu formulieren. Des Weiteren ist der wesentliche Einfluss auf die Anforderungen und Ziele in der konkreten Materialverteilung von Eisen, Magnet und Luft im Rotorblech begründet. Um die Materialverteilung mathematisch variieren zu können, werden sogenannte Entwurfsvariablen definiert. Diese beeinflussen einerseits die Zielfunktion, andererseits müssen sie mit den signifikanten Werkstoffeigenschaften von Magnet, Eisen und Luft gekoppelt werden.

Für die elektromagnetische und strukturmechanische Problemstellung werden diese Werkstoffe durch folgende vier Materialparameter beschrieben:

- die remanente Flussdichte B_R
- die relative magnetische Permeabilität μ_r
- das Elastizitätsmodul E
- die Dichte ρ .

In Tabelle 5 sind typische Werte für diese Materialparameter der drei betrachteten Materialien genannt.

Tabelle 5: Typische Werte für die Materialparameter der betrachteten Materialien

	Remanente Flussdichte	Relative magnetische Permeabilität	Elastizitäts-Modul	Dichte
Größe	B_R	μ_r	E	ρ
Einheit	T	-	MPa	g/cm ³
Luft	0	≈ 1	0	1.20e-3
Eisen	≈ 0	$\mu_r(\mathbf{B})$	170000	7.85
Magnet	$B_{R, Magnet}$	≈ 1	155000	7.60

Ein Werkstoffwechsel von zum Beispiel Magnet auf Eisen oder Eisen auf Luft im Optimierungsalgorithmus wird daher mathematisch modelliert, in dem Funktionszusammenhänge zwischen den Materialparametern und den Entwurfsvariablen definiert werden. Diese Zusammenhänge können auch als Umschaltfunktionen bezeichnet werden. Dabei sind die Entwurfsvariablen so zu wählen, dass mit diesen Entwurfsvariablen sämtliche physikalisch sinnvollen Bereiche der Materialparameter abgebildet werden können.

Als Entwurfsvariablen X_i werden folgende dimensionslose Größen identifiziert:

- für Magnet: X_M
- für Eisen: X_E

Zusätzlich wird definiert, dass diese Entwurfsvariablen während der Optimierung jeweils nur in einem Bereich zwischen 0 und 1 variiert werden können.

Die Umschaltfunktionen für die vier Materialparameter sind grundsätzlich wie folgt aufgebaut:

$$B_r = f_1(X_M, X_E, B_{r,Ref})$$

$$\mu_r = f_2(X_M, X_E, \mu_{r,Ref})$$

$$E = f_3(X_M, X_E, E_{Ref})$$

$$\varrho = f_4(X_M, X_E, \varrho_{Ref})$$

Darin sind f_i jeweils Funktionen, die von den gewählten Entwurfsvariablen sowie einem Referenzwert des jeweiligen Materialparameters abhängen und physikalisch sinnvolle Materialparameter darstellen.

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind exemplarisch für die genannten vier Materialparameter diese Umschaltfunktionen dargestellt.

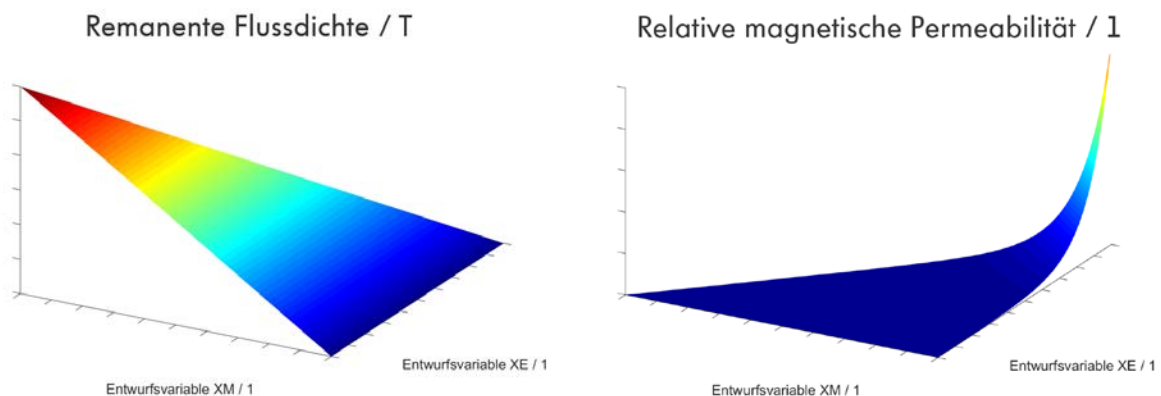


Abbildung 6: Beispiele für die Umschaltfunktionen der remanenten Flussdichte und der relativen magnetischen Permeabilität in Abhängigkeit der Entwurfsvariablen.

Die Umschaltfunktionen sind in diesem Beispiel derart aufgebaut, dass für einen Wert der Entwurfsvariable X_M von 1 gleich die physikalische Eigenschaft des Magnetwerkstoffes und für einen Wert der Entwurfsvariable X_E von 1 gleich die physikalische Eigenschaft des Eisenwerkstoffes wirksam ist. Wenn diese beiden Entwurfsvariablen gleich 0 sind, dann gelten die Werkstoffeigenschaften von Luft.

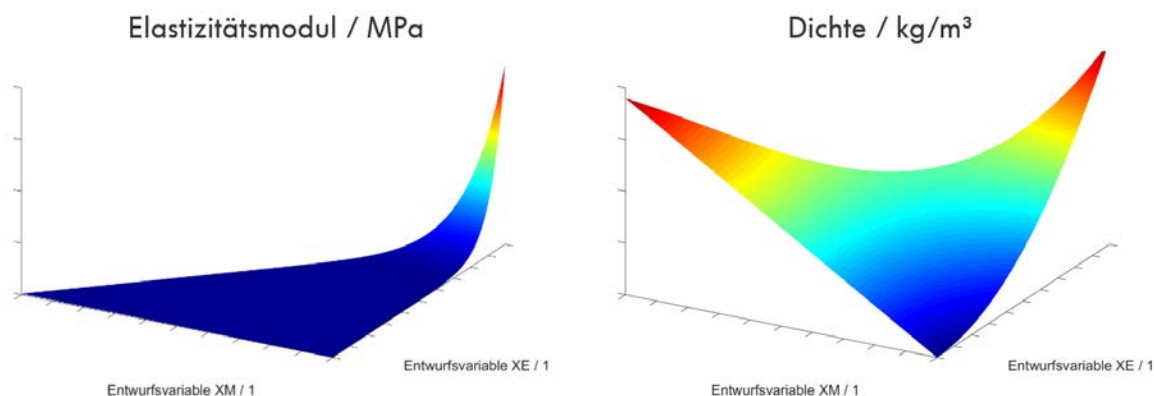


Abbildung 7: Beispiele für die Umschaltfunktionen des Elastizitätsmoduls und der Dichte in Abhängigkeit der Entwurfsvariablen.

Zielfunktion und Nebenbedingungen

In diesem Abschnitt wird eine geeignete Zielfunktion zur Optimierung elektromagnetomechanischer Vorgänge mit dem Fokus auf E-Maschinen unter Einbeziehung der funktionalen Zusammenhänge mit den Entwurfsvariablen entwickelt.

Im Sinne der mathematischen Optimierung ist genau eine Zielfunktion zu definieren, die durch den Optimierungsalgorithmus minimiert werden soll. Diese Zielfunktion kann sich aus verschiedenen gewichteten Komponenten zusammensetzen, wobei darauf zu achten ist, dass die einzelnen Komponenten einen etwa gleichen Beitrag an der Zielfunktion leisten. Dies kann durch eine geeignete Normierung erreicht werden.

Hier wird der Ansatz verfolgt, dass bei der Optimierung eines elektromagnetischen Beispiels die elektromagnetische Kraft F maximiert werden soll. Um dies im Rahmen der Optimierung einer E-Maschine zu verwenden, wird die elektromagnetische Kraft mit negativem Vorzeichen versehen, so dass sich folgende Minimierungsaufgabe ergibt:

$$\text{Zielfunktion} = Z_E(-F) \rightarrow \min$$

Die Zielfunktion der Strukturmechanik wird, so wie es allgemein üblich ist, derart definiert, dass die Dehnungsenergie D im Material des Elektrobleches minimiert werden soll:

$$\text{Zielfunktion} = Z_M(D) \rightarrow \min$$

Die Kopplung der elektromagnetischen Optimierung mit der strukturmechanischen Optimierung bedeutet zum einen, dass in jeder Optimierungsschleife elektromagnetische und strukturmechanische Berechnungen durchgeführt werden, und zum anderen, dass die zuvor definierten Zielfunktionen zusammengeführt werden müssen. Dies resultiert in einer additiven Zerlegung der Zielfunktion mit einem Gewichtungswert g , so dass sich folgender Ausdruck ergibt:

$$\text{Zielfunktion} = Z_E + Z_M = Z(-F + g D) \rightarrow \min$$

II1.2.3. Methodenevaluation

In diesem Abschnitt wird die topologische Optimierung auf ein vereinfachtes Beispiel angewendet. Dadurch kann die grundsätzliche Funktionsweise getestet und die Methode weiterentwickelt werden. Zu diesem Zweck werden drei Methodenbeispiele untersucht. Das erste Beispiel zeigt die reine elektromagnetische Topologieoptimierung, das zweite Beispiel dokumentiert die reine strukturmechanische Topologieoptimierung und das dritte Methodenbeispiel zeigt die gekoppelte elektromagnetomechanische Optimierung, siehe Abbildung 8.

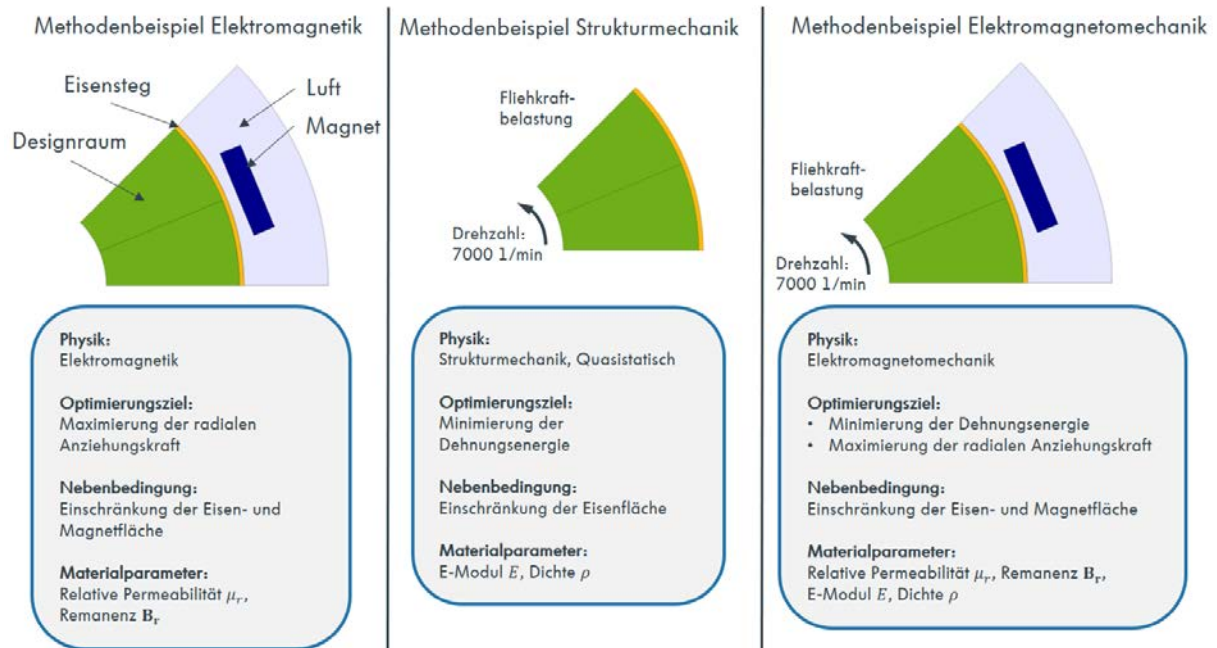


Abbildung 8: Übersicht Methodenbeispiele

Als Methodenbeispiel wird eine rotierende Scheibe herangezogen, welche als Rotorersatzmodell fungiert. Am Außenradius ist ein Eisensteg definiert. Der vereinfachte Rotor ist mit einer konstanten Drehzahl mechanisch belastet. Dem Gegenüber wird ein starrer Kreisabschnitt mit einem Magneten mit negativer Magnetisierungsrichtung gestellt, welcher einen vereinfachten Stator verkörpert.

Elektromagnetisches Methodenbeispiel

In dem elektromagnetischen Methodenbeispiel wird das magnetostatische Vorwärtsproblem

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla \times \mathbf{A} - \frac{1}{\mu_r \mu_0} \mathbf{B}_r \right) = \mathbf{J}_e$$

gelöst. Darin wird die magnetische Flussdichte \mathbf{B} über ein magnetisches Vektorpotential \mathbf{A}

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

formuliert. Die magnetische Feldkonstante ist durch μ_0 gegeben. \mathbf{J}_e ist die elektrische Stromdichte.

Nach der Lösung des Vorwärtsproblems wird ausgehend von den gewählten Startwerten die Optimierung auf das Problem angewandt. Hierbei wird die Magnet-, Eisen- und Lufttopologie im Designraum solange unter der Berücksichtigung der Zielfunktion verändert

$$\text{Zielfunktion} = Z_E(-F) \rightarrow \min$$

bis der Optimierungsschritt konvergiert.

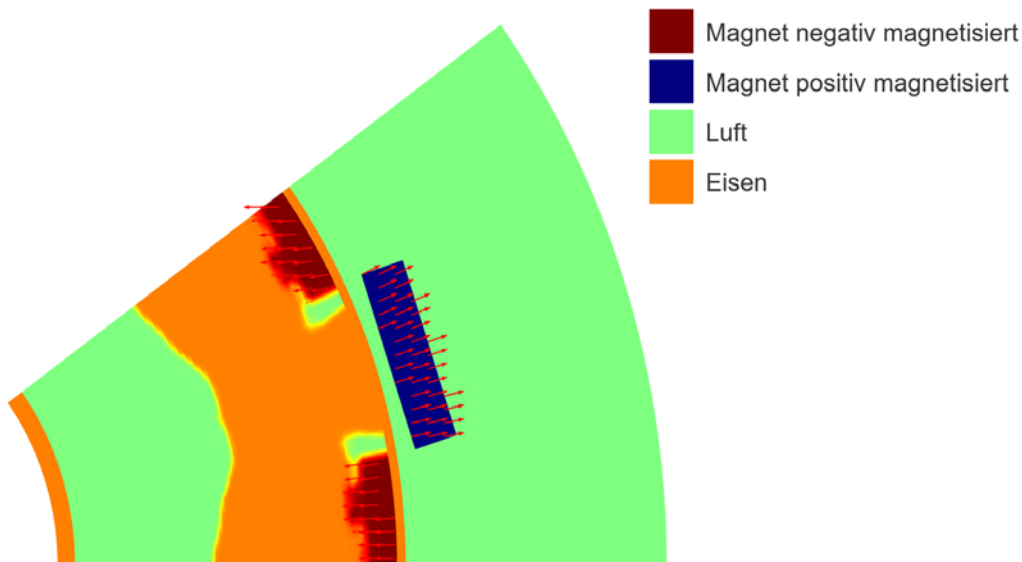


Abbildung 9: Ergebnis einer elektromagnetischen Optimierung

In Abbildung 9 ist das Ergebnis einer durchgeführten rein elektromagnetischen Optimierung dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass sich gegenüber dem positiv magnetisierten Magneten zwei negativ magnetisierte Magnete an den Seiten anordnen. Dies bewirkt eine große Anziehungskraft, welche in der Optimierung auch gefordert wurde. Um den Magnet herum wird ein Eisenanker ausgebildet. Dieser führt zu einem guten magnetischen Fluss.

Strukturmechanisches Methodenbeispiel

Das dargestellte optimierte Design aus Abbildung 9 wäre aus Festigkeitssicht nicht praktisch umsetzbar, da keinerlei drehzahlfeste Anbindung des inneren Eisens zum äußeren Eisensteg vorhanden ist. Somit kann die Methode der rein elektromagnetischen Optimierung in dieser Form nicht auf die E-Maschine übertragen werden.

Um dies zu ermöglichen, muss die Methode um weitere Entwurfsvariablen ergänzt und die Zielfunktion um einen Anteil der Mechanik erweitert werden. Mittels der definierten strukturmechanischen Materialparameter, der Dichte und dem Elastizitätsmodul, wird die Optimierung im Ablauf analog zur rein elektromagnetischen Optimierung entwickelt, wie in der Abbildung 8 dargestellt.

Dabei wird zunächst ein einfaches Vorwärtsproblem über

$$\operatorname{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{k} = \mathbf{0}$$

gelöst. Dabei ist \mathbf{T} der mechanische Spannungstensor und der Term $\rho \mathbf{k}$ stellt die Volumenkraft dar. Im Anschluss wird ausgehend von dem berechneten Vorwärtsproblem die Optimierung mit der Zielfunktion

$$\text{Zielfunktion} = Z_M(D) \rightarrow \min$$

durchgeführt.

In Abbildung 10 ist ein Ergebnis einer rein strukturmechanischen Optimierung dargestellt. An dieser Stelle wird lediglich zwischen zwei Materialzuständen - Eisen oder Luft - unterschieden, da der Magnet nicht tragend ist und somit aus Festigkeitssicht in der Optimierung keine Anwendung findet.

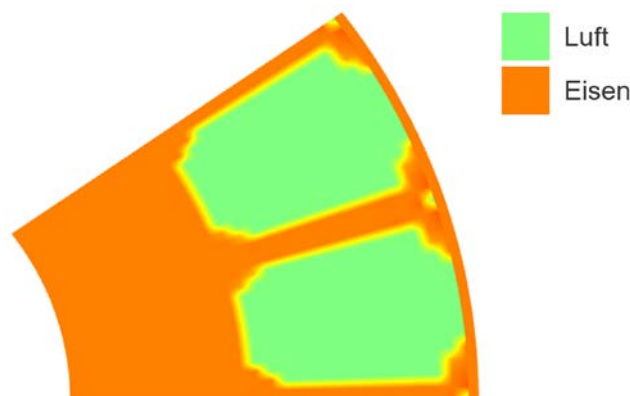


Abbildung 10: Ergebnis der strukturmechanischen Optimierung

In Abbildung 10 ist deutlich zu erkennen, dass das optimierte Design der rein strukturmechanischen Optimierung die Drehzahlfestigkeit und praktische Anwendbarkeit erfüllt. Hierbei entsteht eine mit dem Außenring zusammenhängende Struktur. Weiterhin entstehen zwei große Luftkavitäten in der Optimierung, die insbesondere für die Entwicklung eines leichten Rotors wichtig sind.

Elektromagnetomechanisches Methodenbeispiel

Die festgelegten Designvariablen der rein elektromagnetischen und strukturmechanischen Optimierung werden in diesem Methodenbeispiel miteinander verknüpft. Daraufhin werden zunächst die bekannten Vorwärtsprobleme

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla \times \mathbf{A} - \frac{1}{\mu_r \mu_0} \mathbf{B}_r \right) = \mathbf{J}_e$$

$$\operatorname{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{k} = \mathbf{0}$$

gelöst.

Anschließend wird eine gekoppelte Optimierung durchgeführt, welche die Zielfunktion

$$\text{Zielfunktion} = Z_E + Z_M = Z(-F + g D) \rightarrow \min$$

minimiert. Die Lösung kann mittels gezielter Konfiguration der Zielfunktionen auf ein gemittelttes Lösungsdesign eingestellt werden, welches dann die beiden Optima der unterschiedlichen physikalischen Zielfunktionen verbindet. Dadurch entsteht eine Gesamttopologie aus Magnet, Eisen und Luft, die die beiden grundsätzlich gegenläufigen Zieleigenschaften miteinander verbindet.

In Abbildung 11 ist ein Ergebnis einer gekoppelten strukturellen und elektromagnetischen Optimierung dargestellt. An dieser Stelle finden alle drei Materialzustände – Eisen, Magnet und Luft – Einsatz.

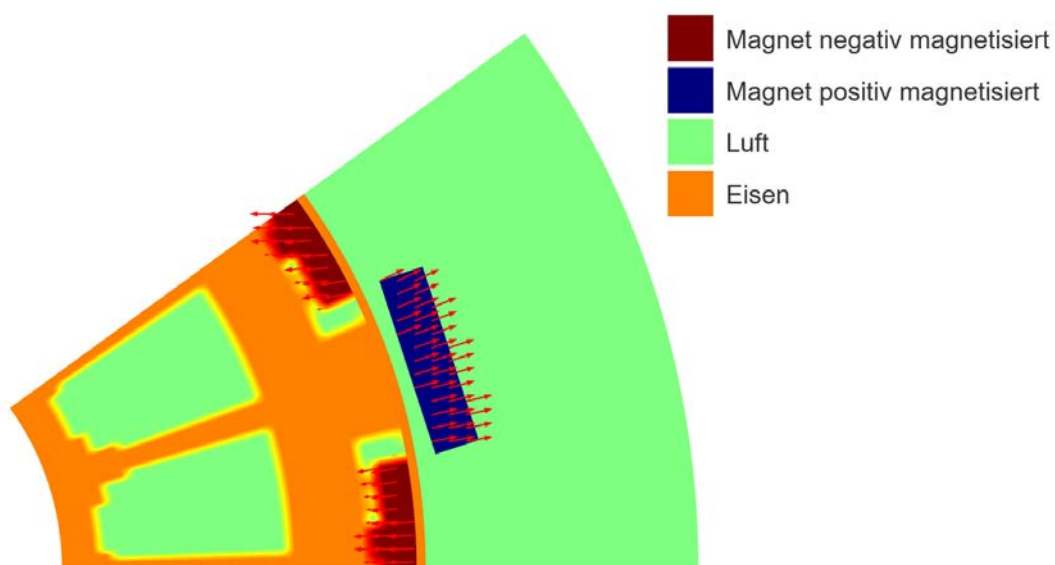


Abbildung 11: Ergebnis einer gekoppelten strukturellen und elektromagnetischen Optimierung

Beim Vergleich der Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 ist zu erkennen, dass die Abbildung 11 ein Kompromiss aus Abbildung 9 und Abbildung 10 ist. Das Eisen wird aus struktureller Sicht dementsprechend so ausgeformt, dass eine Verbindung vom inneren zum äußeren Eisenrand entsteht, siehe Abbildung 11. Weiterhin wird zusätzlich die elektromagnetische Komponente mitberücksichtigt, indem zwei Magnete mit negativer Magnetisierungsrichtung gegenüber dem Magneten mit positiver Magnetisierungsrichtung ausgebildet werden und somit eine hohe Anziehungskraft entsteht. Gleichzeitig werden die Magnete fest in die Struktur des Eisens eingebettet. Die Plausibilität der gekoppelten Optimierung kann dadurch belegt werden.

II1.2.4. Optimierungsalgorithmus in der Anwendung

Zur Übertragung auf die E-Maschine wird in der Berechnungsmethode im Vergleich zu Abschnitt II1.2.2 grundsätzlich nichts verändert, allerdings ist es im Kontext von E-Maschinen sinnvoller, statt der elektromagnetischen Kraft, das aus den elektromagnetischen tangentialen Luftspaltkräften resultierende Drehmoment für die Minimierungsaufgabe der elektromagnetischen Optimierung zu wählen:

$$\text{Zielfunktion} = Z_E \left(\sum (-g_i M_i) + h_i (M_i - \bar{M}) + n_i f_v \right) \rightarrow \min$$

In der Zielfunktion sind g_i die Gewichtungswerte und M_i die Drehmomente. Hier ist eine Summe von Drehmomenten dargestellt, da bei der Optimierung der E-Maschine mehrere Betriebspunkte berücksichtigt werden sollen. Jeder Betriebspunkt ist durch ein Strompaar (Querstrom und Längsstrom) gekennzeichnet. Ein Betriebspunkt repräsentiert beispielsweise den Grundstellbereich in dem das Drehmoment maximiert werden soll. Auch im Feldschwächbereich erfolgt eine Maximierung des Drehmomentes. Zudem werden für einzelne Betriebspunkte verschiedene Rotorstellungen berechnet. Dies dient dazu die Drehmomentschwankungen um das mittlere Drehmoment \bar{M} zu minimieren. Die Gewichtung dieser Schwankungen ($M_i - \bar{M}$) erfolgt mit den Faktoren h_i . Die Gewichtungswerte n_i dienen dazu die auftretenden Verluste f_v der E-Maschine, die sich im Wesentlichen aus Kupfer- und Eisenverlusten zusammensetzen, miteinzubeziehen.

Wesentlich für eine erfolgreiche Optimierung ist zudem die geeignete Wahl von Nebenbedingungen, die unter anderem dazu führen sollen, dass die definierten Anforderungen, siehe Abschnitt II1.2.1, erfüllt werden.

Diese sind:

- Grenzwert für die induzierte Spannung, auch als EMK bezeichnet.
Dieser Wert wird bei maximaler Drehzahl und minimaler Temperatur im Leerlauf ermittelt.
- Grenzwert für die Entmagnetisierung der Magnete.
Die Entmagnetisierung wird für den Lastfall des aktiven Kurzschlusses ermittelt, der in Realität im Fehlerfall auftreten kann und verhindern soll, dass Komponenten der Leistungselektronik zerstört werden.
- Grenzwert für die Magnetfläche.
Da die Optimierung als zweidimensionale Berechnung durchgeführt wird, bedeutet dies ein Zielwert für die Magnetmasse.
- Grenzwert für die Eisenfläche.
Dies bedeutet ein Zielwert für die Masse des Eisenbleches im Rotor.

Für die Ermittlung der ersten beiden Werte werden zusätzliche Betriebspunkte benötigt, die innerhalb einer Optimierungsschleife berechnet werden müssen.

Durch die Definition der Zielfunktion und der Nebenbedingungen ist die Aufgabe für die elektromagnetische Optimierung vollständig definiert. Im nächsten Schritt ist es erforderlich die mechanische Optimierungsaufgabe und die Kopplung dieser beiden Optimierungsaufgaben zu beschreiben.

Die strukturmechanische Optimierung hat, genauso wie beim Methodenbeispiel in Abschnitt II1.2.3, zum Ziel die Festigkeit des Rotorblechschnittes und die Drehmomentübertragung zwischen Rotorblech und Rotorwelle bei möglichst geringem Materialeinsatz sicherzustellen.

Als Zielfunktion bleibt daher:

$$\text{Zielfunktion} = Z_M(D) \rightarrow \min.$$

Als Betriebspunkt für die Ermittlung der Dehnungsenergie und der Berechnung der mechanischen Spannungen wird die maximale Betriebsdrehzahl verwendet.

Die Kopplung der elektromagnetischen Optimierung mit der strukturmechanischen Optimierung erfolgt ebenfalls analog zum Methodenbeispiel in Abschnitt II1.2.3. Daher ergibt sich die additive Zerlegung der Zielfunktion zu:

$$\text{Zielfunktion} = Z_E + Z_M = Z \left(\sum (-g_i M_i) + h_i (M_i - \bar{M}) + n_i f_v + g D \right) \rightarrow \min$$

Des Weiteren sind die bereits definierten Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Es liegt damit ein multiphysikalisches Optimierungsproblem vor. Ziel dieser gekoppelten elektromagnetomechanischen Topologieoptimierung ist es, die optimale Verteilung der drei Materialien (Magnet, Eisen und Luft) zu ermitteln. Da die einzelnen Zielgrößen mitunter auch konkurrierend sind, spielt die richtige Wahl der Gewichtung eine entscheidende Bedeutung.

In den Optimierungsstudien für den Demonstrator hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist neben der Dehnungsenergie als Zielfunktion für die mechanische Optimierung, die mechanischen Spannungen über eine Nebenbedingung einzuschränken. Dies ist ein offenes Forschungsgebiet innerhalb der Topologieoptimierung und zu diesem Zweck wurde eine Abschlussarbeit zu dem Thema bei der Volkswagen AG bearbeitet, die verschiedene Verfahren zur Einschränkung der mechanischen Spannungen miteinander vergleicht, siehe [14]. Der Fokus liegt dabei auf rotierenden Bauteilen, da die Volumenkraft zu einer nichtlinearen Optimierung führt. Die Arbeit wurde nach der Fertigstellung der Optimierung des Demonstratorblechschnitts erstellt und daher ist die mechanische Spannungsnebenbedingung noch nicht in dem im folgenden beschriebenen Optimierungsprozess enthalten.

In Abbildung 12 ist das Konzept der gekoppelten Optimierungsaufgabe mit der Zielfunktion und den Nebenbedingungen grafisch dargestellt.

In der Optimierung von Rotorblechschnitten bei E-Maschinen stellt sich die Frage nach der Magnetisierungsrichtung der Magnete. Eine Möglichkeit ist die Richtung in der Optimierung vorzugeben und so zu gewährleisten, dass die Fertigbarkeit der Magnete später gegeben ist. Andererseits ist es wünschenswert, dass die Richtung komplett frei vorgegeben werden kann. Da in der Optimierung eine Symmetriebedingung zur Spiegelung des Designraums verwendet

wird, mussten die mathematischen Gleichungen zur Spiegelung der Richtungsvektoren entwickelt werden. Damit ist die Vorgabe der Magnetisierungsrichtung möglich. Außerdem wurde die Magnetisierungsrichtung als zusätzliche Entwurfsvariable in die Optimierung aufgenommen und so konnte der Algorithmus in jedem Knotenpunkt der Magnete den Richtungsvektor für ein optimales Ergebnis ändern, siehe auch [4].

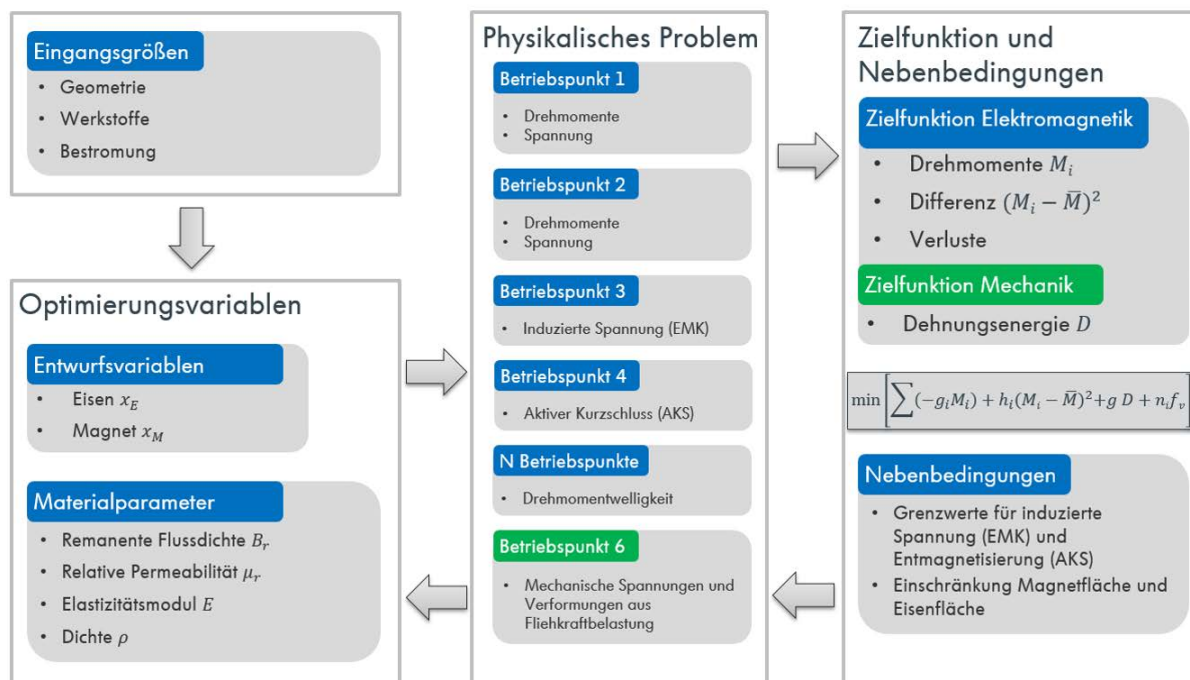


Abbildung 12: Übersicht der Optimierungsaufgabe mit Zielfunktion und Nebenbedingungen

Im Unterschied zu den Methodenbeispielen wird im Designgebiet des Rotors ein nichtlineares Materialverhalten in der Elektromagnetik für das Eisenmaterial verwendet. Dies ist für die Abbildung des Sättigungsverhalten von Eisen essentiell. In detaillierten Studien wurde daher das komplexe Zusammenspiel von verschiedenen Umschaltfunktionen, Zielgrößen und des nichtlinearen Materialverhaltens in Verbindung mit dem Optimierungsalgorithmus untersucht. Ziel war es, einen konvergenten stabilen Algorithmus zu entwickeln, der eine optimale Verteilung von Magnet, Eisen und Luft bei einer möglichst geringen Anzahl von Iterationen liefert. Insbesondere das Materialverhalten bzw. die feldabhängige Permeabilität von Eisen führt zu einer nichtlinearen Problemstellung und erfordert die iterationsweise Lösung des zugrundeliegenden magnetischen Feldes zum Beispiel über ein Newton-Verfahren.

Zur Verbesserung der Konvergenz wird in der Literatur vorgeschlagen, die Reluktivität, die dem Kehrwert der Permeabilität entspricht, in der Optimierung zu verwenden, siehe [5], [6], [20], [23]. Daher wurde eine nichtlineare Funktion an die Messdaten der BH-Kurve des Eisenmaterial angepasst. Die Anpassung erfolgte über ein Least Square Algorithmus, mit dem die Parameter für die Reluktivitätsfunktion identifiziert wurden. Im Rahmen der E-Maschinen Optimierung wird daher nicht die Umschaltfunktion aus Abbildung 6 verwendet.

Um den Demonstratoraufbau nicht zu gefährden, wurde die Optimierung der Verluste, da noch kein vollständiger Optimierungsprozess vorlag, zunächst nicht berücksichtigt. Ein Konzept welche Verluste für einen Rotorblechschritt zu berücksichtigen sind, worin sie begründet sind und wie sie in die topologische Optimierung integriert werden können, wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit bei der Volkswagen AG untersucht, siehe [24].

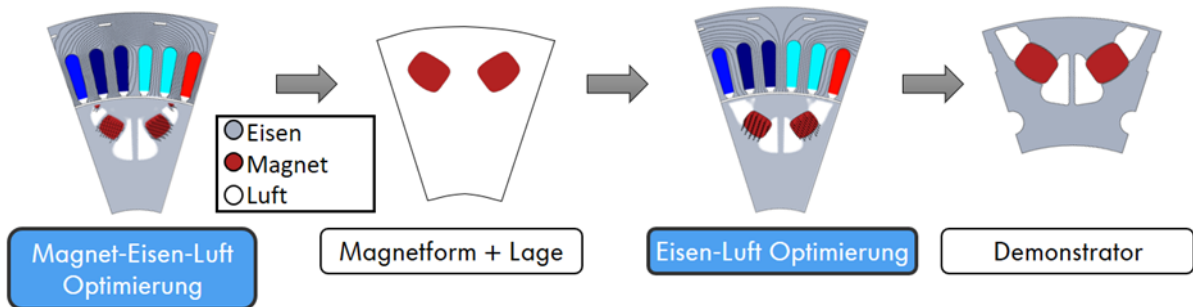


Abbildung 13: Optimierungsprozess

In den Studien zur Optimierung des Demonstrators hat sich herausgestellt, dass ein zweistufiger Optimierungsprozess von Vorteil ist, siehe Abbildung 13. Im ersten Schritt wird eine gekoppelte elektromagnetomechanische Magnet-Eisen-Luft Optimierung durchgeführt. Das Ziel dieser Optimierung ist die Ermittlung der Magnetform und -lage. Die Komplexität liegt hierbei in der Abbildung der charakteristischen Betriebspunkte und deren Berücksichtigung in der Optimierung. Dabei werden alle Optimierungsanforderungen mit Ausnahme der Drehmomentwelligkeit berücksichtigt. Wichtig dabei ist, die Normierung der Optimierungsziele und Nebenbedingungen auf den Wert von 1 und die Gewichtung der Ziele und Nebenbedingungen zueinander. Daraus ergibt sich ein komplexes Zusammenspiel. Über Studien der einzelnen Parameter kann eine geeignete Gewichtung ermittelt werden.

Zur Abbildung der Betriebspunkte werden in den Windungsgebieten des Stators unterschiedliche Stromdichten vorgegeben. In den Optimierungsmodellen wird zur Einsparung der Rechenzeit ein Sektormodell verwendet und die Geometrie auf ein einzelnen Pol reduziert, siehe Abbildung 14.

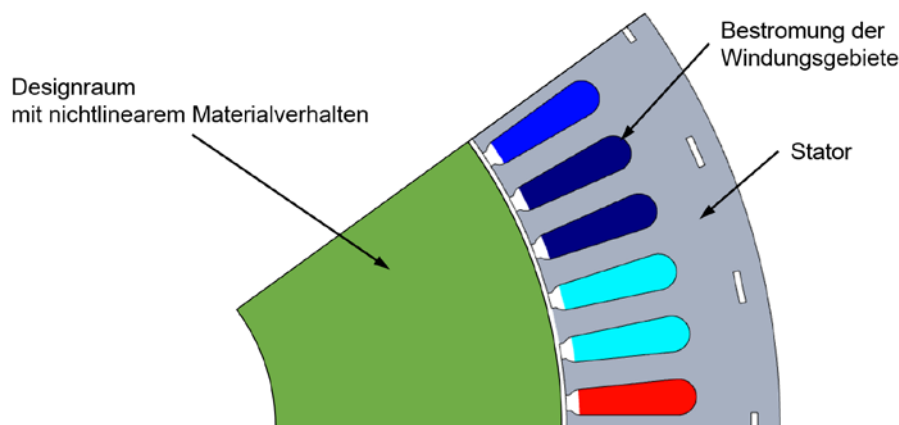


Abbildung 14: Grundoptimierungsmodell

Aufgrund des rotationssymmetrischen Aufbaus des Rotorblechs ist dies zulässig. Für die Optimierung werden antiperiodische Randbedingungen an den Schnittkanten des Modells aufgebracht.

Als Nebenbedingung für die Magnetfläche wird gegenüber der Referenzmaschine eine Reduzierung um 20% vorgegeben. Die Magnetisierungsrichtung in der Optimierung wird fest vorgegeben und es werden Parameterstudien mit unterschiedlichen Richtungen durchgeführt, mit dem Ziel die Drehmomente zu maximieren.

Des Weiteren hat sich in den Optimierungsstudien gezeigt, dass der Grenzwert der Entmagnetisierung einen großen Einfluss auf die entstehenden Magnettopologien hat. Durch eine zu starke Einschränkung der magnetischen Feldstärke verringert sich zwar die Entmagnetisierung, jedoch sinkt auch das Drehmoment der E-Maschine. Daher gilt es diese Nebenbedingung genau auf die Anforderungen einzustellen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf den Optimierungsprozess ist die Startverteilung der Magnet-Eisen-Luft Strukturen. Je nach Startverteilung steigert sich die Konvergenz des Optimierungsprozesses und auch die Ergebnislüte. Dabei ist die einfachste Möglichkeit eine homogene Verteilung der Entwurfsvariablen für Magnet und Eisen auszuwählen. Eine bessere Wahl stellt die Vorgabe eines alten Optimierungsergebnisses dar, wodurch sich der Optimierungsprozess, auf Grund besserer Konvergenz, beschleunigt. Ein Beispiel dafür ist die Startverteilung in Abbildung 15, bei der die Festigkeit bereits in der Optimierung berücksichtigt wurde, die Nebenbedingung zur Einhaltung der Entmagnetisierung jedoch nicht enthalten war. Bei einer homogenen Verteilung der Entwurfsvariablen tritt eine unplausible Dehnungsenergie auf. Wird jedoch eine konkrete Magnet-Eisen-Luft Struktur vorgegeben, welche die Drehzahlfestigkeit bereits erfüllt, stabilisiert dies den Optimierungsprozess und verbessert die Konvergenz.

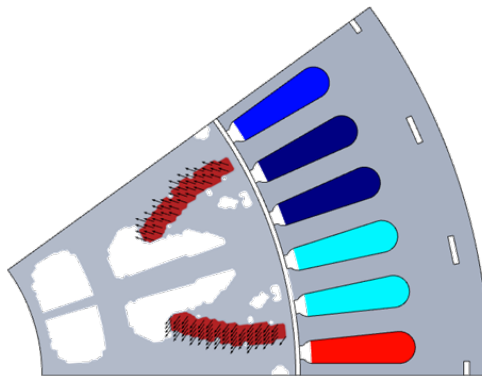


Abbildung 15: Startverteilung der Topologieoptimierung

Für die Optimierung muss außerdem das Optimierungsgebiet vorgegeben werden. Eine Möglichkeit ist es, den gesamten Rotor als Optimierungsgebiet zu definieren. In der Gesamtoptimierung wird dagegen nur ein Bereich des Rotors optimiert, siehe Abbildung 16.

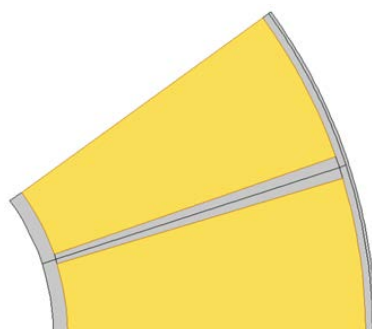


Abbildung 16: Optimierungsbereich (gelb) der Magnet-Eisen-Luft Optimierung

Der Vorteil ist die geringere Anzahl an Optimierungsvariablen und die bessere Konvergenz, da eine Grundstruktur bereits vorgegeben ist. Allerdings hat dies auch den Nachteil, dass die Stegbreite vorgegeben wird, die nicht der optimalen Breite entsprechen muss. Daher ist es sinnvoll nach der Topologieoptimierung eine Parametervariation bezüglich der Stegbreite durchzuführen, um alle Optimierungspotentiale auszuschöpfen. Das Ergebnis der Magnet-Eisen-Luft Optimierung ist in Abbildung 17 dargestellt.

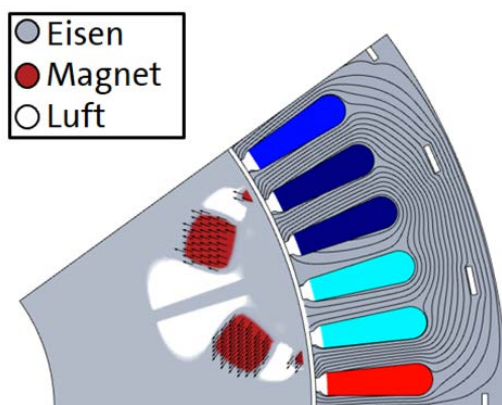


Abbildung 17: Ergebnis der Magnet-Eisen-Luft Optimierung

Das Optimierungsergebnis zeigt überwiegend klare Magnet-, Eisen- und Luftstrukturen und es existieren wenig unscharfe Bereiche. Bei einem Vergleich des Optimierungsergebnisses mit der Startverteilung aus Abbildung 15 wird deutlich, dass sich die Magnetform und -lage stark verändern. In der Startverteilung sind die Magnete länglich und gekrümmt. Außerdem befinden sie sich näher am Rotoraußendurchmesser. Aufgrund der Optimierungsziele und Nebenbedingungen ändert sich die Magnetform, wobei insbesondere der Grenzwert der Entmagnetisierung einen starken Einfluss auf die Magnetform und -lage besitzt. Am Rotorrand liegende Magnete werden im aktiven Kurzschluss hohen entmagnetisierenden Feldern ausgesetzt. Daher verschieben sich die Magnete in der Optimierung nach innen und es entsteht eine elliptische Magnetform, da durch diese Form die Entmagnetisierung geringer ausfällt. Neben den beiden großen elliptischen Magneten in Abbildung 17 entstehen auch noch kleinere Magnete am Rotorrand. Diese kleinen Magneten würden im AKS-Fall entmagnetisieren und werden zudem aus Fertigungsgründen entfernt. Aus diesem ersten Optimierungsschritt erhält man als Ergebnis die Magnetform und -lage.

Die Anforderung nach einer Reduktion der Magnetmasse konnte mit diesem ersten Prozessschritt erfüllt werden. Die Reduktion der Magnetmassen gegenüber der Referenzmaschine beträgt fast 20%.

Im zweiten Schritt wird eine gekoppelte elektromagnetomechanische Eisen-Luft Optimierung durchgeführt. Dabei werden die Magnete aus dem ersten Optimierungsschritt in eine CAD-Geometrie umgewandelt und in der Optimierung fest vorgegeben.

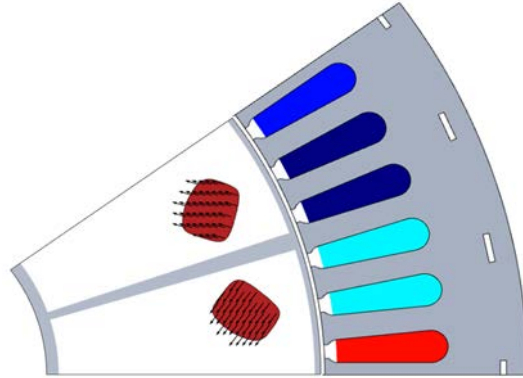


Abbildung 18: Startverteilung der Eisen-Luft Optimierung

Für die Startverteilung gibt es wieder die Möglichkeit ein bestehendes Optimierungsergebnis, zum Beispiel aus dem ersten Optimierungsschritt zu verwenden oder mit einer homogenen Verteilung zu beginnen. Bei dieser Optimierung wird eine homogene Verteilung gewählt, siehe Abbildung 18.

Das Optimierungsgebiet ist in Abbildung 19 dargestellt. Zusätzlich zu den Stegen sind auch die Magnete nun nicht mehr Teil des Optimierungsgebiets.

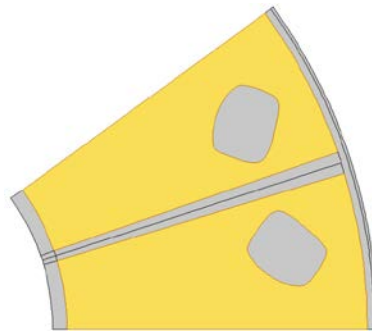


Abbildung 19: Optimierungsgebiet (gelb) der Eisen-Luft Optimierung

Die Eisen-Luft Strukturen werden dann über mehrere Rotorstellungen optimiert, mit dem Ziel eine minimale Drehmomentwelligkeit sowie eine optimale Verteilung der Eisen-Luft Strukturen bei gleichbleibender Eisenfläche zu erreichen. Dabei gelten weiterhin die Anforderungen an das Drehmoment, die EMK, die Festigkeit und die Entmagnetisierung. Das Ergebnis der Eisen-Luft Optimierung ist in Abbildung 20 dargestellt.

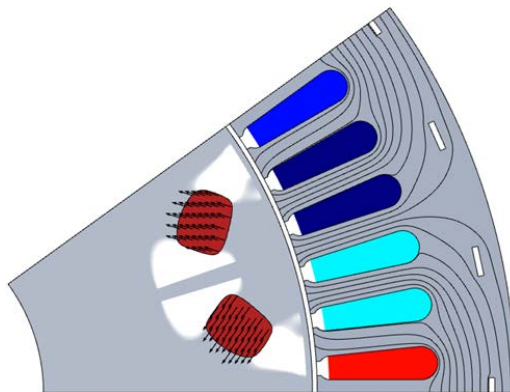


Abbildung 20: Ergebnis der Eisen-Luft Optimierung

Bei einem Vergleich mit dem Ergebnis der Magnet-Eisen-Luft Optimierung zeigt sich, dass die Luftkavitäten im Bereich des Steges zwischen den Magneten eine große Ähnlichkeit zu dem Ergebnis der Magnet-Eisen-Luft Optimierung aufweisen. Allerdings zeigen die Strukturen am Luftspalt deutliche Unterschiede. Die Drehmomentwelligkeit und die Luftspaltkräfte werden hauptsächlich durch diese Strukturen am äußeren Rotorrand beeinflusst. Zudem wird deutlich, dass die Optimierung sehr klare Strukturen liefert und wenig unscharfe Bereiche auftreten. Dies spricht für die Qualität der Optimierung.

Nach der Eisen-Luft Optimierung wird das Ergebnis in eine CAD-Geometrie umgewandelt. In der anschließenden Prevalidation der elektromagnetischen Kenngrößen liefert die optimierte Geometrie überwiegend gleichwertige oder bessere Kenngrößen. Lediglich bei einigen Kenngrößen, zum Beispiel des Drehmoments bei maximaler Drehzahl oder der Drehmomentwelligkeit bedarf es noch weiterer Optimierungen.

Daher erfolgt eine Rotorschrägungswinkeloptimierung. Bei dieser Optimierungsmethode werden die optimalen Schrägungswinkel der einzelnen Blechpakete der E-Maschine ermittelt, mit dem Ziel eine geringe Drehmomentwelligkeit bei gleichzeitiger Erfüllung der Drehmomentanforderungen zu erreichen. Zu diesem Zweck wird ein Blechpaket mit vielen verschiedenen Rotorschrägungswinkeln berechnet und über einen genetischen Optimierungsalgorithmus werden die besten Varianten ermittelt. Durch diese Optimierung können passende Rotorschrägungswinkel ermittelt werden, so dass die Drehmomentwelligkeit auf dem Niveau der Referenzmaschine liegt. In Abbildung 21 sind als Ergebnisse der Rotorschrägungswinkeloptimierung die Varianten der Rotorschrägungswinkel mit der optimalen Pareto-Front und die Drehmomentverläufe vor und nach der Optimierung dargestellt.

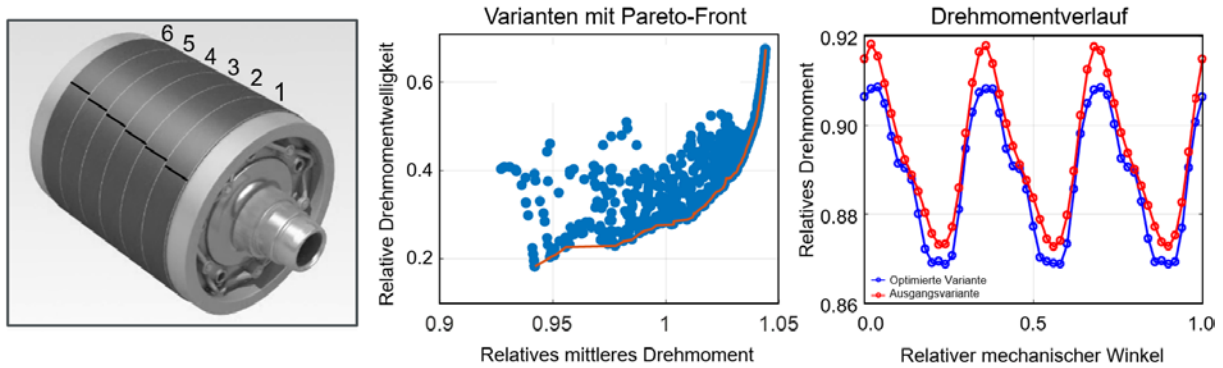


Abbildung 21: Ergebnisse der Rotorschragungswinkeloptimierung

Um das Drehmoment weiter zu verbessern, wird über eine Parametervariation eine optimale Breite des Steges zwischen den Magneten ermittelt, bei der die Festigkeit und das Drehmoment in die Bewertung einfließen.

Um zudem die Vergleichbarkeit zwischen der Demonstratormaschine und der Referenzmaschine im Prüfstandsbetrieb zu gewährleisten, wird der Innendurchmesser des Demonstratorblechschnittes im Vergleich zur optimierten Variante vergrößert.

Zur besseren Montierbarkeit der Magnete wird deren unsymmetrische Form in eine doppel-symmetrische Form abgewandelt. Zudem werden zur besseren Herstellbarkeit die Kavitäten oberhalb der Magnete geglättet und die Radien in den unteren Kavitäten ausgeformt, so dass letztlich der Rotorblechschnitt für den Demonstrator in Abbildung 22 folgt.

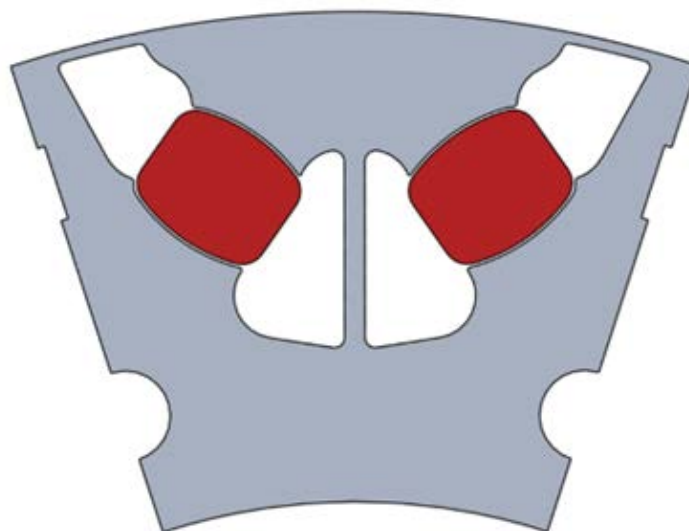


Abbildung 22: CAD-Geometrie des Rotorblechschnittes des Demonstrators

In den folgenden Abschnitten erfolgt die rechnerische Bewertung der optimierten Rotortopologie für den Aufbau des Demonstrators.

II1.2.5. Mechanische Berechnung

Im ersten Schritt erfolgt die Bewertung der mechanischen Festigkeit. Dazu wird die integrierte Werkzeugkette, siehe Schlussbericht des Teilvorhabens „Integrierte Werkzeugkette“ [3], um ein mechanisches Modell erweitert, wobei bereits verwendete Materialzuweisungen, Randbedingungen sowie Vernetzungen übernommen werden. Zusätzliche mechanische Aspekte wie die Fliehkraft oder notwendige Kontaktformulierungen werden automatisiert ermittelt und berücksichtigt. Die aus diesem Modell resultierenden mechanischen Spannungen für die Demonstratorortopologie sind in Abbildung 23 dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei der geforderten Grenzdrehzahl sowohl die von Mises Spannungen als auch die plastischen Dehnungen auf moderatem Niveau liegen. Lediglich im Bereich des Steges sowie der Kavitäten ist dies nicht der Fall. Nichtsdestotrotz wird die Grenzdrehzahl erreicht.

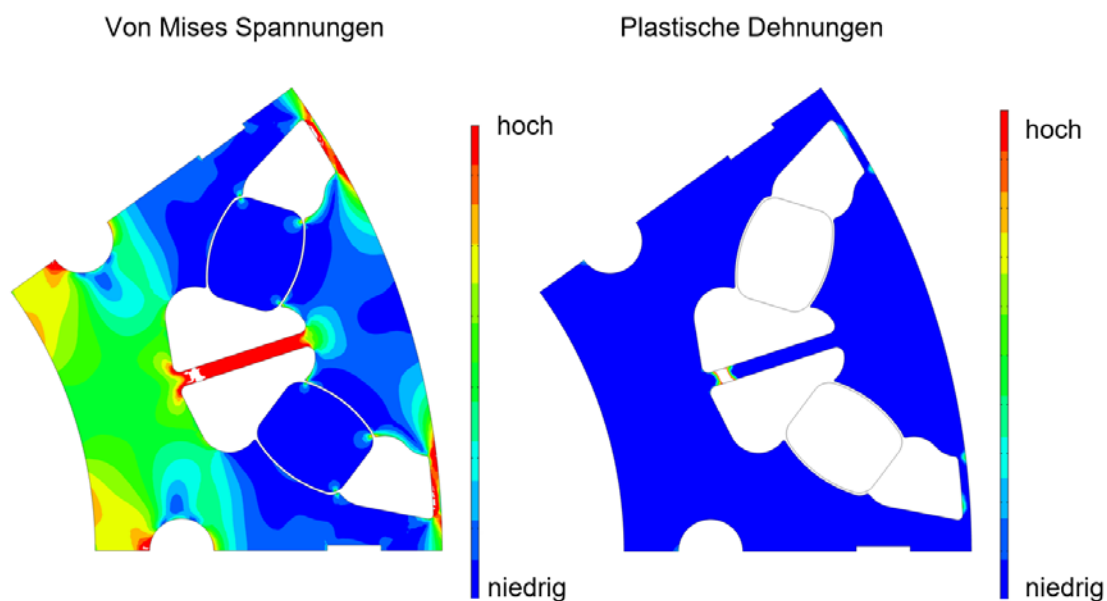


Abbildung 23: Von Mises Spannungen im Demonstrator (links), plastische Dehnungen (rechts)

Neben der Festigkeit des Blechschnitts muss auch der Presssitz zwischen Welle und Blechschnitt dahingehend bewertet werden, ob das erzeugte Moment des E-Antriebes auch übertragen und der Blechschnitt auf die Welle gefügt werden kann. Dazu werden verschiedene Überdeckungskombinationen sowie Lastfälle analysiert und bewertet, bis eine Passung gefunden wird, die beide Eigenschaften erfüllt.

Aus mechanischer Sicht kann der Blechschnitt aus Abbildung 23 erprobt werden.

II1.2.6. Elektromagnetische Berechnung

Neben den mechanischen sind auch die elektromagnetischen Eigenschaften für den Blechschnitt aus Abschnitt II1.2.4 simulativ zu überprüfen. Zu diesem Zweck wird wiederum die integrierte Werkzeugkette, vgl. [3], genutzt. Dabei werden für den Demonstrator und die Referenzmaschine identische Materialdaten und Randbedingungen gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In Abschnitt II1.2.11 werden diese den realen Bedingungen angepasst. Als bewertende Kenngrößen werden das Drehmoment im Grundstellbereich, das Drehmoment im Hochdrehzahlbereich, die elektromotorische Kraft (EMK), die Drehmomentwelligkeit des geschrägten Rotors und die Entmagnetisierungsfläche im aktiven Kurzschluss (AKS) herangezogen. Eine Auflistung der prozentualen Abweichung dieser Größen in Bezug auf die Referenzmaschine ist für beide Blechschnitte in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Kenngrößenvergleich Referenzmaschine / Demonstrator

Kenngrößen	Differenz (Referenzmaschine/Demonstrator)
Moment im Grundstellbereich	0.8%
Moment im Hochdrehzahlbereich	-2.2%
EMK (Effektivspannung)	-2.0%
Magnetgewicht (gesamt)	-19.2%
Eisengewicht (gesamt)	1.5%
Drehmomentwelligkeit (P2P Eckpunkt)	0.3%
AKS (Entmagnetisierungsfestigkeit)	bei beiden erfüllt

Dabei ist zu erkennen, dass der Demonstratorblechschnitt im Grundstellbereich ein leicht höheres Moment aufweist, während er im Hochdrehzahlbereich ein leicht verringertes Moment besitzt. Diese Phänomene sind auch in den Maximaldrehmomentkennlinien sowie den zugehörigen Leistungs-Drehzahl-Kurven in Abbildung 24 zu sehen. Die Drehmomentwelligkeit liegt für den Demonstratorblechschnitt leicht oberhalb der des Referenzblechschnitts. Die elektromotorische Kraft hingegen ist beim Demonstratorblechschnitt leicht verringert. Die Entmagnetisierungsfestigkeit ist bei beiden Blechschnitten erfüllt. Die Unterschiede der einzelnen Größen liegen immer in einem akzeptablen Bereich von ca. 2%, so dass teilweise eine Messbarkeit nicht mehr möglich ist.

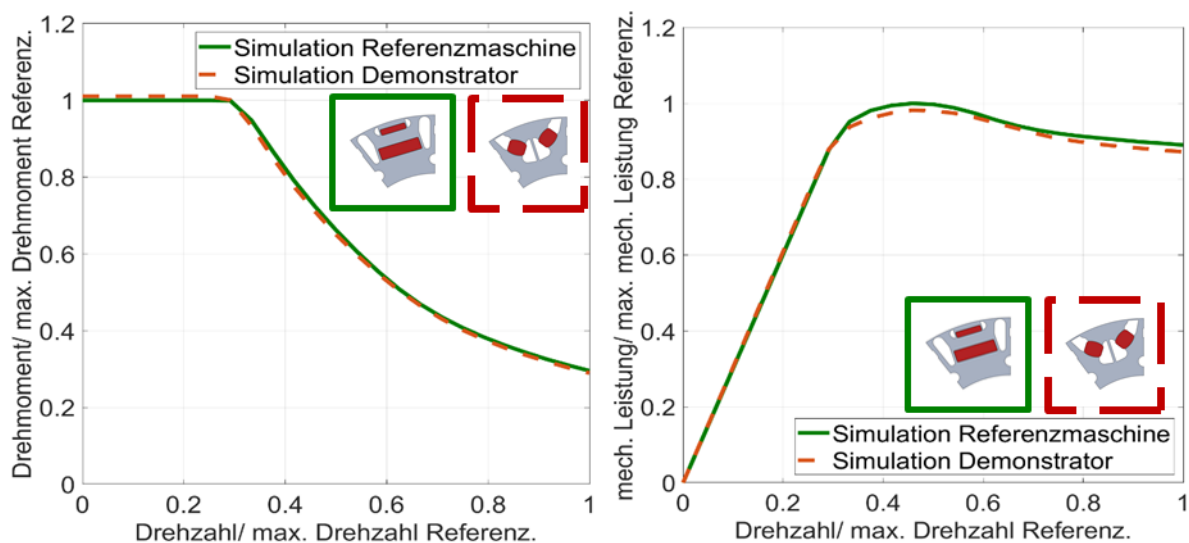


Abbildung 24: Maximaldrehmomentkennlinie (links), Leistungs-Drehzahl Kurve (rechts)

Die Eisenfläche bzw. das Eisengewicht ist beim Demonstratorblechschnitt etwa so groß wie beim Referenzblechschnitt, die Verteilung des Eisenmaterials ist allerdings durch die spezielle Formung der Kavitäten optimiert worden.

Essentiell ist jedoch, dass die Demonstrator Variante knapp 20% weniger Magnetmaterial verwendet als die Referenzmaschine. Folglich weist der Demonstratorblechschnitt im allgemeinen gleichwertige oder verbesserte Eigenschaften in Bezug auf den Referenzblechschnitt auf.

Einer Erprobung steht aus elektromagnetischer Sicht daher nichts entgegen.

III.2.7. Thermische Berechnung

Das Ziel der thermischen 2D-Simulation ist es, die Temperaturen im Rotor und Stator abzuschätzen und dabei zu überprüfen, dass die kritischen Grenztemperaturen nicht überschritten werden. Zu diesem Zweck werden die Kupfer-, Magnet- und Eisenverluste in die jeweiligen Gebiete eingepreist. Weiterhin wird die Abfuhr der Wärme über den Kühlmantel über eine Konvektionsgleichung modelliert. Darüber hinaus wird die Wärmeabfuhr an der Rotorwelle betrachtet. Der kritische Lastfall für die Temperaturen ist der Dauerbetrieb, bei dem geforderte Drehmomente erreicht und kritische Temperaturen unterschritten werden müssen.

Das Ergebnis der Temperatursimulation für den Demonstrator ist in Abbildung 25 dargestellt.

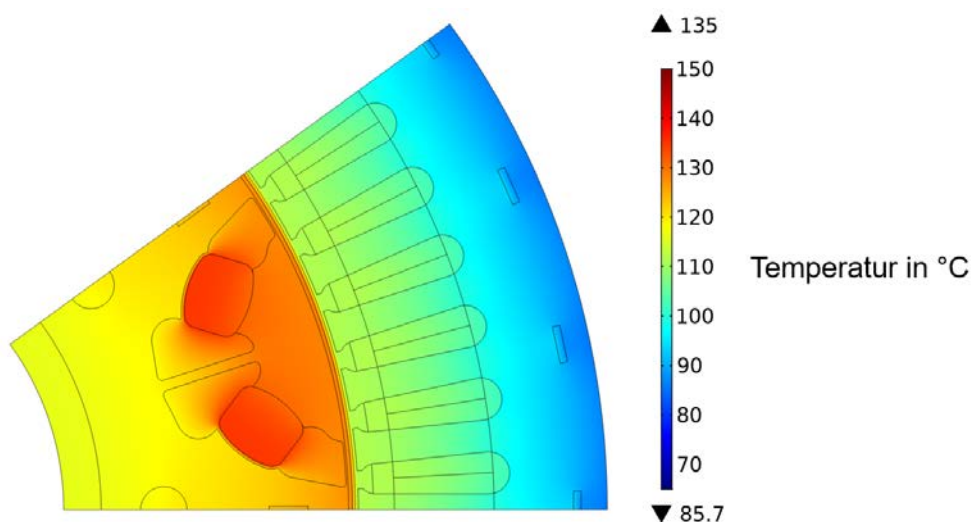


Abbildung 25: Simulierte Temperaturverteilung im Dauerbetrieb des Demonstrators

Im Stator herrschen durch die gute Anbindung des Stators an den Kühlmantel moderate Temperaturen vor. Die höchsten Temperaturen treten dabei in der Nähe des Luftspalts auf. Im Rotor sind die Temperaturen höher als im Stator, da dieser nicht aktiv gekühlt wird. Dabei treten die höchsten Temperaturen in den Magneten mit ca. 135 °C auf. Zum Vergleich ist in Abbildung 26 die Temperaturverteilung der Referenzmaschine dargestellt.

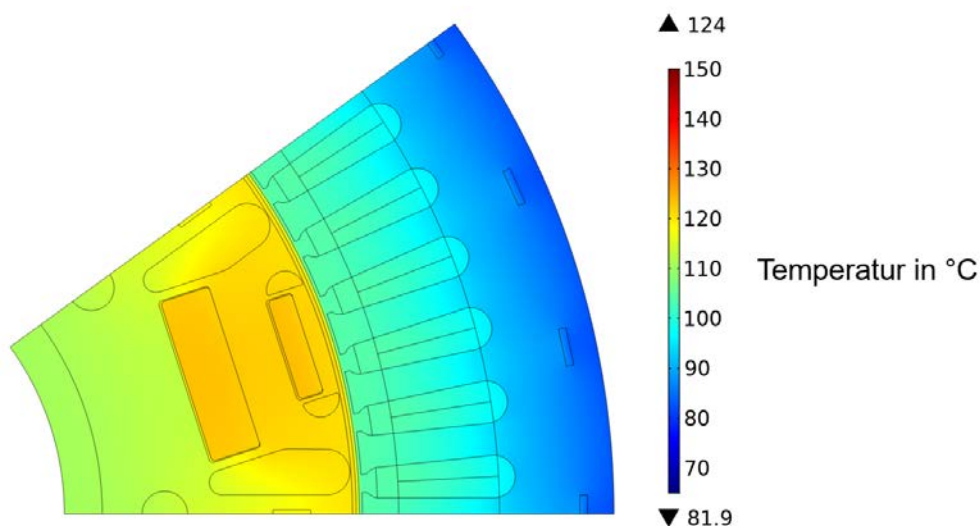


Abbildung 26: Simulierte Temperaturverteilung im Dauerbetrieb der Referenzmaschine

Die Magnettemperatur liegt bei der Referenzmaschine bei ca. 124 °C. Damit liegt die Magnettemperatur bei dem Demonstrator höher als bei der Referenzmaschine. Jedoch sind insgesamt die Temperaturen geringer als die vorgeschriebenen Grenztemperaturen und daher erfüllt der Demonstrator die thermischen Anforderungen und kann erprobt werden.

III.2.8. Strukturdynamische Berechnung

Innerhalb dieses Projekts verfolgt die strukturdynamische Berechnung vor allem das Ziel, die Akustik der E-Maschine mit dem optimierten Rotorblechschnitt im Vergleich zur Referenzmaschine zu bewerten. Das akustische Verhalten einer E-Maschine wird im Wesentlichen durch die in der E-Maschine entstehenden dynamischen Luftspaltkräfte und durch die Strukturkomponenten Stator und umgebende Gehäuse bestimmt, da diese Strukturen durch die dynamischen Luftspaltkräfte angeregt werden und Luftschall abstrahlen können. Die Bewertung der Akustik kann in diesem Fall, da die Gehäuse und der Stator beim Demonstrator im Vergleich zur Referenzmaschine nicht verändert wurden, auf Basis des rechnerischen Vergleichs der dynamischen Luftspaltkräfte erfolgen.

Für diesen Vergleich werden innerhalb des gesamten möglichen Betriebsbereich des elektrischen Antriebs eine große Anzahl von Betriebspunkten (jeweils definiert durch Drehmoment und Drehzahl) ausgewählt und für diese Betriebspunkte elektromagnetische Simulationen durchgeführt. Als Ergebnis jeder Simulation werden die dynamischen radialen und tangentialen Kräfte, die im Luftspalt der E-Maschine entstehen, ausgewertet.

Aus den dynamischen tangentialen Luftspaltkräften werden die Drehmomente ermittelt und die enthaltenen Welligkeiten einer Ordnungsanalyse zugeführt. Aufgrund der Nutzahl, der Polzahl und der Anzahl der Phasen, ergibt sich für diese E-Maschine, dass die Drehmomentwelligkeiten hauptsächlich die 30te und 60te Motorordnung enthalten. Dies bedeutet, dass pro Umdrehung des Motors, Oberwellen mit einer 30 bzw. 60-fach höheren Frequenz als die Grundwelle enthalten sind. In Abbildung 27 ist das Ergebnis der Drehmomentwelligkeitsanalyse im Vergleich zwischen Referenzmaschine und Demonstrator grafisch dargestellt, wobei in diesen Diagrammen die Farbe den Wert der Drehmomentwelligkeit repräsentiert.

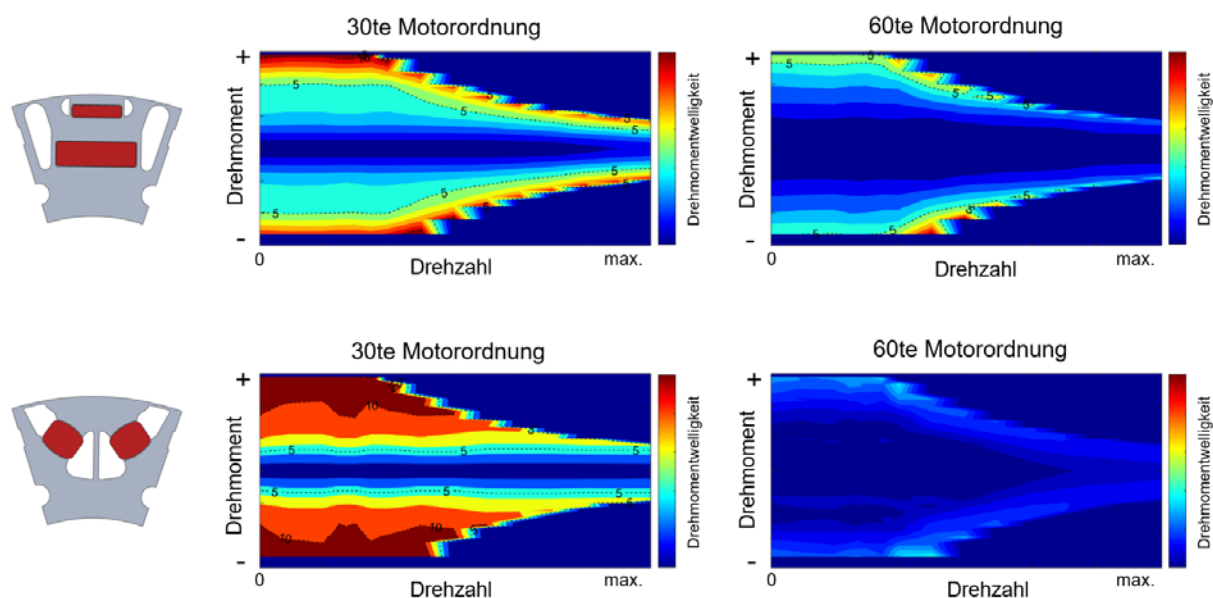


Abbildung 27: Simulierte Drehmomentwelligkeiten, Referenzmaschine und Demonstrator

In diesen Diagrammen ist zu erkennen, dass die 60te Motorordnung der Drehmomentwelligkeit des Demonstrators geringer ist als bei der Referenzmaschine. Dies ist auf die durchgeführte

Rotorschrägungswinkeloptimierung zurückzuführen, die vor allem auf diese Motorordnung wirkt. Die 30te Motorordnung ist beim Demonstrator insbesondere bei höherem Drehmoment etwas größer. Dies ist allerdings aufgrund der bestehenden Erfahrungen noch als unkritisch anzusehen.

Neben den Drehmomentwelligkeiten werden die radialen dynamischen Luftspaltkräfte betrachtet, da diese den Stator und das umliegende Gehäuse radial nach außen anregen und insbesondere eine akustisch störende Luftschallabstrahlung bewirken können.

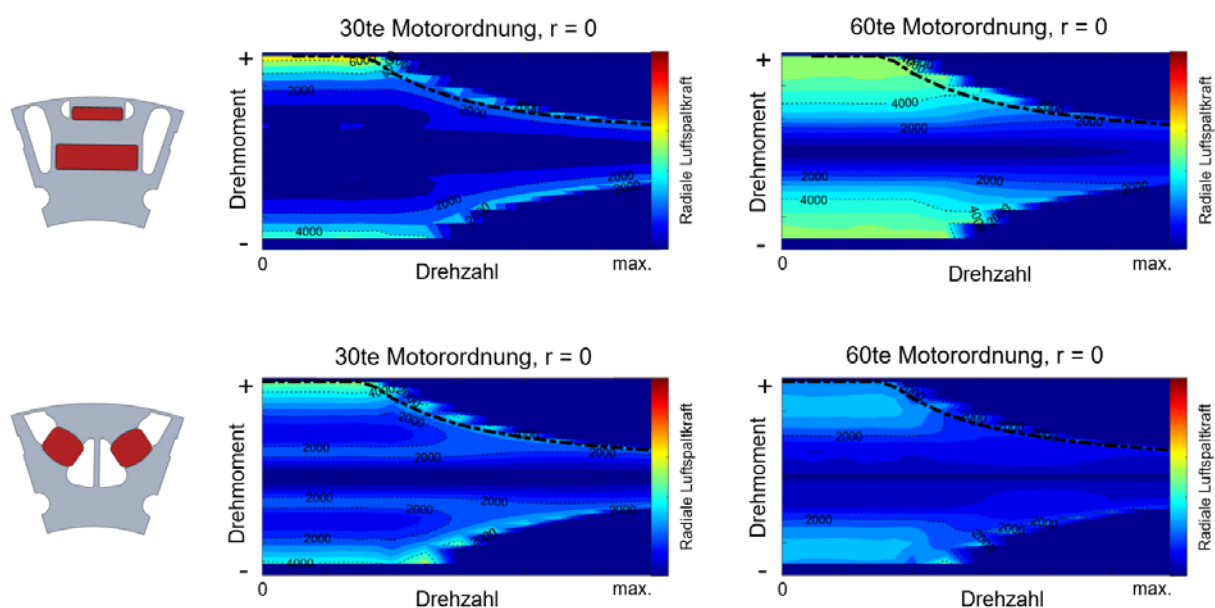


Abbildung 28: Simulierte radiale dynamische Luftspaltkräfte, Referenzmaschine und Demonstrator

Bei der Analyse der radialen dynamischen Luftspaltkräfte wird unterschieden, welche Eigenformen des Stators und des umgebenden Gehäuses angeregt werden können. Akustisch besonders kritisch ist die Schwingungsanregung des sogenannten „Pumpmodes“, der im Allgemeinen mit $r = 0$ bezeichnet wird. Dies ist ein gleichmäßiges radiales dynamisches Aufweiten, welches zu einer besonders hohen Schallabstrahlung führen kann.

In Abbildung 28 sind für diesen Pumpmode und die beiden auch hier relevanten Motorordnungen 30te und 60te die Auswertungen der radialen dynamischen Luftspaltkräfte grafisch über den Drehzahl- und Drehmomentbereich der E-Maschine dargestellt. Die Farbe in diesen Diagrammen repräsentiert den Wert der radialen dynamischen Luftspaltkräfte. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Demonstrator nahezu über den gesamten Bereich etwas geringere dynamische Luftspaltkräfte erzeugt als die Referenzmaschine.

Aus strukturdynamischer und akustischer Sicht ist eine Erprobung des optimierten Blechschnitts möglich.

III.2.9. Vorbereitung Erprobung

Auf Grund der positiven Ergebnisse innerhalb der Simulation wird der Rotorblechschnitt für den Demonstrator gefertigt. Dies geschieht durch Lasern der vorgegebenen Geometrie jeder einzelnen Elektroblechlamelle im Werk Kassel. Zusammen mit den Magneten des Projektpartners MSS erfolgt der Aufbau des Demonstrators. Im ersten Schritt werden die einzelnen Blechschnittlamellen gestapelt, ausgerichtet und durch Erwärmen im Ofen mit Hilfe der Backlackbeschichtung und einer entsprechenden Vorspannung miteinander verbunden. Im zweiten Schritt werden die Magnete in das Lamellenpaket eingesetzt, siehe Abbildung 29 (links).

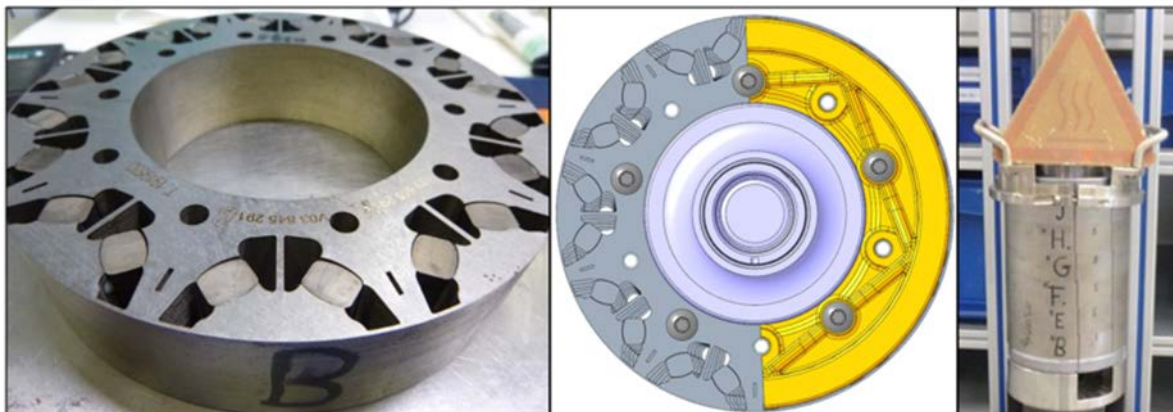


Abbildung 29: Fertiges Lamellenpaket (links), Schrägung des Rotors (Mitte), gefügter Rotor (rechts)

Um zu gewährleisten, dass die Magnete trotz Fertigungstoleranzen immer in den Demonstratorblechschnitt eingesetzt werden können, wurde bei der Auskonstruktion ein definierter Spalt zwischen Magnet und Blech vorgesehen. Dieser verhindert jedoch ein Einklemmen der Magnete, so dass diese für den Betrieb des Demonstrators auf dem Prüfstand durch Kleben fixiert werden müssen. Die Parameter der Klebung werden über Klebeversuche definiert, bei denen verschiedenste Kombinationen an Klebstoffmenge, -art und -applikation untersucht und mittels Ermittlung der benötigten Kraft beim Auspressen der Magnete aus dem Demonstratorblechpaket bewertet werden. Nach erfolgreichem Einkleben der Magnete wird die Höhe des jeweiligen Lamellenpakets kontrolliert, bevor die einzelnen Lamellenpakete gestapelt und unter Berücksichtigung der vorgegebenen Rotorschrägung ausgerichtet werden, siehe Abbildung 29 (Mitte). Im nächsten Schritt werden die Lamellenpakete mit den Wuchtscheiben zu einem Turm verschraubt und im Ofen erwärmt, während die Welle in Stickstoff gekühlt wird. Danach erfolgt mittels geeigneter Vorrichtungen das Fügen der Welle mit dem Lamellenpaketturm, siehe Abbildung 29 (rechts). Ist der Rotor abgekühlt, wird er magnetisiert und gewuchtet. Abschließend wird über eine Oberflächenmessung die Magnetisierung kontrolliert.

Für einen derartig errichteten Standardaufbau ist der zugehörige Verlauf des normierten radialen magnetischen Feldes, resultierend aus der Oberflächenmessung, über ein Polpaar in Abbildung 30 zu erkennen. Die Messung des Feldes erfolgt in der Mitte eines jeden Lamellenpakets über den gesamten Umfang. Daher wiederholt sich der in Abbildung 30 dargestellte Verlauf, so oft wie es Polpaare gibt. Der Versatz, der den Paketen zugeordneten Kurven, gibt den tatsächlichen Rotorschrägungswinkel an.

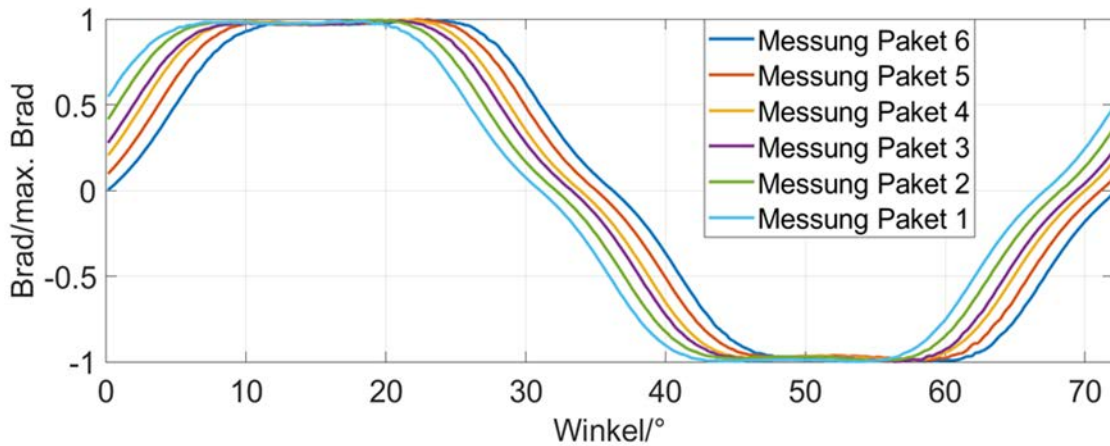


Abbildung 30: Verlauf des radialen magnetischen Feldes über ein Polpaar

Um auch die Temperatur im Rotor ermitteln zu können, wird zudem ein Telemetrieaufbau realisiert. Bei diesem werden, axial über den Rotor verteilt, einzelne Magnete mit Temperatursensoren versehen. Dazu müssen entsprechende Kabelkanäle in die Lamellenpakete und die Rotorwelle eingearbeitet werden, siehe Abbildung 31. Des Weiteren muss die Rotorwelle mit einer Telemetrie bestückt werden.

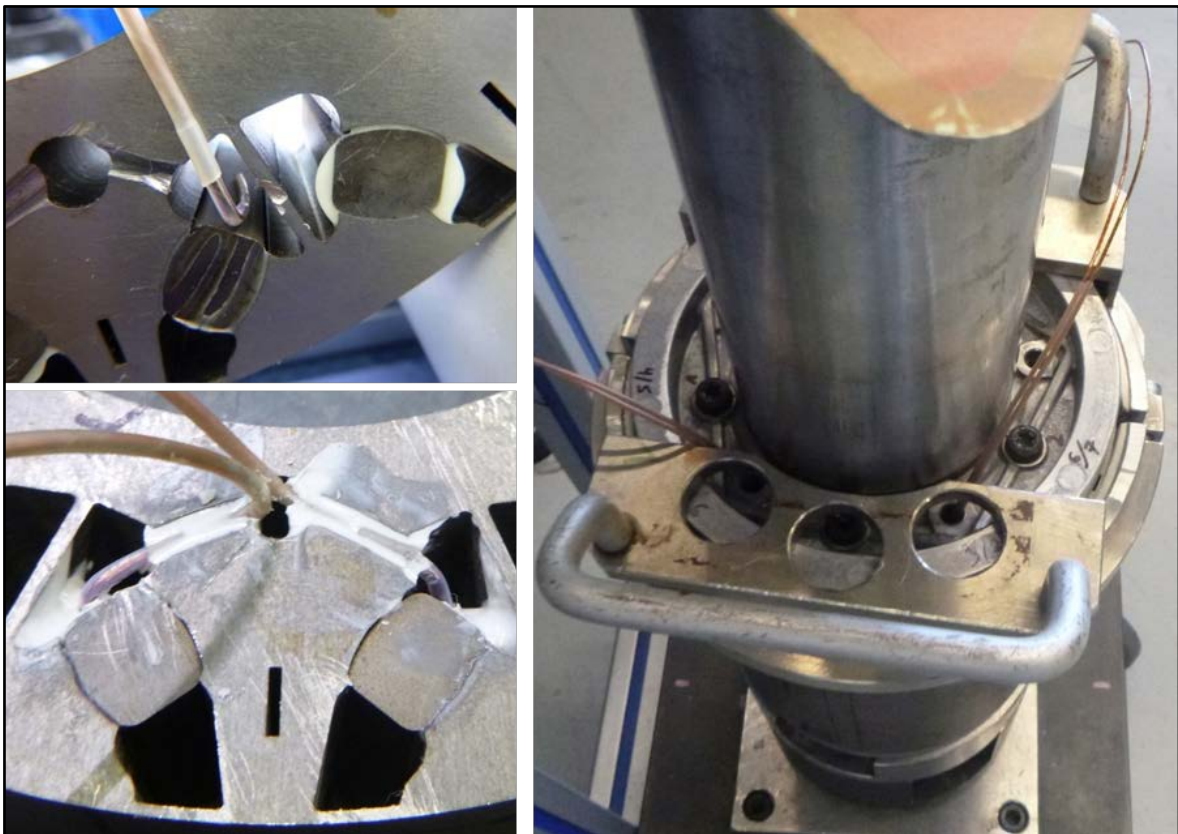


Abbildung 31: Kabelführung innerhalb des Telemetrieaufbaus

Insgesamt wurden vier Rotoren mit optimierter Blechschnittgeometrie gefertigt. Dabei handelt es sich bei einem davon um den Telemetrieaufbau. Ein Standardaufbau wurde dem Projektpartner FSG in eine E-Maschine montiert und für ihre Messungen zur Verfügung gestellt.

II1.2.10. Durchführung Erprobung

Zur experimentellen Bewertung des Demonstrators wird im ersten Schritt eine e-Golf Serienmaschine mit einem Serienrotor betrachtet. Diese dient dazu Referenzmessungen und somit eine Bewertungsgrundlage zu generieren. Im nächsten Schritt wird der Serienrotor durch einen Demonstratorrotor ersetzt. Dadurch bleibt das Umfeld des Rotors gleich und die Einflüsse des optimierten Blechschnittes können ermittelt werden. Dieses Vorgehen erfolgt für alle Aufbauten, die dann nacheinander auf einem 1E-Prüfstand im Prüffeld der Komponenten-Entwicklung im Werk Kassel hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Eigenschaften experimentell untersucht werden. Zusätzlich wird für einen E-Antrieb mit Demonstratorrotor eine akustische Messung auf dem Akustikprüfstand im Prüffeld der Komponenten-Entwicklung im Werk Kassel durchgeführt. Eine identische Messung erfolgt zu Vergleichszwecken für einen Referenzantrieb mit Serienrotor.

In diesem Abschnitt werden die experimentell erzielten Ergebnisse zwischen Demonstrator und Referenzmaschine verglichen. Im nächsten Abschnitt erfolgt ein Vergleich zu den Berechnungsergebnissen.

Messungen der E-Maschinen auf dem 1E-Prüfstand

Für die Messungen am 1E-Prüfstand werden die zu prüfenden E-Maschinen (Prüflinge) nacheinander mit den entsprechenden Adaptionen auf dem Prüfstand aufgebaut und an die prüfstandsseitige Abtriebsmaschine angeschlossen. Der Prüfling wird mittels eines Universalumrichters mit Strom versorgt und über einen Kühlkreislauf entsprechend der Vorgaben temperiert. Mit einer Drehmoment-Drehzahlregelung erfolgt der Betrieb des Prüflings, das bedeutet, dass die Prüfstandmaschine auf Drehzahl und/oder der Prüfling auf Drehmoment geregelt wird. Folgende Messungen wurden durchgeführt:

1. EMK
2. Maximaldrehmomentkennlinie
3. Dauerdrehmomentkennlinie
4. Wirkungsgradkennfeld

Gemessen werden sowohl für den Demonstrator als auch für die Referenzmaschine grundsätzlich die Drehmomente, die Drehzahlen und die Spannungs- und Stromgrößen.

Bei der Messung des Telemetrieaufbaus werden zusätzlich die Temperaturen erfasst. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt II1.2.11 dargestellt und erläutert.

In der ersten Messung (EMK) werden bei stromlosem Betrieb über die Abtriebsmaschine verschiedene Drehzahlen gestellt. Für jede Drehzahl werden die Verläufe der induzierten Klemmspannungen sowie die zugehörigen Effektivwerte bestimmt. Letztere sind in Abbildung 32 (links) sowohl für die Referenzmaschine als auch für den Demonstrator für die einzelnen Drehzahlen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass im unteren Drehzahlbereich eine gute Übereinstimmung zwischen Referenzmaschine und Demonstrator vorliegt. Bei höheren Drehzahlen steigt die Abweichung, bleibt jedoch mit ca. 3% auf moderatem Niveau. Dies hängt mit den geringfügigen Unterschieden bei den Eigenschaften des Magnetmaterials zusammen. Diese

können jedoch auf Grund von Toleranzen bei der Zusammensetzung sowie von Fertigungstoleranzen nicht ganz ausgeschlossen werden. Der Vergleich der Verläufe der Klemmspannungen zeigt ein ähnliches Bild.

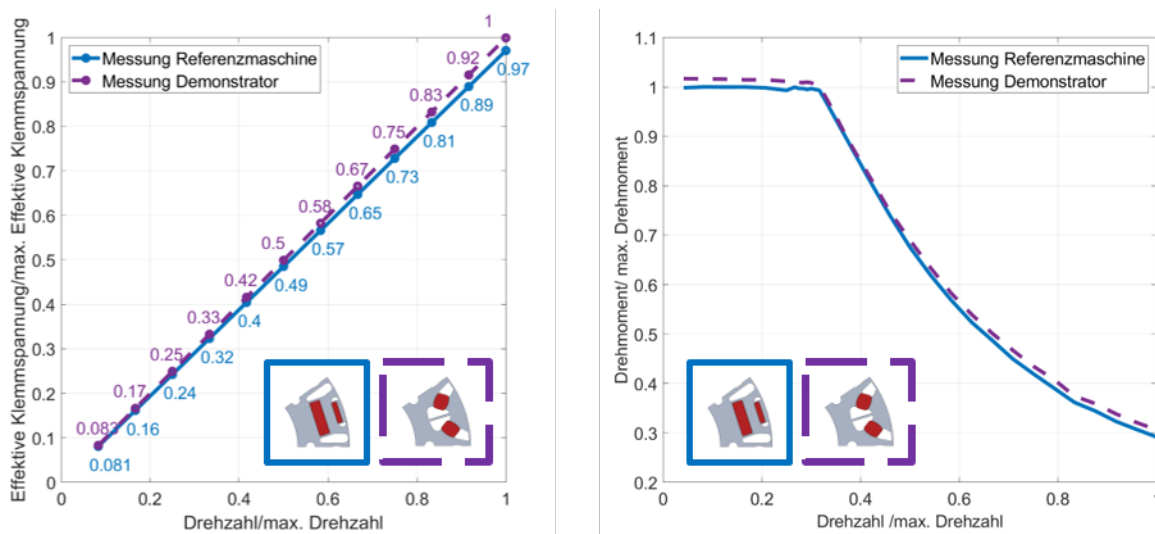


Abbildung 32: Experimenteller Vergleich Referenzmaschine/Demonstrator: EMK (links), Maximaldrehmomentkennlinie (rechts)

Zur Bestimmung der Maximaldrehmomentkennlinie wird der Antrieb bestromt und mittels Lastmaschine eine definierte Drehzahl vorgegeben. Im nächsten Schritt wird identifiziert, welches maximale Moment unter Einhaltung der Spannungsgrenze sowie der Phasenstromgrenze gestellt werden kann. Das Ergebnis für beide Rotorvariationen ist in Abbildung 32 (rechts) zu erkennen. Auch hier sind erneut geringfügige Abweichungen von bis zu 5% zwischen der Referenzmaschine und dem Demonstrator zu sehen. Auch diese sind teilweise auf Unterschiede im Magnetmaterial zurückzuführen. Des Weiteren herrschen Diskrepanzen in der Bestromung vor, die auf die Prüfstandregelung zurückzuführen sind. Nichtsdestotrotz ist ebenso bei der Maximaldrehmomentkennlinie die Disparität zwischen den beiden Prüflingen so gering, dass ihnen eine äquivalente Charakteristik zugeschrieben werden kann.

Eine weitere Messung ist die Dauerdrehmomentkennlinie. Bei dieser Prüfung werden die Drehmoment- und Drehzahlvorgaben der zu erreichenden Dauerkennlinie eingestellt und es wird die Temperatur am Temperatursensor, der im Wickelkopf des Stators integriert ist, beobachtet. Wenn nach 60 Minuten der Wert dieses Temperatursensors unter einem definierten zulässigen Temperaturwert liegt, dann gilt dieser Betriebspunkt als dauerhaft einstellbar und das thermische Verhalten der E-Maschine kann positiv beurteilt werden. In Abbildung 33 sind die erreichten Drehmoment- und Drehzahlwerte des Demonstrators und der Referenzmaschine dargestellt. Die Kurven liegen übereinander und beide E-Maschinen erfüllen somit die Vorgaben der Dauerkennlinie.

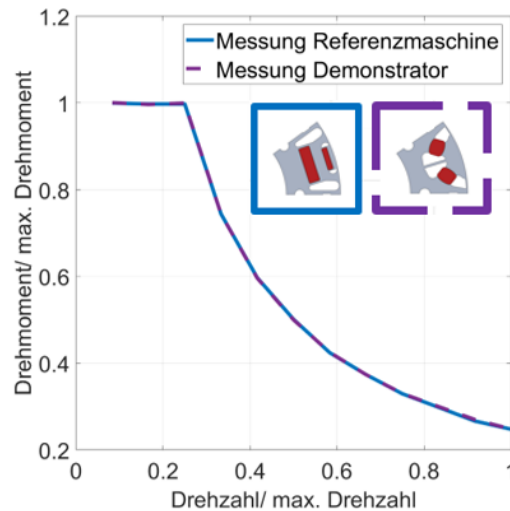


Abbildung 33: Experimenteller Vergleich Referenzmaschine/Demonstrator: Dauerkennlinie

Ein weiterer Aspekt des experimentellen Vergleichs zwischen der Referenzmaschine und dem Demonstrator ist die Effizienzbewertung. Dabei werden zunächst für den Demonstrator und die Referenzmaschine die Wirkungsgradkennfelder für ein Drehmoment-Drehzahl Gitter ermittelt, wodurch sich die E-Maschinenverluste in den einzelnen Betriebspunkten ergeben. Im nächsten Schritt wird der WLTP-Fahrzyklus simulativ durchlaufen.

Als Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 34 in dem gesamten Drehmoment-Drehzahlbereich der Vergleich der E-Maschinenverluste der Referenzmaschine und des Demonstrators dargestellt. Die rote Farbe bedeutet, dass der Demonstrator in diesen Betriebspunkten geringere Verluste besitzt als die Referenzmaschine. Die blaue Farbe stellt den umgekehrten Sachverhalt dar.

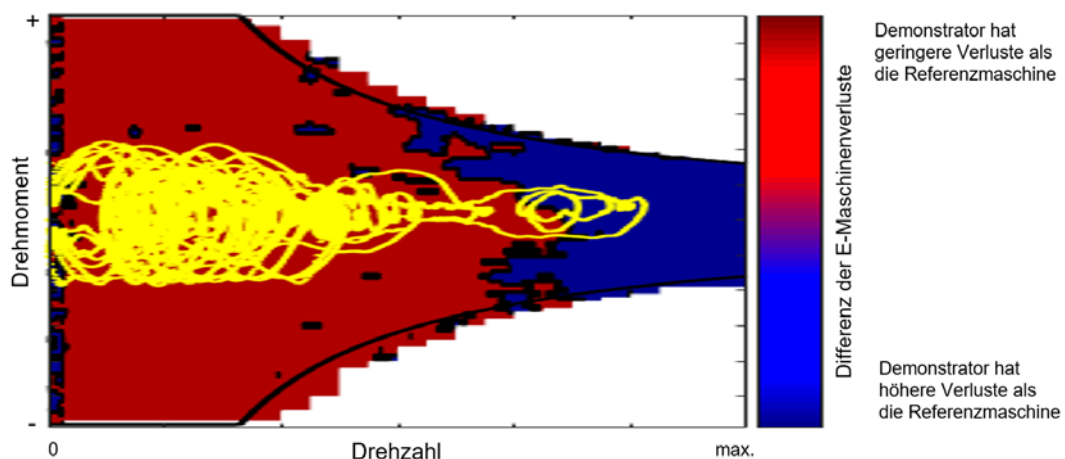


Abbildung 34: Vergleich der E-Maschinenverluste mit eingetragem WLTP-Zyklus

Zusätzlich sind in Gelb die Betriebspunkte des WLTP-Zyklus eingetragen. Da der WLTP-Zyklus sich überwiegend in dem Bereich befindet, in dem der Demonstrator geringere Verluste besitzt, ergibt sich in diesem Zyklus ein Effizienzvorteil von etwa 5 %.

Messungen des E-Antriebs auf dem Akustikprüfstand

Die Akustik eines E-Antriebs lässt sich am besten im Fahrzeug während der Fahrt beurteilen. Daher wurden eine der aufgebauten Demonstrator-E-Maschinen und eine der Referenzmaschinen zunächst zu E-Antrieben vervollständigt, indem die Getriebekomponenten montiert wurden, siehe auch Abbildung 1. Anschließend wurden sie nacheinander in einen e-Golf eingebaut.

Die Akustikprüfung fand auf dem Akustikprüfstand statt. Dieser Prüfstand zeichnet sich dadurch aus, dass mit Hilfe von schallreflexionsarmen Verkleidungen ein akustischer Raum der Klasse 1 entsteht, so dass sich dieser Raum wie ein „Freifeld“ verhält. Auf diesem Akustikprüfstand kann ein Fahrzeug aufgebaut und stehend betrieben werden, indem die Räder über entsprechende Vorrichtungen an die Abtriebsmaschinen des Prüfstands angeschlossen werden. Somit lässt sich das Fahrzeug über den gesamten Drehzahl- und Drehmomentbereich unter sehr reproduzierbaren Rahmenbedingungen betreiben. Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren, die an dem Antrieb angebracht werden, und Mikrofonen an den Positionen der Fahrzeuginsassen kann während des Betriebs des Fahrzeugs das akustische und das schwingungstechnische Verhalten aufgezeichnet werden.

In Abbildung 35 ist das Ergebnis der Akustikmessungen der beiden Antriebe im Vergleich für die hier relevanten Motorordnungen 30te und 60te als „akustische Fingerabdrücke“ dargestellt. In der farblichen Darstellung ist der Luftschall am Fahrerohr während der Akustikmessung abgebildet, wobei die Farben gelb bis rot höhere Pegel und die Farben grün bis blau geringere Pegel bedeuten.

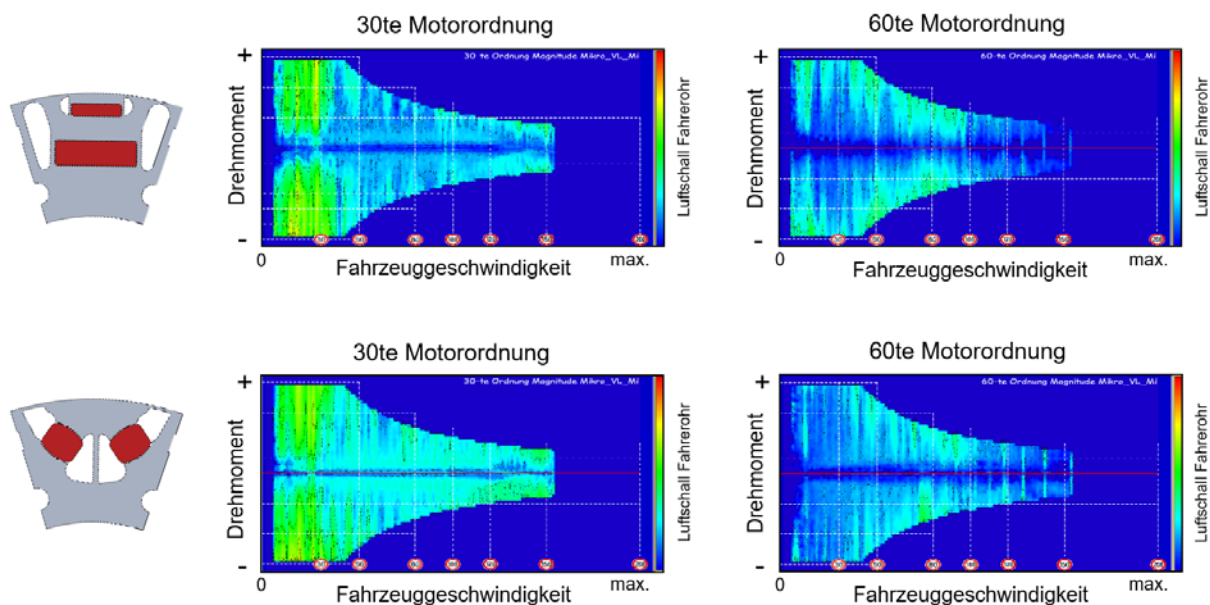


Abbildung 35: Akustische Fingerabdrücke der relevanten E-Maschinenordnungen

Der Vergleich zeigt, dass der Demonstrator in der 60ten Motorordnung in nahezu allen Bereichen geringere Luftschallpegel am Fahrerohr aufweist.

In der 30ten Motorordnung ist der Luftschallpegel der beiden E-Antriebe bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten etwa gleich und bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten sind die Luftschallpegel des Demonstrators etwas höher als bei der Referenzmaschine, aber auf einem relativ geringen Niveau und daher akustisch unauffällig. Diese gemessenen Luftschallpegel korrespondieren insgesamt gut zu den simulierten Werten der Drehmomentwelligkeit und der radialen dynamischen Luftspaltkräfte.

Darüber hinaus wurden bei der Akustikmessung des Demonstrators keine schwingungstechnischen Auffälligkeiten festgestellt.

Resümee des experimentellen Vergleichs

Alles in allem zeigt die experimentelle Gegenüberstellung der EMK, der Maximaldrehmomentkennlinie, der Effizienzbewertung sowie der strukturdynamischen und akustischen Bewertung, dass der Demonstrator ähnliche Eigenschaften wie die Referenzmaschine besitzt. Allerdings wird beim Demonstrator fast 20% des Magnetmaterials eingespart. Die bemerkenswerte Funktionsweise der in Abschnitt II1.2.4 hergeleiteten topologischen Optimierung kann daher mit der Erprobung dokumentiert werden und einem Serieneinsatz derartig innovativer Rotortopologien steht nichts entgegen. Im nächsten Schritt soll folglich noch die Simulation mit den Messungen verglichen und bewertet werden.

II1.2.11. Auswertung und Analyse Versuch/Simulation

Neben dem Nachweis, dass die topologisch optimierte Rotortopologie mit fast 20% weniger Magnetmaterial ähnliche Eigenschaften aufweist wie der Referenzrotor, sollen die Messungen auch dazu genutzt werden, die Simulation zu parametrieren. Dazu werden zunächst die grundlegenden, anhand des Demonstrators ermittelbaren, Parameter in die integrierte Werkzeugkette aufgenommen. Dies umfasst einerseits die Materialdaten der verwendeten Magnete, die vom Projektpartner MSS zur Verfügung gestellt wurden, vgl. [29]. Die Materialdaten der Elektrobleche sind bekannt, da diese identisch zu denen sind, die bei Serienrotoren verwendet werden. Andererseits werden mittels Abbildung 30 die Schrägungswinkel bestimmt und entsprechend verwendet.

Mit diesen angepassten Größen wird im ersten Schritt die EMK simuliert und den Ergebnissen aus der Messung in Abbildung 36 gegenübergestellt. Zu erkennen ist eine sehr gute Übereinstimmung der normierten effektiven Klemmspannung zwischen Experiment und Berechnung in allen Drehzahlbereichen. Bei den zugehörigen zeitlichen Verläufen verhält es sich ähnlich. Somit können die genutzten Materialparameter als valide angesehen werden.

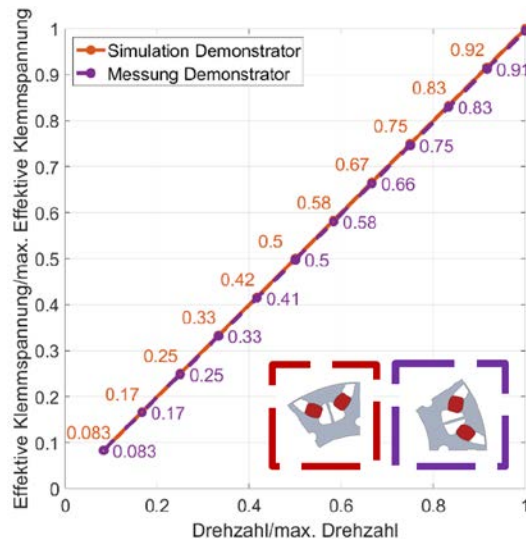


Abbildung 36: Vergleich Simulation und Messung des Demonstrators: EMK

Im nächsten Schritt soll die Maximaldrehmomentkennlinie simuliert werden. Auf Grund der Bestromung des Antriebes bei dieser Messung entstehen elektromagnetisch bedingt höhere Verluste als bei der EMK Messung. Der daraus resultierende Temperaturanstieg, führt jedoch zu einer Veränderung der magnetischen Eigenschaften, die wiederum das erreichbare Drehmoment beeinflussen.

Daher wird der in Abschnitt II1.2.9 dargestellte Telemetrieaufbau des Demonstrators genutzt, um die im Rotor vorherrschende Temperatur während der Messung der Maximaldrehmomentkennlinie zu ermitteln. Gemäß der in Abbildung 37 dargestellten Temperaturdaten zu den einzelnen Betriebspunkten an den jeweiligen Sensoren, liegt die Temperatur im Demonstrator bei ca. 70°C. Die remanente Flussdichte der Magnete wird daher dementsprechend herabgesetzt. Während in der Messung die Gesamtverluste des Antriebes, bestehend aus Eisen-, Magnet- und Reibungsverlusten, bestimmt werden können, ist dies in der Simulation aktuell nur bedingt möglich. Unter der Annahme, dass der Eckpunkt der Maximaldrehmomentkennlinie gleich bleibt, wird daher die berechnete drehzahlabhängige Leistung um die gemessene Verlustleistung reduziert.

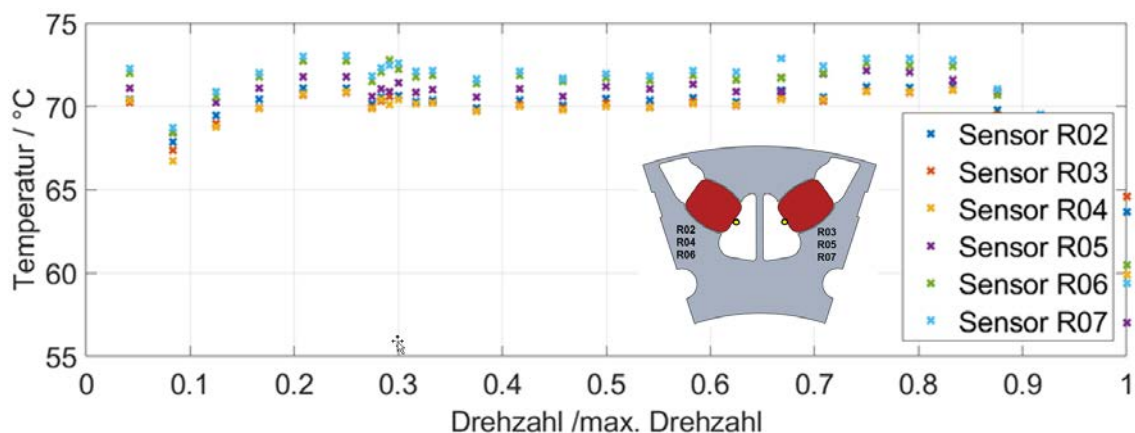


Abbildung 37: Temperaturentwicklung während der Messung der Maximaldrehmomentkennlinie

Aus der sich ergebenden Leistung wird dann das in Abbildung 38 dargestellte zugehörige Drehmoment ermittelt.

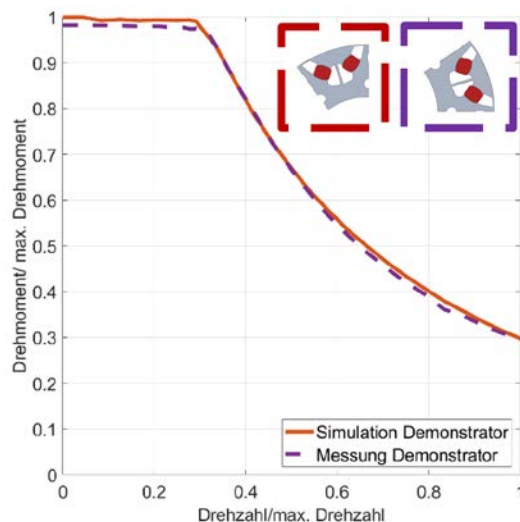


Abbildung 38: Vergleich Simulation und Messung des Demonstrators: Maximaldrehmomentkennlinie

Es ist zu erkennen, dass der gemessene Feldschwächbereich gut von der Simulation abgebildet wird. Im Grundstellbereich gibt es jedoch sichtbare Unterschiede. Im Allgemeinen liegt jedoch auch bei der Maximaldrehmomentkennlinie, mit einer maximalen Abweichung von 3%, eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vor. Die Diskrepanzen können verschiedene Ursachen haben. Zunächst wird eine dreidimensionale Messung mit einer zweidimensionalen Simulation verglichen, so dass auftretende Randeffekte rechnerisch nicht berücksichtigt sind. In Realität bestehen die Rotorblechpakete außerdem aus einzelnen Lamellen. In der Simulation wird dies nicht berücksichtigt, sondern lediglich die Rotorlänge. Um dies zu korrigieren, wird der Stapelfaktor eingeführt. Wie dieser jedoch experimentell ermittelt werden kann ist nicht eindeutig. Des Weiteren weicht die Bestromung des 1E-Prüfstandes auf Grund der Regelung der Bestromung, die in der Simulation verwendet wird, leicht ab. Offen ist auch welchen Einfluss die Temperaturabhängigkeit der Materialdaten des Elektroblechs besitzt. Nichtsdestotrotz zeigt Abbildung 38 eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Somit belegen sowohl Messung als auch Simulation, dass der topologisch optimierte Demonstrator mit fast 20% weniger Magnetmasse ähnliche Eigenschaften aufweist wie der Rotor der Referenzmaschine.

Für die thermische Haltbarkeit der E-Maschine werden die Temperaturen im Dauerbetrieb betrachtet. Die gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 39 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Temperaturen über der Drehzahl ansteigen und bei maximaler Drehzahl ihr Maximum erreichen. Die maximale Magnettemperatur liegt bei 130 °C. Die einzelnen Temperaturen unterscheiden sich, je nachdem, ob sich der Sensor axial gesehen in der Mitte oder außen befindet, siehe Abbildung 39. Durch die Wuchtscheiben und die Luftkonvektion sind die Temperaturen in der Mitte am höchsten. Der Unterschied zwischen den Temperaturen in den beiden äußeren Bereichen hängt mit der 1E-Prüfstandadaption zusammen.

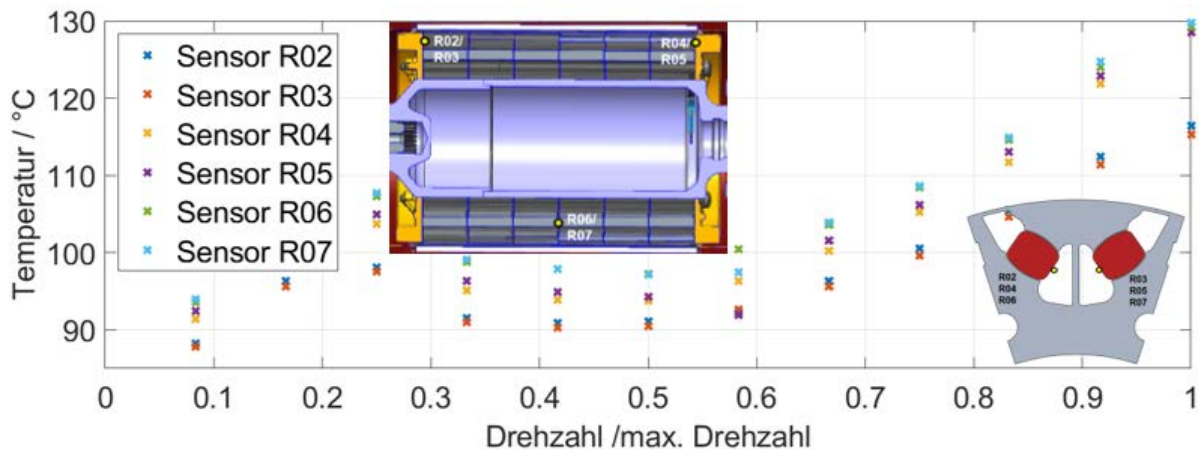


Abbildung 39: Gemessene Magnettemperatur im Dauerbetrieb

Zum Vergleich ist das Ergebnis der Temperatursimulation für den Dauerbetriebspunkt bei maximaler Drehzahl in Abbildung 40 dargestellt.

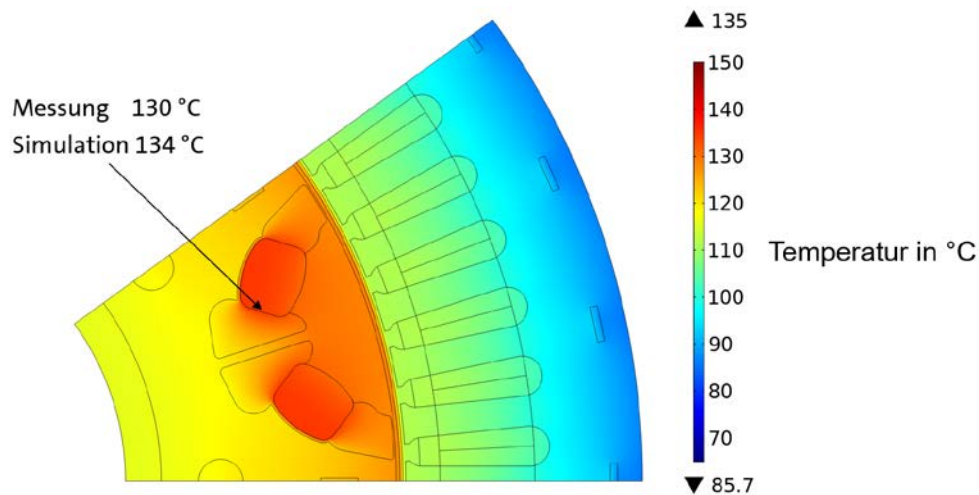


Abbildung 40: Simulierte Temperaturverteilung im Rotor und Stator des Demonstrators

Die Magnettemperatur liegt am Ort der Messstelle bei 134°C und ist damit um 4°C höher als die gemessene Magnettemperatur. Es liegt daher eine sehr gute Übereinstimmung vor.

Resümee des Vergleichs zwischen den Simulations- und Versuchsergebnissen

Der Vergleich zwischen den Simulations- und Versuchsergebnissen der elektromagnetischen und thermischen Eigenschaften des Demonstrators zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Unter Hinzunahme der Erkenntnisse aus dem experimentellen Vergleich zwischen der Referenzmaschine und dem Demonstrator kann geschlussfolgert werden, dass das im Teilvorhaben entwickelte Topologieoptimierungsverfahren und die Verfahren zur Bewertung der hier betrachteten Eigenschaften der E-Maschine auf einem sehr guten Stand sind und im Rahmen der hier geplanten Umfänge keine grundsätzlichen Anpassungen benötigen.

III.2.12. Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Innerhalb dieses Berichts werden die erzielten Ergebnisse des Teilvorhabens „Entwicklung einer Werkstoffdifferenzierungsmethode mit Erprobung“ dargestellt. Die Kernaspekte sind dabei die Entwicklung eines gekoppelten elektromagnetomechanischen Algorithmus zur Optimierung von Rotorblechschnitten, dessen Anwendung sowie die Erprobung und Bewertung der resultierenden optimierten Geometrie anhand eines Demonstrators.

Zu Beginn werden die Anforderungen einer E-Maschine und die Anforderungen an das Optimierungsverfahren definiert und erläutert. Die E-Maschine des bestehenden e-Golf-Antriebs wird als Referenzmaschine ausgewählt und mögliche Verbesserungspotentiale werden aufgezeigt. Diese sollen mittels einer optimierten Rotorblechschnittgeometrie erreicht werden, wobei die grundlegenden Eigenschaften der Referenzmaschine erhalten bleiben sollen. Das wesentliche Ziel der Optimierung ist die Reduzierung des Magnetmaterials.

Mittels einer Reihe von Methodenbeispielen wird ein gekoppelter Optimierungsalgorithmus für Rotorblechschnitte entwickelt. Dieser basiert auf der Idee sowohl elektrische als auch mechanische Eigenschaften von permanenten Synchronmaschinen gleichzeitig topologisch zu optimieren und so innovative Eisen-, Luft- und sogar Magnetstrukturen zu erhalten. Essentiell bei der Optimierung ist jedoch nicht nur die Kopplung der einzelnen physikalischen Felder, sondern auch die Berücksichtigung aller relevanten Anforderungen einer E-Maschine innerhalb des Algorithmus.

Durch den entwickelten Optimierungsalgorithmus und die Anwendung auf die Referenzmaschine entsteht eine neue Rotorblechschnittgeometrie, die durch ballige Magnete und große Kavitäten gekennzeichnet ist. Im ersten Schritt wird diese mittels der weiterentwickelten integrierten Werkzeugkette des Projektpartners FSG, siehe [3], simulativ bewertet. Betrachtet werden dabei mechanische, elektromagnetische, thermische sowie strukturdynamische Aspekte. Es zeigt sich, dass der optimierte Blechschnitt bei den grundlegenden Eigenschaften wie Drehmoment im Grundstellbereich, Drehmoment im Hochdrehzahlbereich, EMK, Entmagnetisierung der Magnete, Eisengewicht, Temperatur und Drehmomentwelligkeit ähnliche Eigenschaften aufweist wie der in der Referenzmaschine verwendete Blechschnitt. Allerdings kommt die topologisch optimierte Variante mit fast 20% weniger Magnetmaterial aus und ist somit deutlich ressourcensparender.

Auf Grund dieser bemerkenswerten Ergebnisse werden Demonstratoren mit der optimierten Blechschnittgeometrie hergestellt und umfangreich erprobt. Dazu werden die vom Projektpartner MSS hergestellten Magnete verwendet, siehe [29].

Der experimentelle Vergleich zwischen Referenzmaschine und Demonstrator bestätigt in allen relevanten Eigenschaften die simulativen Ergebnisse. Die durchgeführten Messungen ermöglichen zudem eine Parametrierung der integrierten Werkzeugkette. Laut simulativer und experimenteller Bewertung ist der entwickelte Topologieoptimierungsalgorithmus folglich in der Lage bei sonst gleichbleibenden Anforderungen die Magnetmasse deutlich zu reduzieren.

Alternativ zur derzeitigen Anwendung könnte der Algorithmus auch dazu genutzt werden die Leistung bei gleichbleibender Magnetmasse zu erhöhen. Auch die Einbindung weiterer physikalischer Felder, wie beispielsweise die Berücksichtigung der Wärmeleitungsgleichung, in den Optimierungsprozess ist denkbar.

II.2. Zahlenmäßiger Nachweis

Die im Teilvorhaben entstandenen Kosten und damit die Verwendung der Zuwendung teilen sich etwa wie in Abbildung 41 dargestellt auf.

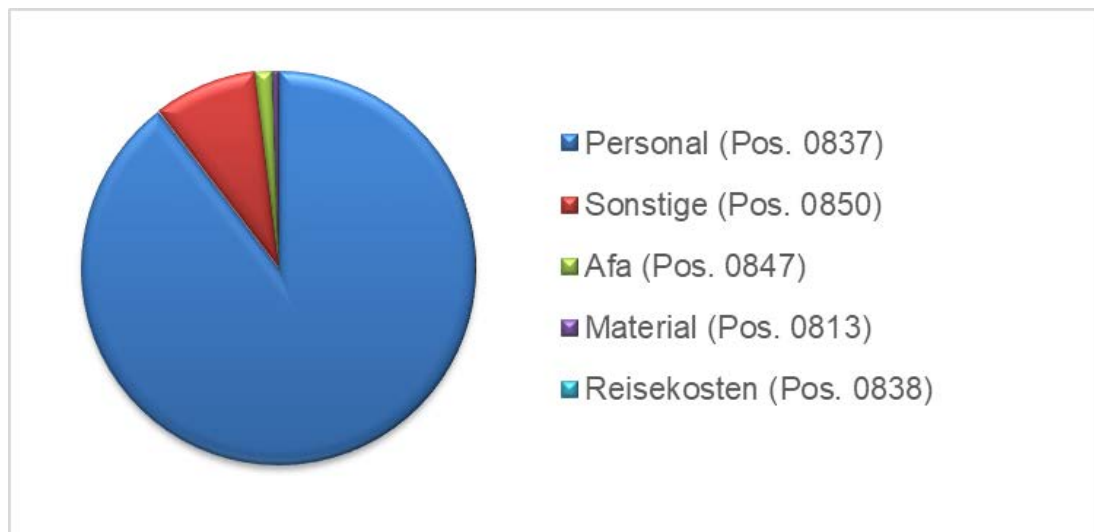


Abbildung 41: Aufteilung der Aufwendungen im Teilvorhaben

Der größte Anteil sind die Personalkosten und der zweitgrößte Anteil die Kosten für die verwendete Software zur multiphysikalischen Simulation und Optimierung (Abschreibung: Afa (Pos. 0847) und Lizenzgebühren: Sonstige (Pos. 0850)). Ein verhältnismäßig geringer Anteil fällt für Material- und Reisekosten an.

Dies ist darin begründet, dass der größte Aufwand in der Entwicklung und dem Einsatz des Optimierungsverfahren lag, was durch den eingesetzten Personalaufwand und die verwendete Software erreicht werden konnte. Auch die Definition der Anforderungen und Spezifikationen, die Zusammenarbeit an der integrierten Werkzeugkette, die Planung und Durchführung der Prüfstandversuche sind durch den Einsatz der Personalaufwendungen vollzogen worden.

II3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Elektromobilität bringt ein hohes finanzielles Risiko für die Automobilindustrie mit sich. Einerseits besteht ein großer Aufwand in der Entwicklung der im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen neuen Komponenten wie elektrischer Antrieb, Leistungselektronik und Batterie. Andererseits ist eine Unsicherheit vorhanden, ob der Kunde bereit ist, die Einschränkungen bei der Reichweite bei vermutlich höheren Fahrzeugkosten zu akzeptieren. Insbesondere bei Start des Projekts war die Sensibilisierung des Kunden für die erforderlichen Umweltschutzmaßnahmen noch nicht weit fortgeschritten. Außerdem ist die Optimierung eines E-Antriebs für künftige Batterie- und Hybrid-Elektrofahrzeuge noch nicht Kernkompetenz der Fahrzeug- und Aggregatehersteller, wie es bei der Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen der Fall ist. Sie erfolgt häufig im Verbund qualifizierter Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Die Förderung spezieller Entwicklungsmethoden sind daher gerechtfertigt und notwendig, da diese Methoden andernfalls nicht oder mit erheblicher Verzögerung angegangen werden würden.

Für die Volkswagen AG ergeben sich zusätzlich wirtschaftliche Risiken aus der Volatilität des Rohstoffmarktes und einem damit einhergehend stark schwankenden Magnetpreis. Wenngleich die Ressourcenschonung wie auch die Effizienzsteigerung erstrebenswerte Ziele sind, müsste ohne eine Förderung mit einer deutlich verzögerten Weiterentwicklung gerechnet werden.

Aus Sicht der deutschen Industrie ist anzustreben, sich hier weiter mit Hochdruck eine technologische Marktführerschaft zu sichern, um so mittelfristig Arbeitsplätze zu schaffen und langfristig eine wettbewerbsüberlegene Kompetenzträgerschaft bezüglich innovativer Antriebskomponenten zu sichern.

Außerdem führte die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in dem Verbundvorhaben, in dem jeder seine Spezialkenntnisse eingebracht hat, zu einer deutlichen Erhöhung der Projektreichweite, die ohne Förderung nicht erreicht worden wäre.

II.4. Verwertbarkeit nach Verwertungsplan

Die folgende Tabelle beschreibt die Verwertungsmöglichkeit der einzelnen Ergebnisse gemäß der Vorlage für die Verwertungstabelle.

Tabelle 7: Verwertungsplan

Lfd. Nr.	Ergebnis	Verwertungsmöglichkeit, -aktivität nach Art und Wirkung/Nutzen	Zeithorizont der Realisierung	Status
1	Repräsentative Maschinenleistungsdaten	Grundlage für zukünftige Gegenüberstellungen von E-Maschinen, Analysen und Statistiken.	Mitte 2017	erfüllt
2	Optimierungsverfahren zur Differenzierung von Werkstoffen	Basis für die topologische Optimierung elektrischer Antriebskomponenten (methodische Anwendbarkeit).	Ende 2018	erfüllt
3	Toolkette zur automatisierten und umfänglichen Bewertung von Rotorlayouts	Berechnung von elektrischen Antriebskomponenten bezüglich ihres elektromagnetischen, mechanischen, akustischen und thermischen Verhaltens. Kürzere Auslegungszeiten für alle Folgeprojekte. Reduzierung des Erprobungsaufwandes.	Ende 2019	erfüllt
4	Applikations-Know-How bezüglich geometrisch unregelmäßiger Magnete	Fertigungskompetenz für alle weiteren E-Maschinenentwicklungen	Ende 2019	erfüllt
5	Prototyp mit optimierter Magnet-Eisen-Luftanordnung	Validierung der Optimierungsmethode Verifizierung und Anpassungsmaßstab für die entwickelte Toolkette Versuchskompetenz zum Aufbau weiterer Akustikkompetenz	Mitte 2019	erfüllt
6	Serienentwicklungsmöglichkeit mit Kosteneinsparpotential bei verbesserter Effizienz und verringertem Magnetmaterialeinsatz	Kurze Auslegungszeiten Geringere Kosten Höhere Reichweite Für alle E-Maschinenkonzepte anwendbar	ab Ende 2019	erfüllt

II5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass sich die Topologieoptimierung im Bereich Elektromagnetik immer größerer Beliebtheit erfreut. In [30] wird die elektromagnetische Topologieoptimierung mithilfe einer On/Off Methode auf einen Synchronmotor angewendet. Die Drehmomentwelligkeit sowie die elektromagnetischen Verluste werden in [25] über eine Magnet-Eisen-Luft Topologieoptimierung bei einer permanenterregten Synchronmaschine verringert. Dabei werden sowohl der Rotor als auch die Zähne des Stators optimiert. Infolge der Topologieoptimierung entstehen nicht rechteckige Magnetformen. Die topologischen Ableitungen für ein Optimierungsproblem der Elektromagnetik werden in [1] hergeleitet und auf eine E-Maschine angewendet. Dabei wird das nichtlineare Eisenmaterial sowie die Luftbereiche in einem Rotor über ein „Level set“ Algorithmus optimiert. In [11] wird eine simultane Form- und Topologieoptimierung an einer permanenterregten Synchronmaschine durchgeführt. Dabei wird die Drehmomentwelligkeit optimiert, in dem optimale Eisen-Luft Strukturen ermittelt werden. Eine reine Formoptimierung mit Hilfe isogeometrischer Ansätze, angewendet auf eine E-Maschine, ist in [13] sowie [22] zu finden. Eine Mehrmaterial-Topologieoptimierung, bei der Magnete, Spulen und Eisenmaterial in einem magnetischen Aktuator optimiert werden, ist in [19] beschrieben. Dabei wird auch insbesondere die Magnetisierungsrichtung optimiert.

Allen Veröffentlichungen ist gemeinsam, dass innerhalb der Topologieoptimierung die Elektromagnetik berücksichtigt wird. Es wird jedoch keine gekoppelte elektromagnetomechanische Topologieoptimierung angewendet wie in dieser Arbeit.

II6. Ergebnisveröffentlichung

Die wesentlichen Inhalte dieses Teilvorhabens wurden/werden in folgenden Beiträgen veröffentlicht:

- Rothe, Steffen; Schröder, Bettina; Lührs, Georg. Volkswagen AG (2020). Coupled Topology Optimization of an Electric Drive. International VDI Congress – Edrive.
- Schröder, Bettina; Rothe, Steffen. (2019). Virtual Engineering at Volkswagen Kassel. 8th GACM Colloquium on Computational Mechanics, Plenary Lecture, Kassel, 28.08.2019.

Literaturverzeichnis

- [1] Amstutz, Samuel; Gangl, Peter (2019): Topological derivative for the nonlinear magnetostatic problem. In: ETNA 51, S. 169–218. DOI: 10.1553/etna_vol51s169.
- [2] Bendsøe, Martin P.; Sigmund, O. (2004): Topology optimization. Theory, methods, and applications. 2. ed., corr. print. Berlin u.a.: Springer (Engineering online library).
- [3] Bethke, F., Dedeleit, F., Drüner, L., Ayeb, M., Brabetz, L., Fachgebiet Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik (FSG), Universität Kassel (2020): Schlussbericht, Verbundvorhaben TOPMAGNET, Teilvorhaben Integrierte Werkzeugkette.
- [4] Choi, Jae Seok; Yoo, Jeonghoon (2010): Optimal design method for magnetization directions of a permanent magnet array. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (15), S. 2145–2151. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.01.047.
- [5] Choi, Jae Seok; Yoo, Jeonghoon (2008): Structural optimization of ferromagnetic materials based on the magnetic reluctivity for magnetic field problems. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 197 (49-50), S. 4193–4206. DOI: 10.1016/j.cma.2008.04.019.
- [6] Choi, Jae Seok; Yoo, Jeonghoon (2009): Simultaneous structural topology optimization of electromagnetic sources and ferromagnetic materials. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198 (27-29), S. 2111–2121. DOI: 10.1016/j.cma.2009.02.015.
- [7] Deaton, Joshua D.; Grandhi, Ramana V. (2014): A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization. Post 2000. In: *Struct Multidisc Optim* 49 (1), S. 1–38. DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z.
- [8] Dede, Ercan M.; Lee, Jaewook; Nomura, Tsuyoshi (2014): Multiphysics Simulation. London: Springer London.
- [9] Degano, Michele; Carraro, Enrico; Bianchi, Nicola (2015): Selection Criteria and Robust Optimization of a Traction PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor. In: *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 51 (6), S. 4383–4391. DOI: 10.1109/TIA.2015.2443091.
- [10] Duan, Yao; Ionel, Dan M. (2011): A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent magnet synchronous motor benchmark study. 17-22.09.2011, Hyatt Regency Phoenix & Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona. Piscataway, NJ: IEEE.
- [11] Erin Kuci; François Henrotte; Pierre Duysinx; Christophe Geuzaine: Combination of topology optimization and Lie derivative-based shape optimization for electro-mechanical design.
- [12] Eschenauer, Hans A.; Olhoff, Niels (2001): Topology optimization of continuum structures. A review. In: *Appl. Mech. Rev.* 54 (4), S. 331. DOI: 10.1115/1.1388075.
- [13] Gangl, Peter; Langer, Ulrich; Mantzaflaris, Angelos; Schneckenleitner, Rainer (2018): Isogeometric Simulation and Shape Optimization with Applications to Electrical Machines. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1809.03377v1>.
- [14] Hermanns, Marie (2019): Topologieoptimierung rotierender Scheiben unter Einschränkung der mechanischen Spannungen. Masterarbeit im Fachbereich Maschinenbau, Institut für Mechanik, Fachgebiet Technische Dynamik.
- [15] Huang, Jinhua; Fadel, Georges M. (2000): Heterogeneous flywheel modeling and optimization. In: *Materials & Design* 21 (2), S. 111–125. DOI: 10.1016/S0261-3069(99)00056-4.

- [16] ICEMS. Proceedings: The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems: October 21-24, 2012: Hokkaido Citizens Actives Center, Sapporo, Japan (2012). 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sapporo. [Piscataway, NJ]: [IEEE].
- [17] Ishikawa, Takeo; Xie, Peijie; Kurita, Nobuyuki (2015): Topology Optimization of Rotor Structure in Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Ease of Manufacturing. In: IEEJ Journal IA 4 (4), S. 469–475. DOI: 10.1541/ieejia.4.469.
- [18] Jurkovic, Sinisa; Rahman, Khwaja M.; Savagian, Peter J.: Design, optimization and development of electric machine for traction application in GM battery electric vehicle, S. 1814–1819. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409310.
- [19] Lee, Jaejoon; Lee, Seung-Wook; Kim, Kyungmok; Lee, Jaewook (2018): Multi-Material Topology Optimization of Magnetic Actuator With Segmented Permanent Magnets. In: IEEE Trans. Magn. 54 (7), S. 1–6. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2824287.
- [20] Lee, Junghoon; Yoo, Jeonghoon (2010): Topology optimization of the permanent magnet type MRI considering the magnetic field homogeneity. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (9-12), S. 1651–1654. DOI: 10.1016/j.jmmm.2009.04.078.
- [21] Liu, Pai; Luo, Yangjun; Kang, Zhan (2016): Multi-material topology optimization considering interface behavior via XFEM and level set method. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 308, S. 113–133. DOI: 10.1016/j.cma.2016.05.016.
- [22] Merkel, Melina; Gangl, Peter; Schöps, Sebastian (2019): Shape Optimization of Rotating Electric Machines using Isogeometric Analysis and Harmonic Stator-Rotor Coupling. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1908.06009v2>.
- [23] Park, Sang-in; Min, Seungjae (2010): Design of Magnetic Actuator With Nonlinear Ferromagnetic Materials Using Level-Set Based Topology Optimization. In: *IEEE Trans. Magn.* 46 (2), S. 618–621. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2033336.
- [24] Petrossow, Felix (2019): Topologieoptimierung elektrischer Antriebe hinsichtlich Wirbelstromverluste. Bachelorarbeit im Fachbereich Maschinenbau, Institut für Mechanik, Fachgebiet Technische Dynamik.
- [25] Putek, Piotr A.; Maten, E. Jan W. ter; Günther, M.; Sykulski, Jan K.: Variance based Robust Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Trans. Magn.* 54 (2017) 3, S. 1–4
- [26] Ramani, Anand (2011): Multi-material topology optimization with strength constraints. In: *Struct Multidisc Optim* 43 (5), S. 597–615. DOI: 10.1007/s00158-010-0581-z.
- [27] Rozvany, G.I.N. (2001): Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. In: *Struct Multidisc Optim* 21 (2), S. 90–108. DOI: 10.1007/s001580050174.
- [28] Sato, Takahiro; Watanabe, Kota; Igarashi, Hajime (2015): Multimaterial Topology Optimization of Electric Machines Based on Normalized Gaussian Network. In: *IEEE Trans. Magn.* 51 (3), S. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2359972.
- [29] Seidel, J., Schwegler, D., MS-Schramberg GmbH & Co. KG (2020): Schlussbericht, Verbundvorhaben TOPMAGNET, Teilvorhaben Magnetfertigungsverfahren.
- [30] Watanabe, Kota; Suga, Takao; Kitabatake, Shinya: Topology Optimization Based on the ON/OFF Method for Synchronous Motor. *IEEE Trans. Magn.* 54 (2018) 3, S. 1–4.
- [31] Zuo, Wenjie; Saitou, Kazuhiro (2016): Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation. In: *Struct Multidisc Optim.* DOI: 10.1007/s00158-016-1513-3.