

BMWi-Verbundprojekt: VerfaS

Verfahrensoptimierung zur Steigerung der Energieeffizienz von Elektroantrieben

Individueller Abschlussbericht Teilvorhaben Volkswagen AG

vom 1.01.2013 bis 31.12.2015

Förderkennzeichen: 01MY12004A

Autoren:

Dipl.-Ing. Hauke Einfeld
M.Eng. Helge Saß
Dr.-Ing. Gerd Stöhr

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung des Projektes.....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen der Durchführung.....	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4 Wissenschaftlich, technischer Stand an den angeknüpft wurde.....	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Projektergebnisse	7
2.1 Einleitung.....	7
2.1.1 Ausgangssituation	7
2.1.2 Definitionen.....	8
2.1.3 Anforderungen.....	9
2.1.4 Zielstellungen	13
2.2 Qualitative Vorstudie mit modifizierter FMEA	14
2.3 Modellierung von Messabweichungen.....	16
2.3.1 Messunsicherheitsmodellierung	16
2.3.2 Modellierung der Lagerreibung als systematische Abweichung	33
2.4 Simulative Untersuchungen der elektrischen Traktionsmaschine.....	37
2.4.1 Modellierung und Reduzierung von Maschinenverlusten	38
2.4.2 Thermische Modellierung	43
2.4.3 Festigkeitsberechnung	45
2.5 Aufbau und Inbetriebnahme eines Demonstrators	47
2.6 Experimentelle Untersuchung	48
2.6.1 Verfahren zur modellbasierten Bestimmung von Messabweichungen	49
2.6.2 Validierung der thermischen Modelle	49
2.6.3 Verlustmessungen.....	51
2.7 Evaluierung der Verfahren	57
2.7.1 Verbesserung der Messunsicherheit.....	57
2.7.2 Maschinenoptimierung	58
2.8 Zusammenfassung	60
3. Zahlenmäßiger Nachweis	61
4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	61
5. Verwertbarkeit nach Verwertungsplan.....	63
6. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens.....	63
7. Ergebnisveröffentlichung.....	64
Literaturverzeichnis	65

1. Kurzdarstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung

Als übergeordnetes Ziel des Gesamtvorhabens wird ein wirkungsgradoptimierter Betrieb der E-Maschine als Kraftfahrzeugantrieb angestrebt. Dieses soll durch

- eine optimal ausgelegte Maschine und
- ein optimiertes Regelverfahren

erreicht werden.

Dieses Ziel wird zudem hochgenau und mit geringerem Entwicklungs- und Messaufwand als bislang üblich erreicht werden.

Ziele des Teilvorhabens sind:

- eine in einzelnen zu definierenden Betriebspunkten optimal ausgelegte elektrische Antriebsmaschine,
- eine in einem zu definierenden Messbereich (Zyklus) optimal ausgelegtes elektrisches Antriebssystem,
- verbunden mit zeit- und kostensparender Messtechnik mit einer bislang nicht erreichbaren Genauigkeit,
- durch effiziente Messungen in Verbindung mit schneller und aussagekräftiger Simulation in einer gemessen am Wettbewerb geringeren Zahl an Entwicklungszyklen

zu generieren.

Trotz aufwendiger Messtechnik und zunehmend detaillierterer Modellierung werden diese Anforderungen aktuell noch nicht erfüllt.

Mit Hilfe der in den anderen Teilvorhaben beschriebenen schnellen, robusten und hochgenauen Entwicklungsumgebung werden in einem iterativen Prozess Messungen an entsprechend ertüchtigten Prüfständen durchgeführt, deren Interpretation die Ziele erreichen lassen.

1.2 Voraussetzungen der Durchführung

Mit 12 unabhängigen Marken, 94 Produktionseinrichtungen in 22 Ländern und einer diversifizierten Produktpalette ist der Volkswagen Konzern einer der größten weltweit aktiven Automobilhersteller. Im Jahr 2011 wurde mit rund 8,3 Millionen verkauften Kraftfahrzeugen, fast 502.000 Angestellten und einem jährlichen Konzernumsatz von ca. 159,3 Milliarden Euro ein weltweiter Marktanteil von 12,3 % erzielt. Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung mit

rund 35500 markenübergreifend beschäftigten Mitarbeitern lagen bei ungefähr 7,23 Milliarden Euro. 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 Volkswagen seit 1970 in die Forschung, Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen mit elektrischen und hybriden Antriebssystemen involviert.

Am Standort Kassel beschäftigt sich derzeit eine Entwicklungs- und Planungsgruppe mit der Konzeption von Elektrofahrzeugen und deren Funktionskomponenten. Dazu zählt in erster Linie die Entwicklung eines neuartigen Elektroantriebes, ausgeführt als permanent erregte Synchronmaschine. Der Herstellungsprozess des E-Motors umfasst verschiedene Vorfertigungs- und Vormontageschritte der Einzelkomponenten, bevor in einer Endmontage die Komplettierung erfolgt. Die wesentlichen Hauptprozesse in der E-Motorenherstellung sind dabei das Stanzen von Stator- und Rotorblechen, Rotormontage, Statorwickeln, Prüfprozesse sowie die Gesamtmontage.

Das Projekt PräDEM wurde durch Mitarbeiter der Entwicklungs- und Planungsgruppe am Standort Kassel der Volkswagen AG bereits erfolgreich durchgeführt. Die entsprechenden Teams stehen nun auch für das Projekt VerfaS wieder zur Verfügung. Neben der Durchführung der Forschungsprojekte sind die Mitarbeiter auch in die laufenden Entwicklungen für aktuelle Antriebe involviert und leisten Knowhow-Transfer sowohl aus den Entwicklungsprojekten in das Forschungsprojekt als auch aus den Forschungsprojekten in die aktuellen Entwicklungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planungen und die zeitliche Einordnung der Arbeitspakete und -inhalte schildert Abbildung 1.

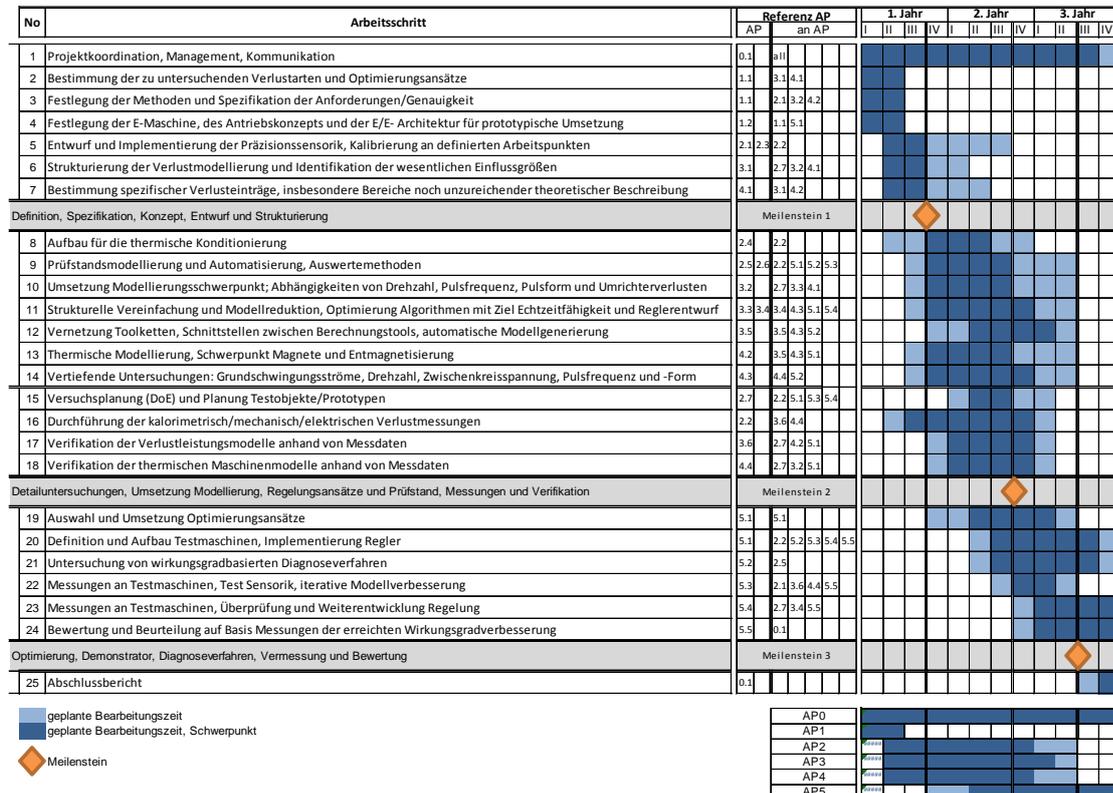


Abbildung 1: Zeitlicher Ablaufplan des Projektes

1.4 Wissenschaftlich, technischer Stand an den angeknüpft wurde

Wirkungsgradmessungen an sich sind Stand der Technik.

Die Optimierung des Wirkungsgradkennfeldes erfolgt heute im Wesentlichen iterativ, d.h. durch die experimentelle und simulatorische Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen. Diese variieren über zahlreiche konstruktive und elektrische Maschinenauslegungen, Verwendung alternativer Materialien, diverse Regelungsstrategien oder unterschiedliche Einsatzprofile.

Mit zunehmender Verbesserung der Maschinen, d. h. mit immer geringeren Maschinenverlusten in Vergleich zur Leistung der Maschine steigen die Anforderungen an die Messtechnik.

Noch Stand der Entwicklung bei namhaften Elektromotorenherstellern ist z. B. eine Effizienzmessung der Maschine aus der Bewertung der im Kühlwasser abgegebenen Verlustwärme im Verhältnis zur abgegebenen mechanischen Leistung. Grund für diese nur im thermischen Beharrungszustand anwendbare Messmethode ist in der relativ einfach zu messenden mechanischen Leistung, der relativ einfach zu messenden Kühlwassermenge und deren Differenztemperatur zwischen Kühlwassereintritt- und -austritt und der bei stark vom Sinusverlauf abweichenden Spannungen und Ströme nur ungenau messbaren elektrischen Leistung. Für genauere Analysen ist diese Methode nicht brauchbar.

Ebenfalls noch Stand der Messtechnik ist die Messung der mechanischen Leistung mittels einer Pendelmaschine. Der Belastungsmotor des Motorenprüfstands ist hier in einer reibungsoptimierten Wälzlagerung aufgehängt und dessen Belastungsmoment wird mit einem Hebel definierter Länge und einer optimierten Kraftmessdose ermittelt. Vor jedem Versuch durchgeführte Kalibrierung der Kraftmessdose erhöht die Genauigkeit entscheidend indem z. B. der Temperaturgang der Messdose oder eine Offsetveränderungen der elektrischen Messtechnik ausgeschaltet werden. Die elektrisch zugeführte Leistung wird aus den gefilterten Signalen aus Spannung und Strom mit genügend hoher Digitalisierungsfrequenz errechnet und zu der mechanischen Leistung in Beziehung gesetzt. Diese Methode eignet sich nur für sehr niederfrequente Momenten- bzw. Leistungsanalysen und ist wegen des immer wiederkehrenden Kalibrieraufwands sehr zeitraubend.

Deshalb werden zunehmend Drehmomentenmessnaben in die Verbindungswelle zwischen Antrieb des Prüflings und der Belastungsmaschine eingebaut, die, einmal kalibriert oder geeicht, zur Bestimmung der mechanischen Leistung verwendet werden. Diese Messungen besitzen den Vorteil der sehr hohen Flexibilität und auch die Möglichkeit zu höherfrequenten Momenten- bzw. Leistungsanalyse. Als elektrische Messwandler sind DMS- oder piezoresistive Messwertgeber eingeführt. Trotz aller Verfeinerungen an den Messwertgebern gibt es vielfältige Fehlermöglichkeiten, die das Ergebnis verfälschen können, wie z. B.:

- Nicht exakt fluchtende Verbindung zwischen Prüfling und Belastungsmaschine am Prüfstand
- Einfluss elektrischer und elektromagnetischer Felder auf den Sensor, die Messleitung und die Messverstärker
- ungünstiger Signalrauschabstand besonders bei kleinen Momenten bzw. Leistungen
- Einfluss eines nicht kompensierten Temperaturgangs der Messkette

Überlagert sind auch hier die oben genannten Fehlermöglichkeiten der elektrischen Leistungsmessung.

Eine sinnvolle Kombination der oben genannten Messmethoden – mechanische, elektrische und thermische Ansätze – ist bislang nicht bekannt und wird im Rahmen dieses Vorhabens konsequent entwickelt.

Volkswagen Kassel arbeitet bereits im ständigen iterativen Prozess an der Verbesserung der eigenentwickelten elektrischen Maschine als PKW-Antrieb.

Simulationsrechnungen zur Funktion im gesamten Leistungsspektrum, Erfüllung der Lastenheftanforderungen und Vorausberechnung der Verluste werden dabei genauso wie umfangreiche Prüfstandsversuche durchgeführt.

Grenzen der Aussagefähigkeit des erreichten Ergebnisses werden z. B. sichtbar, wenn die Effizienz auf anderen als den zur Optimierung verwendeten Entwicklungsprüfständen verifiziert werden sollen.

Im abgeschlossenen Vorhaben PRÄDEM ist eine umfangreiche simulatorische Beschreibung des Antriebs und der Verlustmechanismen erarbeitet worden, auf der das Vorhaben VerfaS direkt aufbaut. Ohne das Projekt PRÄDEM könnte das Vorhaben noch nicht in der geplanten Tiefe erarbeitet werden.

Ausgewählte Veröffentlichungen des Antragstellers zum Thema des Vorhabens

- Vortrag Volkswagen/Uni KS zum Projekt PRÄDEM auf Hybridsymposium Braunschweig (2011/12)
- Schutzrechtsanmeldungen zur Regelungen einer elektrischen Maschine (offengelegt 2012, DE 10 2011 011 804 A1)

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Zusammenarbeit im Konsortium wurden Schnittstellen nach Abbildung 2 für die Bearbeitung der Arbeitspakete definiert. Neben der Zusammenarbeit in den Arbeitspaketen wurden regelmäßige Projekttrunden zwischen den Projektpartnern durchgeführt, um eventuelle Problemstellungen frühzeitig entgegenzutreten.

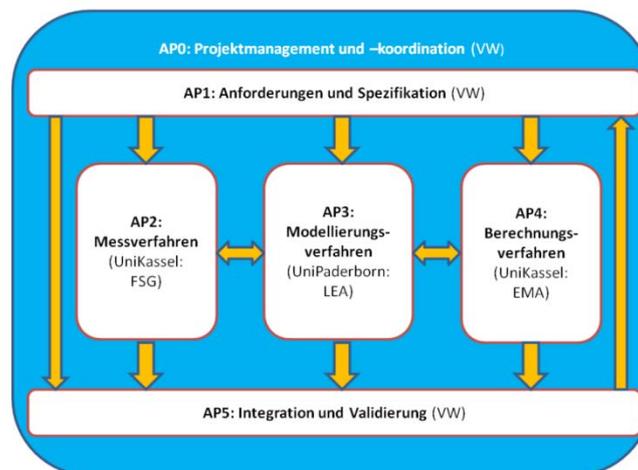


Abbildung 2: Arbeitspakete und Schnittstellen im Konsortium

2 Projektergebnisse

Das Verbundprojekt VerfaS stellt in diesem Dokument die Projektergebnisse des Teilvorhabens der Volkswagen AG vor und gliedert sich in acht Kapitel. Mit einem einleitenden Kapitel werden in den darauffolgenden Kapiteln besonders die Themen der Modellierungsoptimierung der E-Maschine sowie die Wirkungsgradmessung hervorgehoben. Die Untersuchungen führen von qualitativen Methoden über Simulationen bis hin zu empirischen Studien.

2.1 Einleitung

In der Einleitung erfolgen einerseits die Motivation bzw. Ausgangssituation zu Beginn des Projektes sowie andererseits die Definitionen des betrachteten Prüf- und Antriebssystems bevor auf die Anforderungen und Zielstellungen der Arbeit eingegangen wird.

2.1.1 Ausgangssituation

Die Verbreitung von Elektromobilität ist ein anerkanntes Mittel zum schonenden Umgang mit den noch vorhandenen fossilen Ressourcen.

Elektromobilität ist aufgrund des höheren Aufwands für die Fertigung und der systembedingten Nachteile, besonders hinsichtlich Reichweite, wahrscheinlich nur schwierig mit genügender Durchdringung am Markt unterzubringen. Aber nur ein nennenswerter Anteil von Elektromobilität am gesamten Fahrzeugbestand wird die vorgegebenen Ziele hinsichtlich CO₂ – Reduktion erfüllen helfen.

Energieeffizienz und die damit unmittelbar zusammenhängende Fahrzeugreichweite sind wichtige wettbewerbsrelevante Merkmale und damit essentiell für die CO₂ – Zielerreichung einerseits und andererseits auch für die Marktposition der deutschen Automobilindustrie.

Die Optimierung des Wirkungsgradkennfeldes erfolgt heute im Wesentlichen iterativ, d.h. durch die experimentelle und simulatorische Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen. Diese variieren über zahlreiche konstruktive und elektrische Maschinenauslegungen, Verwendung alternativer Materialien, diverse Regelungsstrategien oder unterschiedliche Einsatzprofile.

Mit zunehmender Verbesserung der Maschinen, d. h. mit immer geringeren Maschinenverlusten in Vergleich zur Leistung der Maschine steigen die Anforderungen an die Messgenauigkeit.

Die Zuverlässigkeit elektrischer Antriebe stellt den Fahrzeughersteller und den verantwortlichen Entwickler vor neue Herausforderungen, da die im Allgemeinen von stationären Anwendungen her bekannten elektrischen Komponenten in einer für diese bislang ungewohnten rauen Umgebung und außerdem im Regelfall von nicht fachmännischen oder einschlägig geschulten Personen benutzt werden. Die Verbesserung dieser Situation war wesentlicher Inhalt des geförderten Projekts PrÄDEM [1], auf dessen Ergebnissen das vorliegende Dokument aufbaut.

2.1.2 Definitionen

Das betrachtete Antriebskonzept ist im Projekt VerfaS ein Elektrofahrzeugantrieb (BEV – Battery Electric Vehicle). Wichtige Gründe für diese Entscheidung waren die Tatsachen, dass zum ersten bei diesen Antriebssystemen als Verluste vermehrt Eisenverluste im Vordergrund stehen, aufgrund der in der Maschine auftretenden Frequenzen, was für die Effizienz des zu entwickelnden Regelungsalgorithmus von Vorteil ist. Zum zweiten können aktuelle Serienprodukte optimiert werden.

Bei der im ausgewählten Antriebskonzept zum Einsatz kommenden elektrische Maschine handelt es sich um eine permanentmagneterregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten (IPMSM). Grund hierfür ist die hohe Leistungsdichte dieses Maschinentyps verbunden mit einem relativ großen Feldschwächbereich über den die abgegebene Leistung der Maschine nahezu konstant gehalten werden kann.

Die gewählte E/E-Architektur des Antriebs ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Antriebsstrang besteht aus der zuvor ausgewählten Antriebsmaschine, einer Batterie zur Bereitstellung der benötigten elektrischen Leistung und Energie sowie einem Wechselrichter zur Umwandlung der Gleichgrößen der Batterie in Wechselgrößen für die IPMSM. Auf dem Wechselrichter sind die Regelalgorithmen sowie Pulsmuster zur Ansteuerung der Maschine implementiert.

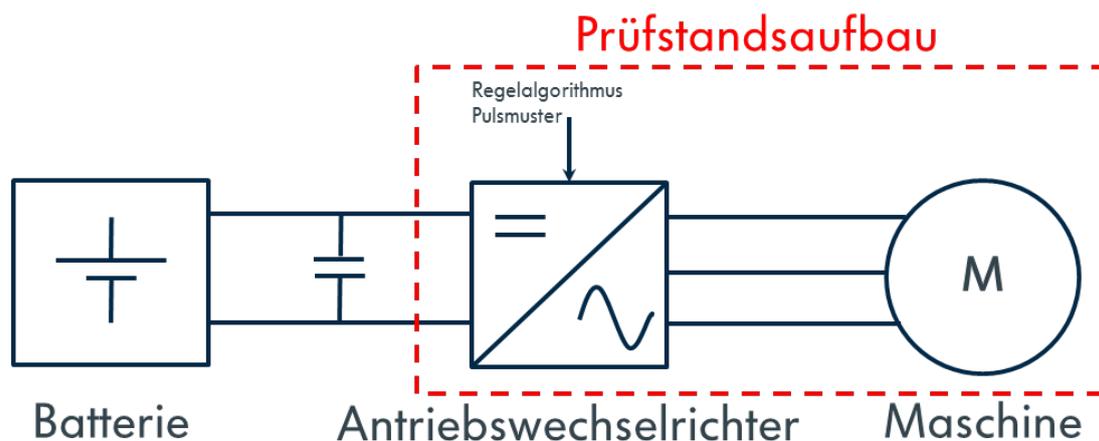


Abbildung 3: Blockdarstellung der E/E-Architektur des Antriebs

Für Untersuchungen auf dem Prüfstand wird nicht der gesamte Antriebsstrang wie dargestellt in Hardware nachgebildet. Lediglich Umrichter und Maschine werden auf dem Prüfstand real aufgebaut. Die Batterie des Antriebsstrangs wird durch eine DC-Quelle zur Speisung des Umrichters ersetzt. Für weiterführende Berechnungen, z.B. zur Reichweite, kann die Batterie simulatorisch nachgebildet werden. Für Berechnungen der Reichweite ist die Definition von anzunehmenden Lastzyklen unerlässlich, um vergleichende Aussagen z.B. unterschiedlicher Regelungsstrategien machen zu können.

Als Lastzyklen wird zum einen der derzeit häufig verwendete NEFZ [2] verwendet, was die Möglichkeit bietet sich mit anderen nach NEFZ geprüften Antrieben vergleichen zu können („Verbrauchsermittlung“). Neben dem NEFZ, der kein besonderes Augenmerk auf die besonderen Gegebenheiten eines Elektrofahrzeugs legt (geringere Reichweite, vermehrter

Stadtanteil, etc.) kommt zusätzlich der TÜV Süd E-Car-Cycle (TSECC) [3] zum Einsatz, der eine bessere Abstimmung auf Elektrofahrzeuge aufweist.

2.1.3 Anforderungen

Die Betriebspunkte eines elektrischen Fahrzeuges liegen nach dem NEFZ Fahrzyklus und auch nach dem TÜV-Süd E-Car-Cycle (TSECC) [4] besonders im kleinen Drehzahl- und Drehmomentbereich. Hierzu wurden die vorhandenen Geschwindigkeits-Zeit Diagramme auf die bei reinen Elektrofahrzeugen verwendeten Drehmoment-Drehzahl Diagramme übertragen. Grundlage der Berechnung waren dabei die Fahrzeugdaten eines aktuell in der Entwicklung befindlichen Elektrofahrzeugs. Die Berechnungen sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 als normierte Darstellung im Drehmoment- und Drehzahlbereich visualisiert.

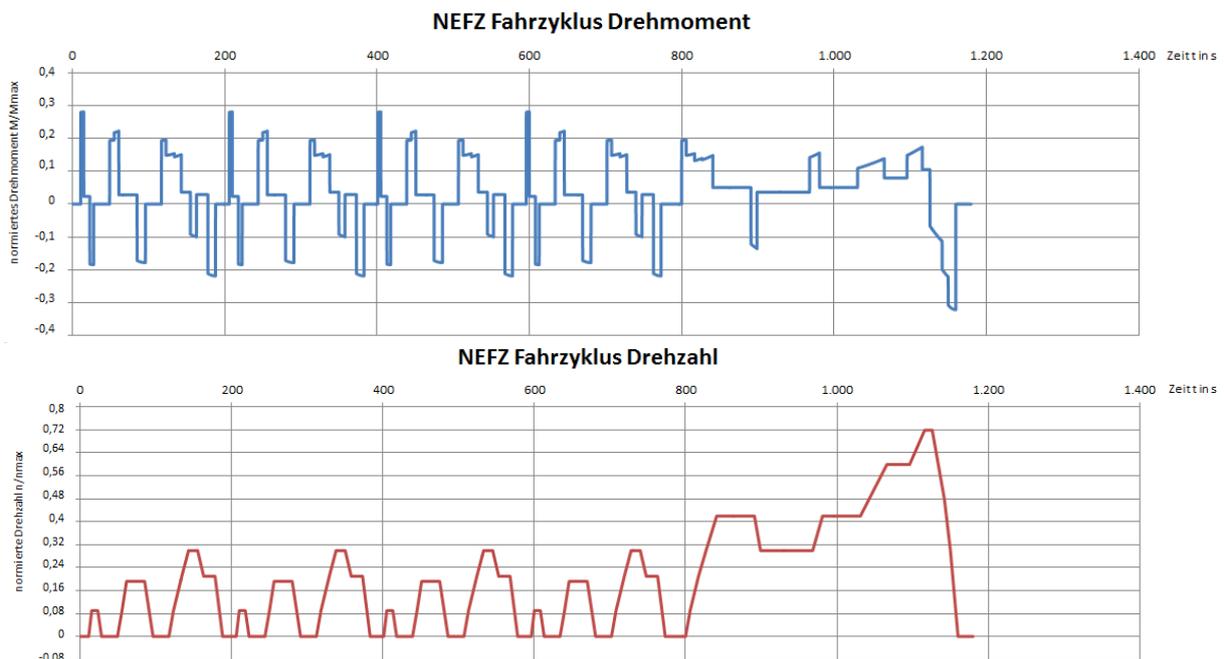


Abbildung 4: Drehzahl-Drehmoment-Zeit Profil (NEFZ)

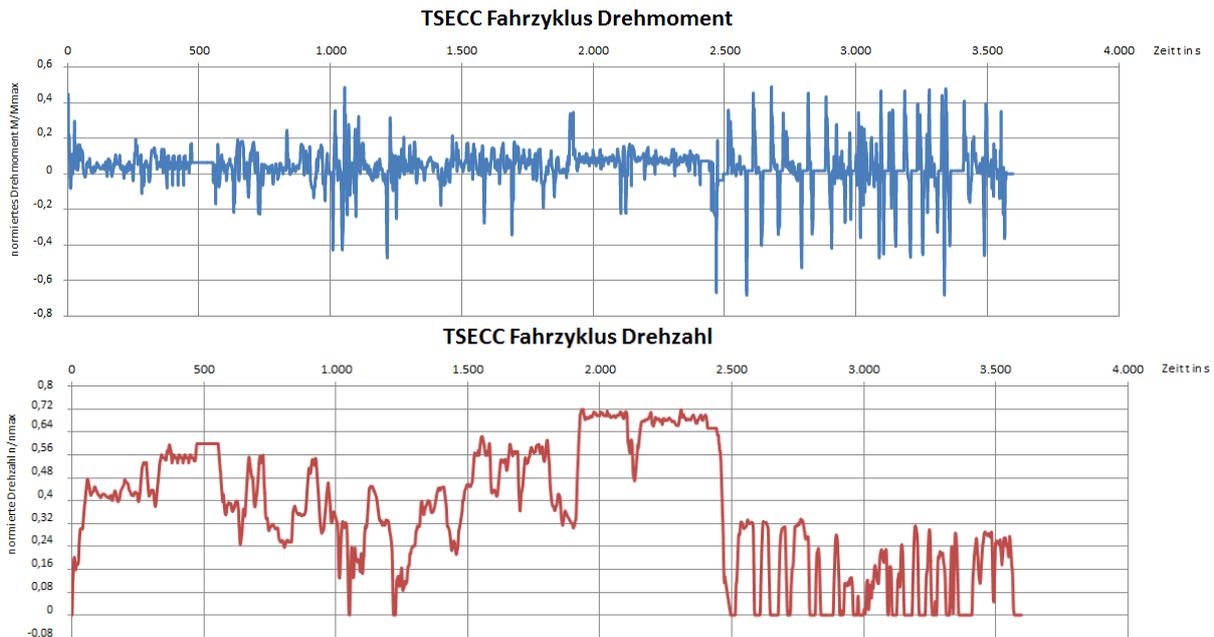


Abbildung 5: Drehzahl-Drehmoment-Zeit Profil (TSECC)

Für die Wirkungsgradmessung speziell in diesem Bereich werden nach dem Stand der Technik Wirkungsgradfehler von bis zu 15 % erreicht Diese Betrachtung gilt lediglich für die Messunsicherheiten der verwendeten Messketten (siehe Abbildung 6). Für die Auslegung von elektrischen Maschinen sowie für Verbrauchsermittlungen ist dieser Wirkungsgradfehler aus den oben genannten Gründen zu hoch.

Dass insbesondere in diesem Bereich geringer Leistungsbedarf besteht ist somit leicht ersichtlich. Um geringe Wirkungsgradänderungen durch die Optimierung des Maschinendesigns oder durch die Optimierung des Regelungsalgorithmus nachweisen zu können, sollte der Wirkungsgradfehler möglichst kleiner als die potentielle Wirkungsgradsteigerung sein sollte.

Wirkungsgradmesskette			
Elektrische Leistungsmessung		Mechanische Leistungsmessung	
Spannung AC	Strom AC	Drehmoment	Drehzahl
Direkte Messung	Stromwandler	Messflansch	Drehzahlgeber
Leistungsanalysator	Leistungsanalysator	Leistungsanalysator	Leistungsanalysator

Abbildung 6: Betrachtete Messkette nach dem Stand der Technik

Für die Festlegung der Genauigkeit der Berechnungsverfahren ist es zunächst notwendig zu verstehen, welche Einflussfaktoren bei der FEM-Berechnung existieren.

Die Berechnungsgenauigkeit der Verluste in elektrischen Maschinen ist abhängig von den Einstellungen im Berechnungsprogramm. Dieses rechnet, wenn keine Fehler in der Programmierung der Software vorliegen, wovon nicht auszugehen ist, für die gewählten Einstellungen genau. Mögliche Einflussfaktoren sind:

- Einstellungen des Meshs (Dichte, Übereinstimmung mit dem zu meshenden Modell)
- Simulationsschrittweite
- Definition der Materialien

Zur Bestimmung der Einflüsse durch unterschiedliche Programmeinstellungen wurde der Einfluss der Meshdichte und damit die Anzahl der zu berechnenden Elemente sowie unter sowie der Einfluss der Simulationsschrittweite bestimmt. Abbildung 7 zeigt die prozentuale Abweichung der Eisenverluste unter den genannten geänderten Randbedingungen. Es ist zu erkennen, dass man sich bei der Berechnung mit zunehmender Elementzahl und abnehmender Schrittweite auf einen Grenzwert zubewegt. Um ein relativ genaues Ergebnis in Abhängigkeit der beiden Parameter zu erzielen, erscheint es ausreichend eine Abweichung von etwa 1 % zuzulassen. Dies erreicht man mit Meshdichten von 1 bis 3mm (grün, rot, blau) bei Schrittweiten von etwa 3 bis 6 μs für die spezifizierte Referenzmaschine bei Maximaldrehzahl.

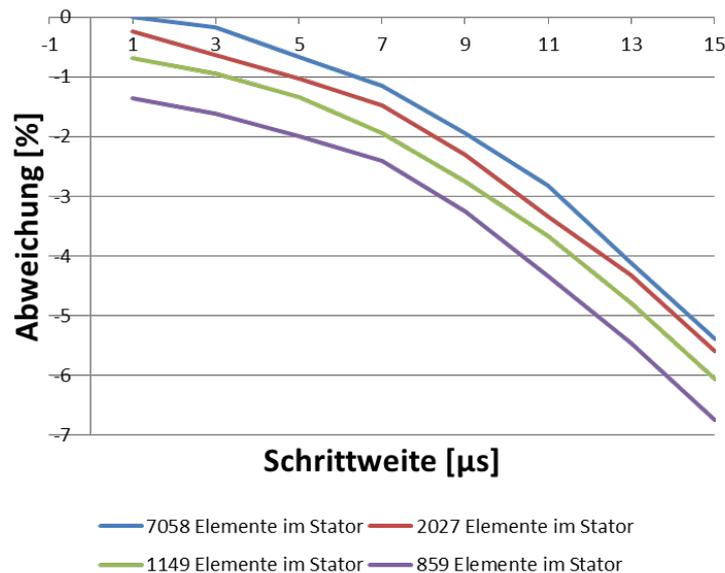


Abbildung 7: Prozentuale Abweichung der gerechneten Eisenverluste auf den Bestwert

Eine Abweichung von einem Prozent bedeutet dabei, dass bei einer abgegebenen Leistung von 50 kW und einem dabei auftretendem Eisenverlust von etwa 2 kW einen zusätzlichen Verlust von 20 W durch die Rechengenauigkeit in Kauf genommen wird. Unterstellt man einen Kupferverlust von zusätzlichen 1 kW bedeutet die Erhöhung der Eisenverluste einen Verringerung des Wirkungsgrads unter 0,1 %. Damit geht der Einfluss der Berechnung in der Abweichung durch die Messgenauigkeit unter.

Ähnlich gilt dies für den Bereich geringerer Leistungen und Drehzahlen, da hier die Kupferverluste vorherrschend sind. Diese können im Gegensatz zu den Eisenverlusten wesentlich genauer gemessen und bestimmt werden, weswegen auch hier der Einfluss des Berechnungsverfahrens gering ist.

Die Definition der Materialien (insbesondere der Verlustkennlinien des Blechs) hat Einfluss auf die Berechnungsgenauigkeit, da durch ihre Auswahl die Koeffizienten der Berechnungsformel für die Eisenverluste bestimmt werden. Sind dabei falsche Frequenzen bei der Bestimmung der Eisenverluste zugrunde gelegt, entstehen Abweichungen im Berechnungsergebnis.

Modellierungsfehler sind Fehler, die durch eine Abweichung des zur Berechnung verwendeten Maschinenmodells mit dem realen Prüfling auf dem Prüfstand zu Stande kommen. Diese

Modellierungsfehler können zum einen durch Vereinfachungen in der Modellierung entstehen. Beispiele hierfür sind:

- Vernachlässigung mechanischer Gegebenheiten (z.B. Radien, Kantenbrüche, etc.)
- Vereinfachungen durch 2-dimensionale Berechnung, ohne Berücksichtigung von 3-dimensionalen Effekten (Vorgänge in den Wickelköpfen, Segmentierung von Magneten, Wirbelströme in umgebenden Körpern etc.)

Zum anderen entstehen Modellierungsfehler durch Abweichungen der realen Maschine von den in der Modellierung angenommenen Größen. Wichtige Punkte hierbei sind:

- Maß-Toleranzen der einzelnen Bauteile (Rotor-, Statorblech, Magnete, Kupferleiter)
- Lagetoleranzen der Bauteile zueinander
- Toleranzen in den Bauteileigenschaften (Veränderte Remanenz der Magnete, abweichende Verlusteigenschaften der Bleche)
- Blechschlüsse durch Stanzgrate (erweiterte Wirbelstrombahnen)

Unter diesen Randbedingungen haben Untersuchungen stattgefunden, welche Einflüsse unterschiedlicher Abweichungen auf die Verlustmechanismen haben.

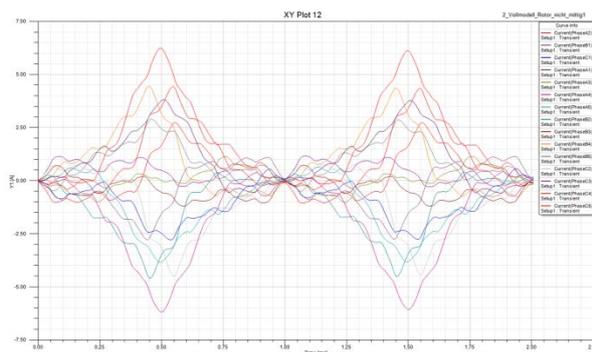


Abbildung 8: Kreisstrom bei Betrieb im Leerlauf bei einem parallelem Rotorversatz von 0,2mm

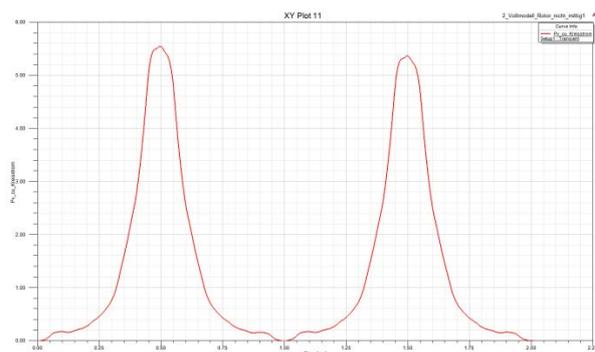


Abbildung 9: Auftretender Kupferverlust bei Betrieb im Leerlauf und parallelem Rotorversatz um 0,2mm

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen den auftretenden Kreisstrom sowie den dadurch entstehenden zusätzlichen Kupferverlust im Leerlauf, bei einem parallelen Rotorversatz um 0,2mm. Wie zu erkennen ist, ist der dabei entstehende zusätzliche Kupferverlust vernachlässigbar.

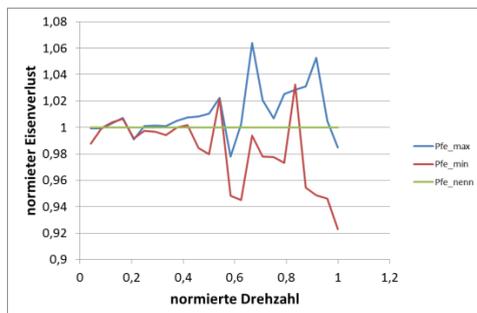


Abbildung 10: Normierter Eisenverlust bei unterschiedlichen Toleranzen der Magnetremanz

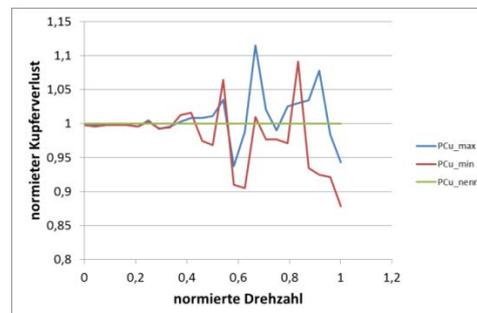


Abbildung 11: Normierter Kupferverlust bei unterschiedlichen Toleranzen der Magnetremanz

In Abbildung 10 und Abbildung 11 ist der Eisen- sowie der Kupferverlust einer elektrischen Maschine bei Variation der Remanenz der Permanentmagnete aufgezeigt. Es ist gut zu erkennen, dass Eisen- und Kupferverluste, je nach Betriebspunkt um bis zu 10 % variieren können.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Einflüsse der Modellierung sehr vielfältig sind und, zumindest für den Fall der Toleranzen, für die Berechnung nicht berücksichtigt werden können. Für das weitere Vorgehen bei der Modellierung und Berechnung der Maschine soll daher zunächst mit einem 2-dimensionalen Modell gestartet werden, das zumindest die dort bekannten geometrischen Nennmaße abbildet. Erst, wenn durch Anpassung der Berechnungsverfahren, keine ausreichende Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Ergebnis erreicht werden kann, sollte über eine detailliertere Modellierung (z.B. 3D) nachgedacht werden, da dies für den Auslegungsprozess gravierende zeitliche Nachteile mit sich bringt.

2.1.4 Zielstellungen

Die Wirkungsgradsteigerung der E-Maschine sowie Prüfstandsmessungen mit höherer als bisher bekannter Präzision und besserer als bisher bekannter Interpretierbarkeit sind das wesentliche Ziel des Projektes, welches mit vielen förderpolitischen Zielen in Verbindung steht. Diese sind u. a.:

- Entwicklung von Verfahren zur praxisrelevanten Interpretation von Prüfstandsergebnissen
- Schnelleres Erreichen einer höheren Energieeffizienz zur Ressourcenschonung
- Wirtschaftliche Vorteile für den Wissenschaftsstandort Deutschland durch Erreichen zumindest einer Entwicklungsführerschaft für die Elektromobilität
- Wirtschaftliche Vorteile für den Industrie- und Fertigungsstandort Deutschland durch Entwicklung und Produktion von optimalen energieeffizienten E-Mobilen.

Ziele des Teilvorhabens sind:

- eine in einzelnen zu definierenden Betriebspunkten optimal ausgelegte elektrische Antriebsmaschine,
- eine in einem zu definierenden Messbereich (Zyklus) optimal ausgelegtes elektrisches Antriebssystem,
- verbunden mit zeit- und kostensparender Messtechnik mit einer bislang nicht erreichbaren Genauigkeit,
- durch effiziente Messungen in Verbindung mit schneller und aussagekräftiger Simulation in einer gemessen am Wettbewerb geringeren Zahl an Entwicklungszyklen

2.2 Qualitative Vorstudie mit modifizierter FMEA

In einer Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA) wird nach [5] das Ziel verfolgt, "Fehler durch präventive Erkennung zu vermeiden oder zumindest das Bewusstsein für Fehler und deren Folgen zu schaffen". Im Kontext der Wirkungsgradmessung soll die FMEA einen qualitativen ersten Trend von Einflüssen auf Messabweichungen in der Wirkungsgradbestimmung geben. Die Bezeichnung des "Fehlers" ist somit im Folgenden mit einer Messabweichung gleichgesetzt.

Für die Umsetzung der Methode wird folgende Vorgehensweise aus Abbildung 12 angewendet. Der erste Block der Untersuchung besteht darin, ein System zu definieren und Systemgrenzen zu ziehen. Daraus werden die Kategorien für den Bewertungsbogen abgeleitet und Kriterien zur Bewertung festgelegt, bevor die Teilnehmer ausgewählt und in Gesprächen vorbereitet werden. Im zweiten Block befindet sich die eigentliche Umfrage, in dem die Teilnehmer die Einflüsse in den Bewertungsbogen eintragen und mit einer Bewertung versehen. Im Anschluss erfolgt der dritte Block mit der Auswertung inkl. Risikobewertung und Gewichtung der Einflüsse.

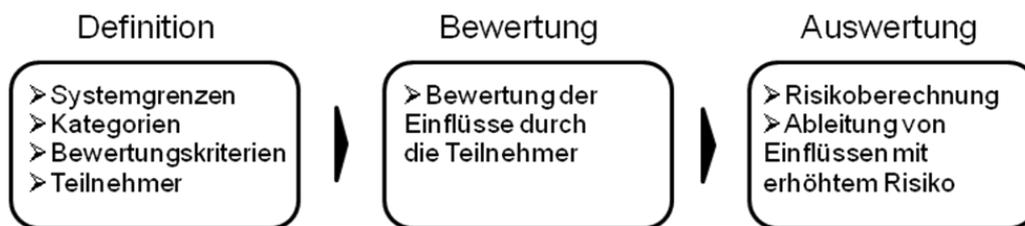


Abbildung 12: Vorgehensweise in der modifizierten FMEA

Die angewendeten Bewertungskriterien zeigt Abbildung 13. In [6] und [7] sind in den Befragungsbögen Bewertungszahlen von 1-10 vorgesehen. Die Trennschärfe der Bewertungszahlen ist in diesen Ausführungen für den vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet, so dass die Bewertungszahlen auf 1-5 reduziert und mit Bemerkung der Bezug zur vorliegenden Fragestellung zur Einflussanalyse auf die Wirkungsgradmessungen hergestellt wird.

Bewertungszahlen		Bemerkung
<i>Eintrittswahrscheinlichkeit A</i>		
1	Auftreten ist unwahrscheinlich	Wahrscheinlichkeit ca. 1:20000
2	Auftreten ist gering	Wahrscheinlichkeit ca. 1:5000
3	Gelegentliches auftreten	Wahrscheinlichkeit ca. 1:1000
4	Fehler tritt wiederholt auf	Wahrscheinlichkeit ca. 1:500
5	Sehr häufiges auftreten	Wahrscheinlichkeit ca. 1:10
<i>Bedeutung, Schwere B</i>		
1	sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung	Messwert fehlerfrei
2	geringe Funktionsbeeinträchtigung	leichte Messwertabweichung aber in Toleranz
3	Funktionsfähigkeit eingeschränkt	Messwert ist beeinträchtigt aber nach Rücksprache mit Kunden verwendbar
4	Funktionsfähigkeit stark eingeschränkt	Messwert ist unglaubwürdig oder falsch
5	nicht Funktionsfähig	Messwert nicht verwertbar (Ausfall, Notabschaltung)
<i>Entdeckungswahrscheinlichkeit E</i>		
1	Fehlerursache wird sicher entdeckt	Offensichtlicher Fehler
2	Fehlerursache wird sehr wahrscheinlich entdeckt	Bei Sichtprüfung
3	Fehlerursache wird wahrscheinlich entdeckt	gezielte Sichtprüfung bestimmter Komponenten
4	Fehlerursache wird weniger wahrscheinlich entdeckt	Sichtprüfung nicht ausreichend- nur durch Messung erkennbar
5	Unwahrscheinlich das Fehlerursache Entdeckt wird	Durch Sichtprüfung und Messung nicht zu erkennen

Abbildung 13: Modifizierte Bewertungskriterien

Zum Abschluss der Risikobewertung wird die Risikoprioritätszahl (RPZ) durch Multiplikation der Werte A, B und E berechnet [6]. Da die RPZ ein Maß für das Risiko darstellt, werden die Einflüsse somit gewichtet. Formel (1) stellt die verwendete Gleichung vor.

$$RPZ = A \cdot B \cdot E \quad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit wird eine RPZ >40 als Einfluss mit hohem Risikopotential definiert. Ein mittleres Risikopotential wird für eine RPZ-Bewertung zwischen 30 und 40 festgelegt. Einflüsse mit RPZ <30 werden mit niedrigem Risikopotential eingestuft.

Ein Ausschnitt der Ergebnisse in Abbildung 14 zeigt ein hohes Risiko aufgrund von Elektromagnetischen Einflüssen auf die Strom- und Spannungsmessung, welches zur Folge hat, dass Amplitudenfehler den Messwert beeinflussen. Als Ursache für diesen Einfluss werden nicht vorhandene oder nicht eingehaltene EMV-Maßnahmen angegeben. Die Leistungsbe-

rechnung ist aufgrund der Geräteparametereinstellungen fehlerhaft, so dass die Leistung in der Amplitude beeinflusst wird. Als Ursachen werden hier Fehler in der geltenden Prüfvorschrift oder Bedienfehler angegeben.

unerwünschtes Ereignis	pot. Fehler	pot. Folge	Ursache	aktuelle Maßnahme	A (Häufigkeit)	B (Schwere)	E (Wahrscheinlichkeit)	RPZ = A*B*E
Strommessung fehlerhaft	Elektromagnetische Störungen	Amplitudenfehler	EMV-Maßnahmen nicht vorhanden o. nicht eingehalten	Checkliste EMV-Maßnahmen	4	3	4	48
Spannungsmessung fehlerhaft	Elektromagnetische Störungen	Amplitudenfehler	EMV-Maßnahmen nicht vorhanden o. nicht eingehalten	Checkliste EMV-Maßnahmen	4	3	4	48
Leistungsberechnung fehlerhaft	fehlerhafte Parametereinstellung	elektrische Leistung zu gering oder zu hoch	Fehler in Prüfvorschrift	Prüfvorschrift	4	4	3	48
			Bedienfehler	Prüfvorschrift	4	4	3	48

Abbildung 14: Ausschnitt des Bewertungsbogens

Die qualitative Untersuchung gibt erste Hinweise von Einflussfaktoren auf die Wirkungsgradmessung. Die Vorstudie zeigt jedoch noch nicht, mit welcher Intensität und Sensitivität die Einflüsse wirken. Des Weiteren ist nicht bekannt, wie diese Einflüsse z.B. in der Messunsicherheitsberechnung oder in der Bestimmung systematischer Abweichungen einzuordnen sind. Ziel ist es daher, im weiteren Verlauf des Projektes die Einflussfaktoren systematisch und quantitativ zu bewerten.

2.3 Modellierung von Messabweichungen

Die Modellierung der Messabweichungen teilen sich in zwei Arbeitspakete auf. In dem ersten Arbeitspaket werden die stochastischen Abweichungen der Leistungsmessketten modelliert und analysiert. Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die Untersuchung von systematischen Abweichungen.

2.3.1 Messunsicherheitsmodellierung

Die Messung des Wirkungsgrads von elektrischen Maschinen wird nach dem Stand der Technik an Prüfständen indirekt über die elektrische und mechanische Leistung bestimmt [8], [9]. Der Prüfstandsaufbau in Abbildung 15 soll den erwarteten Einsatzbereich mit einer Energiequellsimulation und Ansteuerungen durch Frequenzumrichter und Lastsimulationen nachbilden. Die Bestimmung der elektrischen Leistung erfolgt dabei durch die Strom- (blaue Leitungen) und Spannungsmessung (rote Leitungen). Die mechanische Leistungsbestimmung benötigt die Messung des Drehmoments (grüne Leitung) und der Drehzahl (braune Leitung). In dem digitalen Leistungsmessgerät werden die Messgrößen Spannung, Strom, Drehmoment und Drehzahl erfasst und der Wirkungsgrad berechnet.

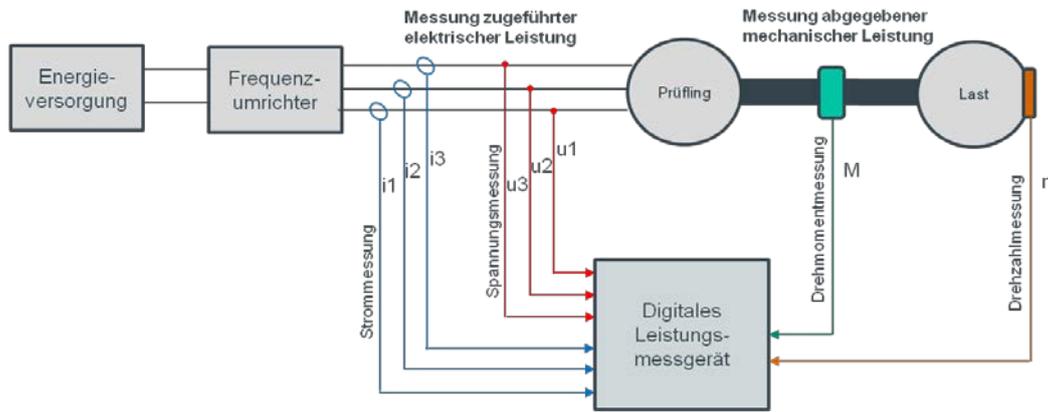


Abbildung 15: Betrachteter Prüfstands Aufbau

Der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine definiert sich im motorischen und generatorischen Betrieb nach [8] und [9] nach den folgenden Gleichungen:

$$\eta_{\text{motorisch}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}}$$

$$\eta_{\text{generatorisch}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{mech}}}$$

Die mechanische Leistung definiert sich aus dem gemessenen Drehmoment M und der berechneten Kreisfrequenz ω aus der gemessenen Drehzahl n nach der folgenden Formel.

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega$$

mit

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Die mittlere Wirkleistung an Umrichter gespeisten elektrischen Antrieben definiert sich bei nichtsinusförmigen Messgrößen nach [10] mit der folgenden Formel.

$$P_{\text{el}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt$$

Die Berechnung erfolgt nach dem Stand der Technik mit digitalen Leistungsmessgeräten. Die Momentanwerte von Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$ werden über eine Periodendauer T mit einer definierten Abtastrate erfasst.

Auf Grundlage der Gaußschen Fehlerfortpflanzung [11] gilt die folgende Modellvorstellung nach GUM [12] für die indirekte Messung des Wirkungsgrades.

$$U_{\eta} = f(U_{P_{\text{el}}}, U_{P_{\text{mech}}})$$

$$U_{\eta} = \sqrt{U_{P_{el}}^2 + U_{P_{mech}}^2}$$

Definitionsgemäß lässt sich darauf die Einzelfehler der mechanischen Leistung modellieren.

$$U_{P_{mech}} = f(U_M, U_n)$$

Die Unsicherheitsbeiträge der mechanischen Leistung setzen sich direkt aus der quadratischen Summe der Unsicherheitsbeiträge der Drehmoment- und der Drehzahlmessung zusammen:

$$U_{P_{mech}} = \sqrt{U_M^2 + U_n^2}$$

Die Berechnung der Drehzahlmessunsicherheit erfolgt hierbei am Beispiel des verwendeten Drehzahlgebers mit der Messmethode des magnetoresistiven Effekts. Dabei ist die Teilungstrommel laut [13] über 600 Inkremente geteilt, während ein Drehzahlfehler von einem Inkrement pro Umdrehung möglich ist. Daraus folgt:

$$U_n = \frac{1}{600} \cong 0,17\%$$

Bei der Drehmomentmessung fließen die Einflüsse bei der Messung mit DMS-Technologie auf das Messunsicherheitsbudget aus [14] [15] [16] mit ein.

$$U_M = \sqrt{U_{TK0}^2 + U_{TKC}^2 + U_{para}^2 + U_{dlh}^2 + U_{\sigma rel}^2 + U_{dc}^2}$$

Die Einzelfehler der Drehmomentmessung werden im Folgenden näher erläutert [17] [18].

U_{TK0} Unsicherheit durch Temperatureinfluss ΔT auf den Nullpunkt, bei dem die Er-

wärmung des DMS-Aufnehmers zu unerwünschten thermischen Dehnungen führt, die die zu messenden mechanischen Dehnungen teilweise überlagern. Diese Einflüsse können durch die Brückenschaltung kompensiert werden. U_{TK0} beschreibt die Unvollkommenheit dieser Kompensationsmaßnahme durch Bauteiltoleranzen des verwendeten Materials. Dieser Messunsicherheitsbeitrag bezieht sich auf das Nenndrehmoment M_{nom} .

$$U_{TK0} = M_{nom} \cdot TK_0 \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

U_{TKC} Unsicherheitsanteil durch Temperatureinfluss ΔT auf den Istwert der Messung M (Ursache: Siehe U_{TK0}):

$$U_{TKC} = M \cdot TK_C \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

U_{para} Der Messunsicherheitsbeitrag U_{para} entsteht durch zusätzliche, unerwünschte Kräfte und Momente, welche auf den Aufnehmer wirken (z.B. Eigengewicht und daraus resultierende Biegemomente). Dieser Messunsicherheitsbeitrag bezieht sich auf das Nenndrehmoment. d_{total} beschreibt die Summe der Verhältnisse aus maximal auftretenden parasitären Lasten und parasitären Grenzlasten. d_{para}

$$U_{para} = d_{para} \cdot d_{total} \cdot M_{nom} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

U_{dlh} Die Linearitätsabweichung einschließlich Hysterese U_{dlh} gibt den Betrag der maximalen Abweichung des Ausgangssignals von der Bezugsgeraden an und bezieht sich auf das Nenndrehmoment M_{nom} und definiert sich wie folgt:

$$U_{dlh} = M_{nom} \cdot d_{lh} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$U_{\sigma rel}$ $U_{\sigma rel}$ beschreibt die relative Standardabweichung der Wiederholbarkeit und bildet nach DIN1319 ein Maß für die Wiederholpräzision. Beinhaltet sind dabei Abweichungen des Messsignals durch zufällige Messabweichungen (statistische Streuung) unter Wiederholbedingungen (z.B. unveränderte Einbaustel-

lung, Umwelteinflüsse, etc.). Dieser Unsicherheitsbeitrag steigt mit steigender Ausgangssignalspanne M_{Δ} zwischen zwei Belastungsdrehmomenten:

$$U_{\sigma_{rel}} = M_{\Delta} \cdot \sigma_{rel}$$

U_{dc} U_{dc} beschreibt den Unsicherheitsbeitrag der Kennwertbestimmung aufgrund der von der idealen Geraden abweichenden Geradensteigung zwischen Drehmoment und Ausgangssignal bezogen auf das Nenn Drehmoment M_{nom} . Diese Abweichung wird auch als Kennwerttoleranz bezeichnet und kennzeichnet – bezogen auf das Ausgangssignal – die zulässige Abweichung zwischen tatsächlichem Kennwert und Nennwert:

$$U_{dc} = M_{nom} \cdot d_c \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Neben der Modellierung der mechanischen Leistungsmessunsicherheit, lässt sich im Folgenden die elektrische Leistungsmessunsicherheit aus den Anteilen der Strom- und Spannungsmessung definieren.

$$U_{P_{el}} = f(U_{U_i}, U_{I_i})$$

Die Unsicherheitsbeiträge der elektrischen Leistung setzen sich nach der Leistungsmesskette aus der quadratischen Summe der Unsicherheitsbeiträge des Leistungsmessgerätes und des Stromwandlers zusammen:

$$U_{P_{el}} = \sqrt{U_{P_{el,LM}}^2 + U_{I,SW}^2}$$

$$U_{P_{el}} = f(U_{U_i}, U_{I_i}, U_{I_{sw}})$$

Für die Messunsicherheitsberechnung des exemplarisch betrachteten digitalen Poweranalyzers wird vom Hersteller eine Modellierung zur Verfügung gestellt [19]. Diese definiert sich wie folgt:

$$U_{P_{el,L,M}} = P_{el} \cdot \sqrt{U_{el,read}^2 + U_{el,temp}^2 + \left(U_{el,range} \cdot \frac{P_{el,range} \cdot i_{sw}}{S_{el}} \right)^2 + \left(\tan(\arccos(\cos \phi)) \cdot \left(0,03 + \frac{0,05 \cdot f}{1000} \right) \right)^2}$$

Im Folgenden sind die Parameter näher beschrieben.

$U_{el,read}$ Unsicherheit des Anzeigewertes: Berücksichtigt die Messabweichungen $u_{el,read}$, die auf den Ist-Wert der Messgröße $P_{el,ist}$ bzw. auf den Anzeigewert des Leistungsmessgerätes bezogen sind und damit messbereichsunabhängig in das Messunsicherheitsbudget eingehen.

$$U_{el,read} = u_{el,read} \cdot P_{el,ist}$$

$U_{el,range}$ Unsicherheit durch die Wahl des Messbereiches: Berücksichtigt Messabweichungen, die auf den Messbereich $P_{el,range}$ bezogen sind.

$$U_{el,range} = u_{el,range} \cdot P_{el,range}$$

$U_{el,temp}$ Der Messunsicherheitsbeitrag $U_{el,temp}$ entsteht durch Stromwärmeverluste (verursacht durch den Messstrom I), welche die Temperatur der Leistungssensoren beeinträchtigen können. Diese spiegeln sich in veränderlichen ohmschen Widerständen wieder.

$$U_{el,temp} = u_{el,temp} \cdot \left(\frac{I}{i_{sw}} \right)^2$$

Die dem spezifischen Leistungsmessgerät zugeordnete Messunsicherheit $U_{P_{el,L,M}}$ des Leistungsmessgerätes kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$P_{el,range} = 3 \cdot U_{U,range} \cdot U_{I,range}$$

Dabei ist φ der Leistungsmessbereich, φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung, S_{el} die Scheinleistung und f die Frequenz bzw. Motordrehzahl. Die elektrische Frequenz f ist bei den Elektromotoren, abhängig von der Poolpaarzahl und definiert sich zusammen mit der mechanischen Drehzahl:

$$f = n/p$$

Die Messunsicherheiten des Stromwandlers sind im Folgenden näher beschrieben [20].

$U_{I,sw,temp}$ Durch die Angabe des Temperatureinflusses wird die Messabweichung beschrieben, die durch die Eigenerwärmung des Stromwandlers. Laut Herstellerangaben ist ΔT dabei die Temperaturdifferenz zu 25°C. Dieser Unsicherheitsbeitrag ist auf den Ist-Wert des Stroms I bezogen:

$$U_{I,sw,temp} = u_{I,sw,temp} \cdot \Delta T \cdot I$$

$U_{I,sw,freq}$ Durch diesen Unsicherheitsbeitrag wird die Messabweichung mit steigender Stromfrequenz berücksichtigt. Dieser Beitrag wird dabei auf die Ist-Frequenz f und den Ist-Wert des Stroms I bezogen:

$$U_{I,sw,freq} = u_{I,sw,freq} \cdot \frac{f}{1000} \cdot I$$

$U_{I,sw,off}$ Der Offsetfehler berücksichtigt die parallele Verschiebung der Sensorkennlinie in positive oder negative Richtung. Daher bezieht sich dieser Messunsicherheitsbeitrag auf den Messbereichsendwert I_{nom} :

$$U_{I,sw,off} = u_{I,sw,off} \cdot I_{nom}$$

$U_{I,sw,lin}$ Die Linearitätsabweichung resultiert darin, dass der Primärstrom nicht linear auf den Sekundärstrom abgebildet wird. Bezugswert ist dabei der Ist-Wert I :

$$U_{I,sw,lin} = u_{I,sw,lin} \cdot I$$

Die Messunsicherheitsbeiträge des Stromwandlers werden nach der folgenden Formel zusammengefasst.

$$U_{I,SW} = \sqrt{U_{I,sw,temp}^2 + U_{I,sw,freq}^2 + U_{I,sw,off}^2 + U_{I,sw,lin}^2}$$

Als Ergebnis der Modellierung sind die Messunsicherheiten der elektrischen und mechanischen Leistung sowie für den Wirkungsgrad graphisch dargestellt. Es zeigen sich in der elektrischen Leistung und im Wirkungsgrad besonders im unteren Drehmoment- und Drehzahlbereich einen Anstieg der Messunsicherheit. In der Messunsicherheit der mechanischen Leistungsmessung wird eine Drehmomentabhängigkeit sichtbar. In dem Fahrzyklus NEFZ (weiße Punkte) wird somit die Bedeutung einer genauen Messung im Teillastbereich deutlich.

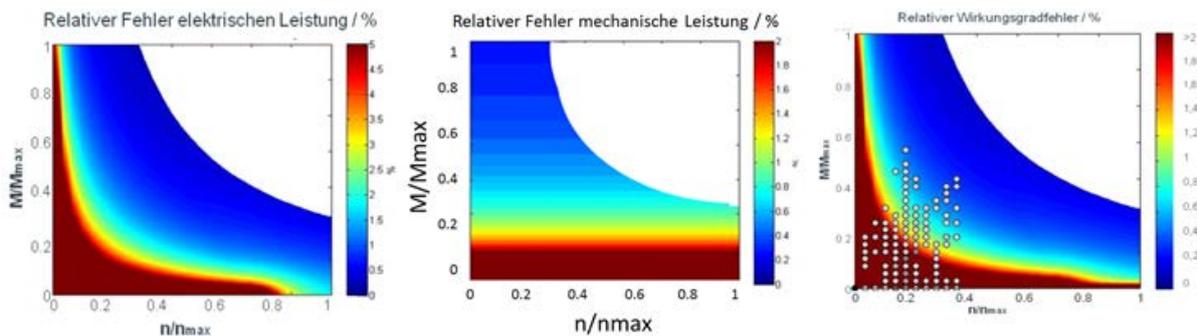


Abbildung 16: Ergebnisse der Messunsicherheitsmodellierung

2.3.2 Einflussanalyse und Reduzierung von Messunsicherheiten

In einer Analyse der Einflüsse der Messunsicherheitsanteile zeigt exemplarisch die Gewichtung der Anteile in einem exemplarisch ausgewählten Arbeitspunkt des relevanten Teillastbereiches ($n=1500$ 1/min, $M=50$ Nm). Besonders die messbereichsbezogenen Anteile wie Temperatureinfluss, Hysterese oder parasitäre Lasten sind hier hervorzuheben und werden im Folgenden näher untersucht und Maßnahmen zur Reduzierung der Einflüsse diskutiert.

Der Messbereichsfehler des Drehmomentaufnehmers zeigt sich als relevanten Einfluss auf die Drehmomentmessunsicherheit. Abbildung 17 zeigt exemplarisch die Messunsicherheitsdifferenz im Vergleich eines Drehmomentsensors mit einem Messbereich von $M = 500$ Nm und $M = 100$ Nm. Die relevanten Drehmomentbereiche im unteren Drehmoment verringern die Unsicherheiten um mind. 0,2 %. Grundlage dieses Vergleiches sind die Sensoren des Herstellers HBM [18].

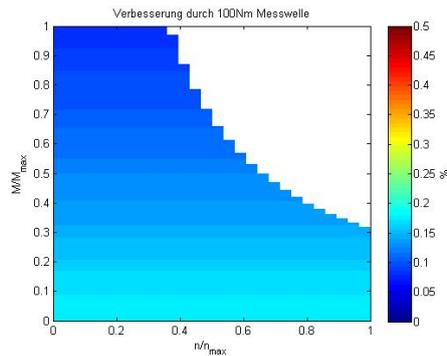


Abbildung 17: Differenzkennfeld für die Genauigkeitserhöhung durch angepasste Messbereiche

Um weiterhin die Messung des gesamten Drehmomentbereichs der elektrischen Maschine abzudecken und zusätzlich im kleineren Messbereich die Messunsicherheit zu verringern, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma HBM ein Konzept für eine Drehmomentmesswelle mit zwei unterschiedlichen Messbereichen erarbeitet. Abbildung 18 stellt den Vergleich der Unsicherheiten der mechanischen Leistung gegenüber. Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung von bis zum 10-fachen der vorherigen Messunsicherheit.

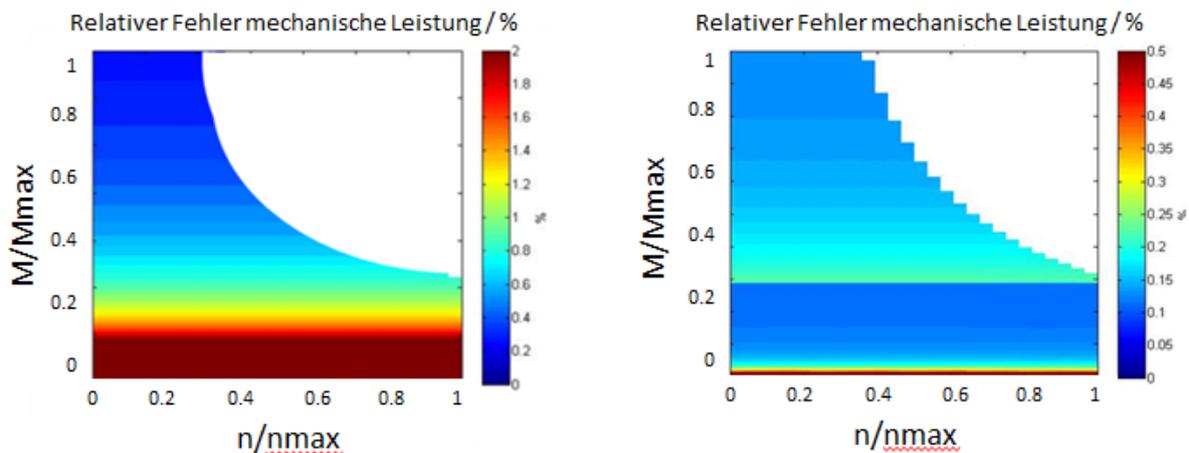


Abbildung 18: Messunsicherheitsvergleich der Drehmomentmessung (Bild links: ohne MB-Umschaltung, Bild rechts: mit MB-Umschaltung)

In zeigt sich die Erwärmung des Drehmomentsensors als weiteren relevanten Einfluss. Ursache für eine Erwärmung des Rotors sind z.B. die sensoreigene Leistungsaufnahme, die Last- und Prüflingsmaschine sowie die Raumtemperatur in der Prü fzelle wie Abbildung 19 visualisiert.

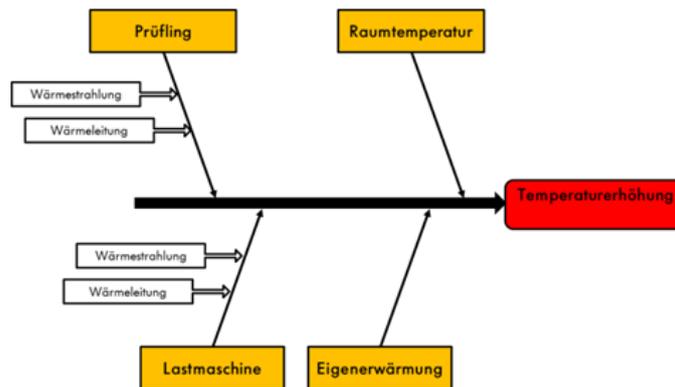


Abbildung 19: Einflüsse auf eine Erwärmung des Sensors

In einem Experiment konnten die Einflussfaktoren auf die Erwärmung des Sensors eingegrenzt werden. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera zeigt sich der Einfluss der Lastmaschine bei einem Versuch ($n = 7000 \text{ 1/min}$, $M = 40 \text{ Nm}$, $t = 7000 \text{ s}$) mit einer Temperaturdifferenz zu den anderen Komponenten von bis zu 20 K am deutlichsten. Der Temperaturverlauf in Abbildung 20 zeigt eine Erwärmung des Sensors um ca. 2 K. Damit eine homogene Erwärmung des Sensors gewährleistet ist, sind Temperaturdifferenzen auf beiden Seiten des Sensors zu vermeiden. Für die Reduzierung der Erwärmung sind z.B. der Einsatz von Peltier-Elementen oder einer Kühlung des Ausgangs der Lastmaschine geeignete Möglichkeiten.

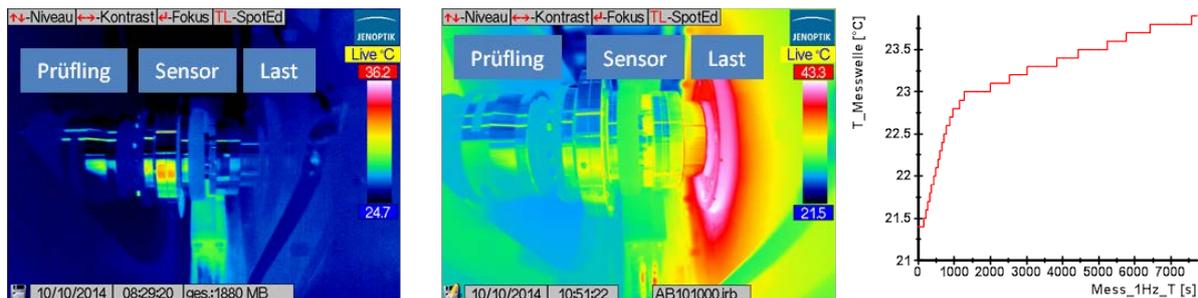


Abbildung 20: Wärmebildaufnahmen des Antriebsstrangs (Bild links: Temperatur vor dem Versuch, Bild Mitte: Temperatur nach dem Versuch, Bild rechts: Temperaturverlauf)

Als weiteren signifikanten Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit zeigt der Messunsicherheitsanteil der parasitären Last. Parasitäre Lasten sind die Folge von Kräften und Momenten, die zusätzlich zur Messgröße des Drehmoments (Torsionsmoment) auf den Aufnehmer wirken und eine Verformung des Messkörpers erzeugen. Bewegen sich diese innerhalb festgelegter Grenzen, findet durch die Anordnung der DMS innerhalb des Aufnehmers eine Kompensation statt und der Einfluss auf das Messsignal wird kompensiert. Dieses wird dadurch ermöglicht, dass sich die Dehnungen, die im Federkörper durch das anliegende Drehmoment erzeugt werden, addieren und sich die durch parasitäre Lasten erzeugten gegenseitig aufheben. Trotz Kompensation können sich diese durch Fertigungstoleranzen der Dehnungsmessstreifen und des Aufnehmers jedoch mit 0,3 % des Nenndrehmoments auf das Messsignal auswirken, siehe [17].

Der Einfluss der parasitären Lasten inkl. des Biegemomentes und der Querkraft auf die Drehmomentmessunsicherheit zeigt sich in Abbildung 21.

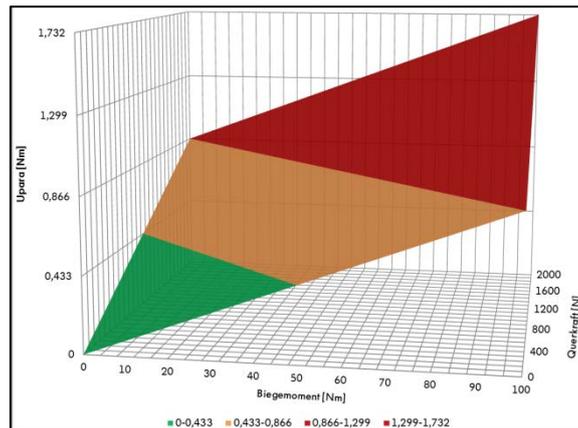


Abbildung 21: Messunsicherheitsanteil der parasitären Last in Abhängigkeit des Biegemomentes und einer Querkraft

Ursachen von parasitären Lasten visualisiert Abbildung 22. Parasitäre Lasten können durch eine Unwucht des Rotors/Welle, einen Versatz im Wellenstrang oder durch Massen hervorgerufen werden. Für die Reduzierung von parasitären Lasten ist die Ausrichtung des Wellenstrangs durch Werkzeuge wie z.B. einer Messuhr oder einem Laser erforderlich. Ferner ist eine Prüflingsunwucht und Unwucht des Wellenstrangs festzustellen und zu minimieren.

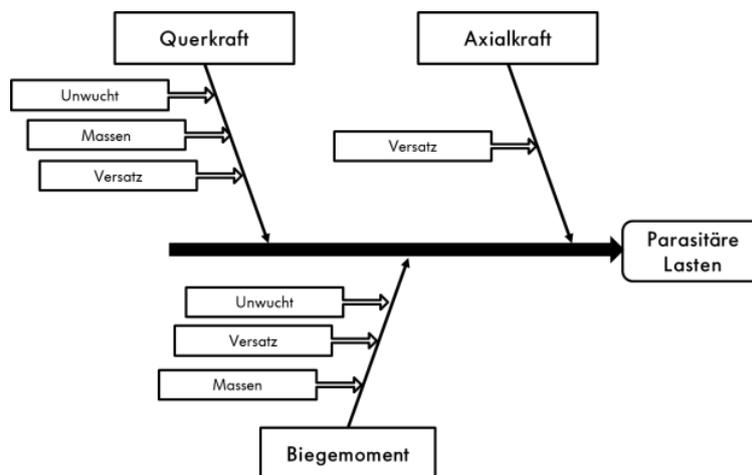


Abbildung 22: Ishikawa mit den Ursachen einer parasitären Last

Ein weiterer Unsicherheitsanteil ist der Hysteresefehler.

Für die Untersuchung des Hystereseinflusses wird zunächst das Hystereseverhalten und die mathematische Struktur nachgebildet und anhand von Fallbeispielen unterschiedliche Belastungsprofile und deren Einfluss auf Hystereseabweichungen qualitativ bestimmt.

Eine Hysterese wird meist mit der magnetischen Hysterese gleichgesetzt, jedoch kann dieses Phänomen auch in der Ökonomie oder Biologie auftreten. Allgemein kennzeichnet die Hysterese laut [24] ein Systemverhalten, dessen Ausgang Y nicht nur von Amplitude und Frequenz, sondern auch von der zeitlichen Vorgeschichte des Eingangs X abhängt. Eine der

ersten entdeckten Formen war die elastische Hysterese [15], die bei der Be- und Entlastung von Gummimaterialien aufgrund von interner Reibung jeweils unterschiedliche Kraft- und Dehnungsverläufe verursacht. Je nach Belastungs- oder Entlastungszyklus können bei gleichen mechanischen Spannungen σ unterschiedliche Dehnungen ε auftreten - abhängig von den zuvor eingepprägten Spannungen. Hersteller von modernen Drehmomentenaufnehmern auf DMS-Basis geben aufgrund der teils elastisch und teils plastisch gekoppelten Klebe- und Kunststoffverbindung zwischen DMS-Gitter und Federkörper Hystereseabweichungen an [15]. Für eine tiefere Behandlung der werkstoffwissenschaftlichen Ursachen des Hystereseverhaltens sei auf [21] verwiesen.

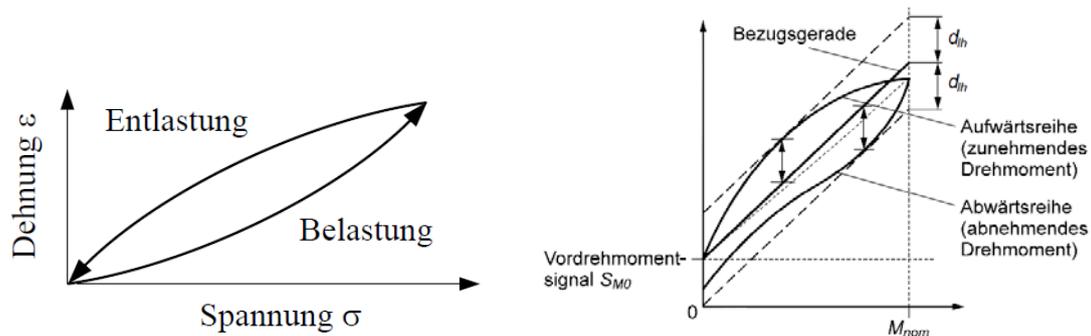


Abbildung 23: Äußere Hysteresekurve eines Input/Output-Systems und Herstellerangaben zu den Kennwerten einer Hystereseabweichungen (Quelle: [22])

Ein Modell zur Nachbildung des Hystereseeffekts entwickelte 1935 der Physiker Franz Preisach [23] in einem sogenannten „Preisach-Modell“. Dieses Modell beruht auf der Verknüpfung von Relay-Bausteinen. Ein Relay (siehe Abbildung 24) ist in diesem Zusammenhang der kleinste Baustein des Preisach-Modells.

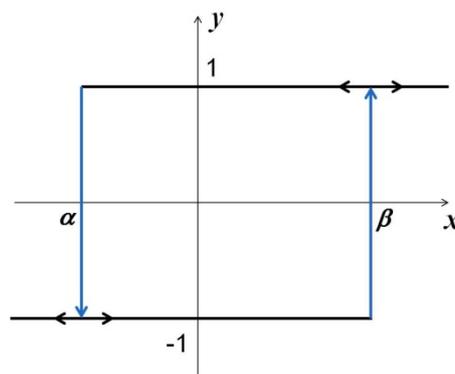


Abbildung 24: Relay mit den Schwellenwerten α und β (Quelle: [24])

Die Ausgangsgröße y eines Relay-Bausteins kann entweder 1 oder -1 (auch 1 oder 0) annehmen. Wenn die Eingangsgröße x die Schwellenwerte α von rechts und β von links erreicht schaltet die Ausgangsgröße von -1 auf 1, bzw. umgekehrt. Ein Umschalten erfolgt also immer nur, wenn die Eingangsgröße aus einer definierten Richtung kommt, d.h. die Vorgeschichte spielt eine große Rolle. Für sich gesehen stellt ein Relay-Baustein bereits ein Hystereseverhalten dar und kann als das kleinste Hysteresemodell angesehen werden. Der Relay-Bausteins als Übertragungsglied sei mit $R_{\alpha\beta}$ gekennzeichnet. Seien nun N Relays

$R_{\alpha_i\beta_i}$ mit $i = 1 \dots N$ gegeben, ergibt eine Parallelschaltung dieser Relays mit den Gewichten $\mu_i = \mu(i) > 0$:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \mu_i R_{\alpha_i\beta_i}[t_0, \eta_0(i)] x(t) \quad t \geq t_0$$

mit der Ausgangsgröße $y(t)$, der Eingangsgröße x , den Relays $R_{\alpha_i\beta_i}[t_0, \eta_0(i)]$ mit dem jeweiligen Anfangszustand $\eta_0(i)$ zum Zeitpunkt t_0 . Diese Parallelschaltung ist als Blockschaltbild darstellbar:

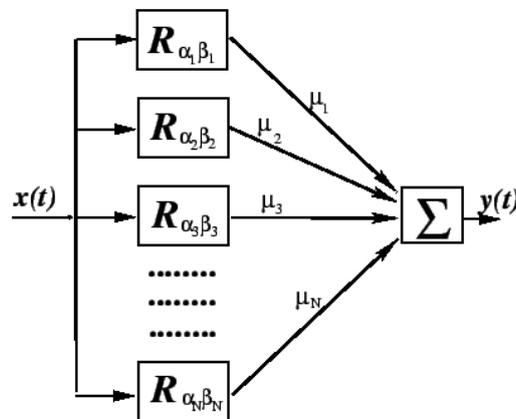


Abbildung 25: Parallelschaltung von gewichteten Relay-Bausteinen (Preisach-Modell) (Quelle: [25])

Alle Schwellenwerte α_i und β_i der Relays können in der sogenannten Preisach-Ebene aufgetragen werden. Die Anzahl an eingesetzten Relays beeinflusst die Diskretisierung der Ausgangsgröße $y(t)$, da die Ausgangsgröße eines jeden Relays nur zwei diskrete Werte annehmen kann. Eine Erhöhung der Anzahl an Relay-Bausteinen mit $R_{\alpha_i\beta_i}$, $i = 1 \dots N$, $N \rightarrow \infty$ führt somit zu einem Preisach-Modell, dessen Ausgangsgröße einen näherungsweise kontinuierlichen Verlauf annehmen kann und somit reale Hysteresekurven abbilden kann. Zur Veranschaulichung der Preisach-Ebene sowie Anzahl und Gewichtung der eingesetzten Relays kann Abbildung 26 herangezogen werden.

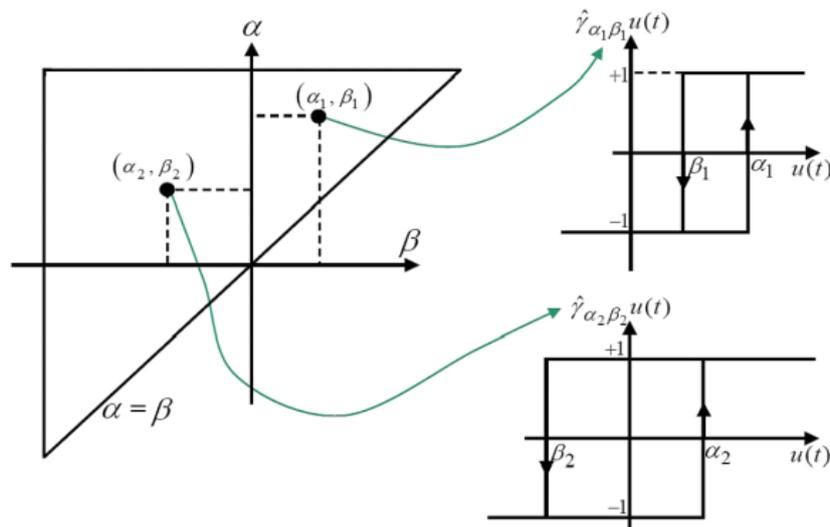


Abbildung 26: Allgemeine Interpretation der Preisach-Ebene (Quelle: [26] [27])

Durch passende Gewichtung und Gestaltung der Preisach-Ebene sind nun analog zu Abbildung 27 verschiedene Hysteresekurven modellierbar. Die Anordnung der Gewichte auf der Preisach-Ebene $\mu(\alpha, \beta)$ wird, wie in der Abbildung angedeutet, auch als Preisach-Funktion bezeichnet.

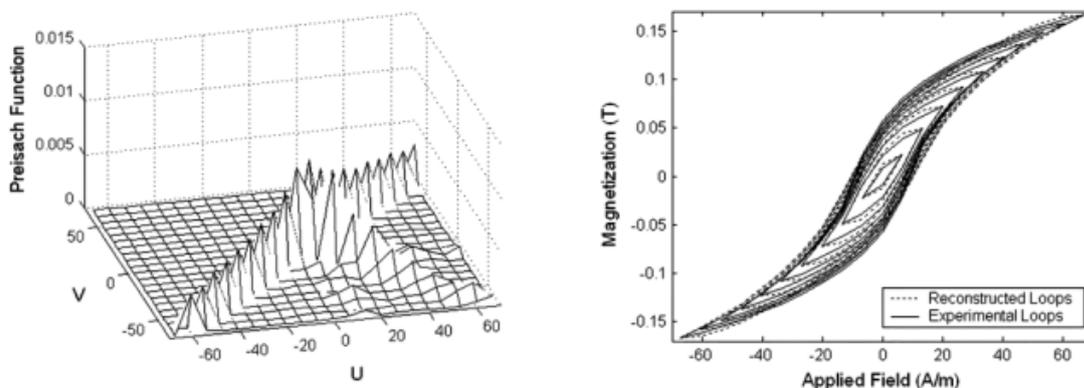


Abbildung 27: Auswirkungen der Relay-Verteilung in der Preisach-Ebene auf eine äußere, magnetische Hysteresekurve (Quelle: [26] [27])

Ziel soll es sein den Hystereseverlauf des Drehmomentenaufnehmers abzubilden. Dazu kann nach Abbildung 23 die Angaben zur Höhe der Hysteresekurve d_{lh} von Datenblättern verwendet werden und somit das Hysteresemodell analog zum Blockschaltbild aus Abbildung 25 in Matlab/Simulink erstellt werden.

Hier liegt jedoch ein mit den momentanen Mitteln unlösbares Problem im zu geringen Betrag von U_{dlh} . In Relation zur Drehmomentenspanne $[0; 500] Nm$ des eingesetzten Drehmomentenaufnehmers ist dieser Betrag:

$$U_{dlh} = d_{lh} \cdot M_{nom} \leq 0,1 Nm \ll 500 Nm$$

Für die Erhöhung der Modellgenauigkeit kann die Relay-Anzahl des verwendeten Modells um Zehnerpotenzen erhöht werden, jedoch wirkt hier die Rechnerleistung zur Berechnung diese sehr großen Relay-Netzwerkes ($N \gg 10000$) begrenzend.

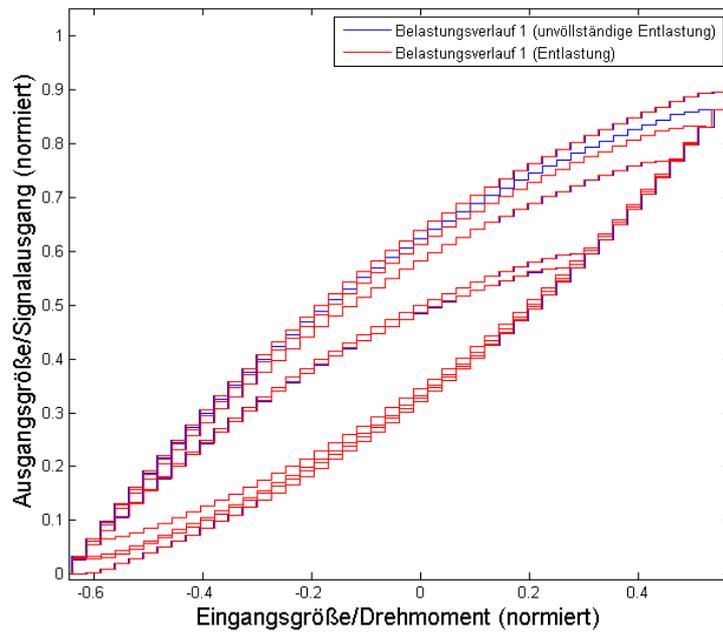


Abbildung 28: Hysteresekurve des verwendeten Preisach-Modells

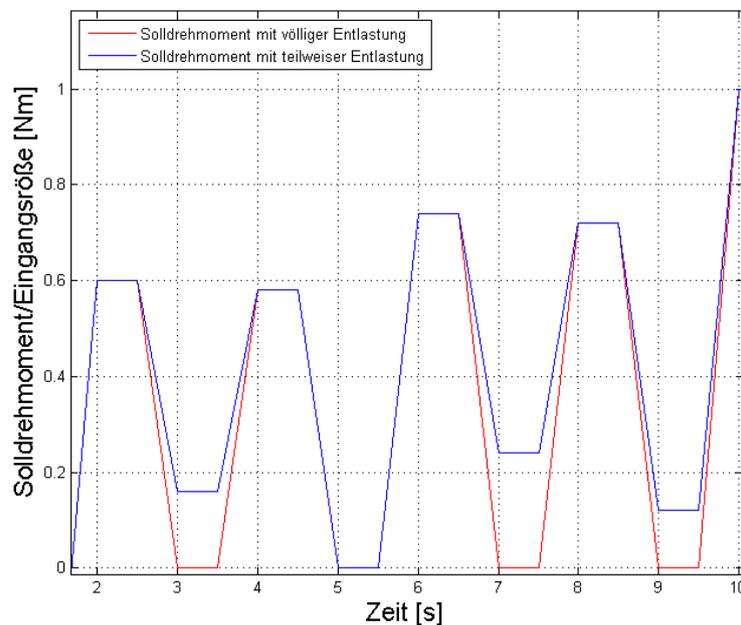


Abbildung 29: Zeitliche Sollarbeitspunktfolgen der Drehmomentmessungen

Die äußeren und inneren Hysteresekurven eines Preisach-Modells, welches in Matlab/Simulink mit $N = 1300$ Relays implementiert wurde, sei in Abbildung 28 dargestellt. Um den Einfluss der Vorgeschichte der Eingangsgröße sichtbar zu machen werden zwei Ar-

beitspunktfolgen miteinander verglichen. Diese beiden Arbeitspunktfolgen haben lediglich die vier zu messenden Drehmomente gemeinsam.

Die erste Abfolge geht vor dem Anfahren eines Arbeitspunktes stets auf den unteren Totpunkt ($M = 0 \text{ Nm}$) zurück, sodass vor dem Anfahren eines jeden Arbeitspunktes die gleiche Ausgangsbedingung existiert.

Die zweite Abfolge fährt vor dem Anfahren eines neuen Arbeitspunktes willkürlich in die Nähe des unteren Totpunktes, berührt diesen jedoch nicht. Beide Arbeitspunktfolgen können Abbildung 29 entnommen werden.

Der simulierte Ausgangssignalverlauf, welcher das Solldrehmoment mit dem Hystereseeübertragungsverhalten verknüpft, ist in Abbildung 30 dargestellt.

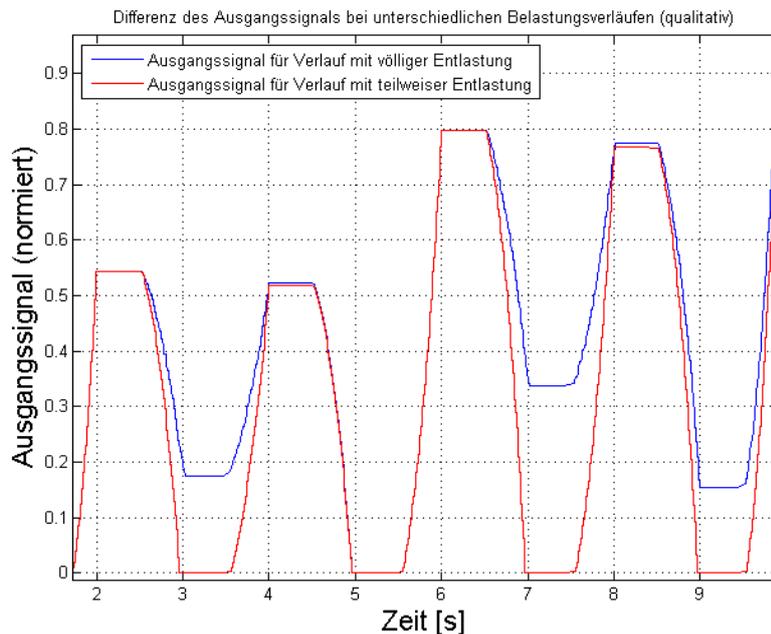


Abbildung 30: Vergleich des Ausgangssignalverlaufes für unterschiedliche Solldrehmomentverläufe

Bei der zweiten und vierten Drehmomentenmessung sind unterschiedliche Ausgangssignale zu erkennen. Dies kann in beiden Fällen durch Unterschiede bei den zeitlichen Belastungsvorgeschichten der zwei Arbeitspunktfolgen erklärt werden. Aus den Ergebnissen wird für alle weiteren Wirkungsgradmessungen zwischen dem Anfahren von Arbeitspunkten eine vollständige Entlastung des Drehmoments empfohlen.

Das Leistungsmessgerät zur Signalverarbeitung und Wirkungsgradberechnung besitzt folgende Messunsicherheitsanteile für die Wirkleistung P [20]:

$$\Delta P_{\text{Leistungsmessgerät}} = P_{\text{read}} \left[\frac{\Delta P_{\text{read}}}{P_{\text{read}}} + \frac{\Delta P_{\text{range}}}{P_{\text{range}}} \frac{P_{\text{range}}}{S_{\text{read}}} + \tan\varphi(\text{influence}\lambda = 0) \right]$$

read: Eingangsfehler

range: Messbereichsfehler

Der Eingangsfehler bezieht sich auf die Messwerterfassung von Strom, Spannung, Drehmoment und Drehzahl und ist durch den Anwender nicht zu beeinflussen. Bei dem Messbereichsfehler hat der Anwender allerdings die Möglichkeit durch manuelle oder automatische Messbereichsumschaltung den Fehler zu verringern. In Abbildung 31 ist der Anteil des Messbereichsfehlers des Leistungsmessgeräts am Messfehler der gesamten Wirkleistungsmesskette dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dieser im gesamten Kennfeld mindestens 75 % beträgt.

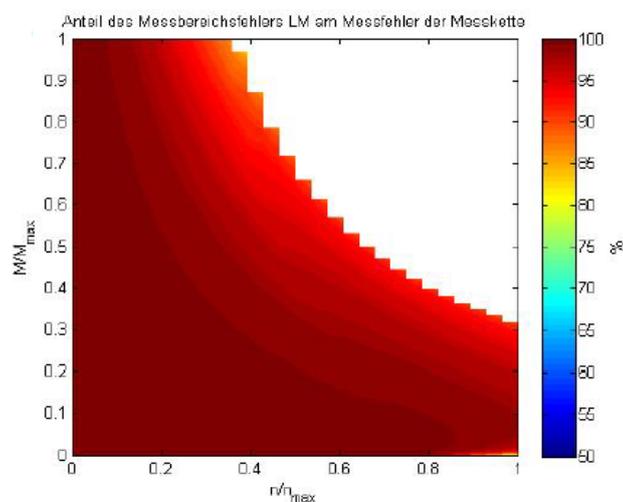


Abbildung 31: Anteile des Messbereichsfehlers auf die gesamte Unsicherheit der Wirkleistung

Für die Reduzierung der Messunsicherheit im Leistungsmessgerät wird im Folgenden die Option der Messbereichsumschaltung erläutert. Die folgenden Darstellungen zeigen den Vergleich für den Fall der Messbereichsumschaltung (Abbildung 32) und ohne Umschaltung des Messbereiches (Umschaltung bei: 50 mV, 100 mV, 200 mV, 500 mV, 1 V, 2 V, 10 V). Es zeigt sich, dass sich die Messunsicherheit besonders in den unteren Drehzahl- und Drehmomentbereichen durch die Umschaltung reduziert wird. Es gibt die Möglichkeit eine definierte Umschaltung oder eine dynamische, automatisierte Umschaltung zu implementieren, bei der sich der Messbereich entsprechend auf die Amplitude des Messwertes anpasst. Abbildung 32 und Abbildung 33 visualisieren die Verbesserungen in der Messunsicherheit. Es zeigen sich bei der Messbereichsumschaltung besonders im Teillastbereich deutliche Verbesserungen.

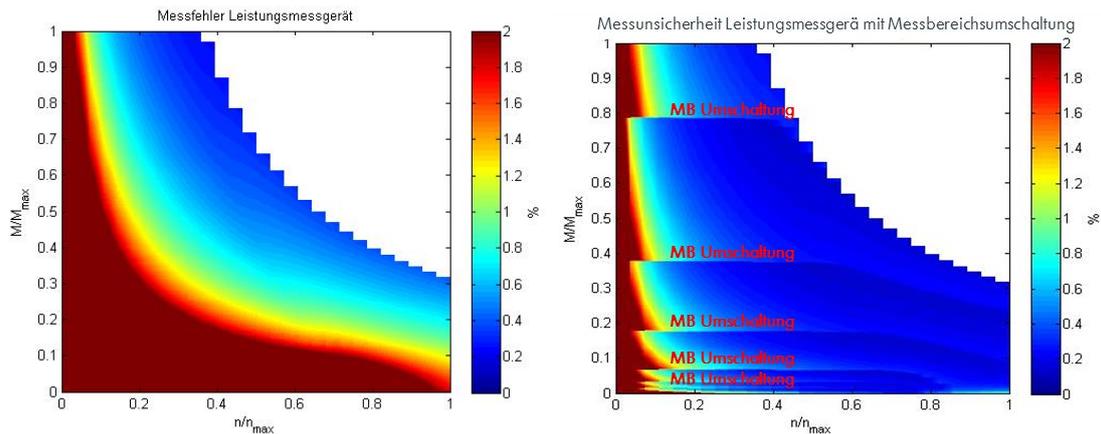


Abbildung 32: Messunsicherheit der Wirkleistung (Bild links: maximaler Messbereich, Bild rechts: Messbereichsumschaltung)

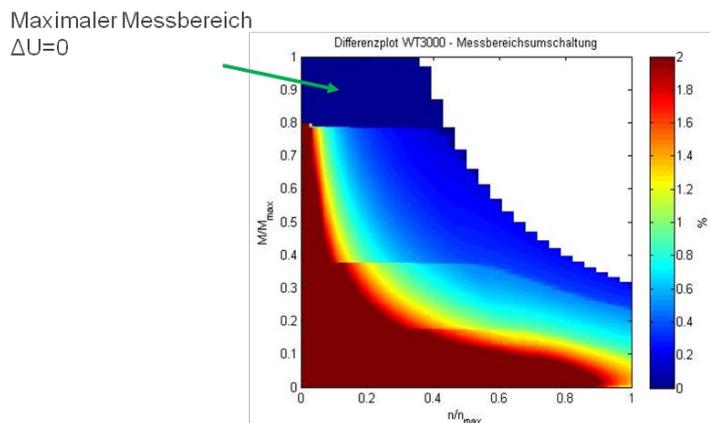


Abbildung 33: Differenz der Messunsicherheit ohne MB-Umschaltung vs. MB-Umschaltung

2.3.2 Modellierung der Lagerreibung als systematische Abweichung

In der Wirkungsgradauswertung/-bewertung sind systematische Abweichungen zu korrigieren oder quantitativ anzugeben. Als Überblick visualisiert Abbildung 34 die Wärmeverluste, welche am Prüfsystem entstehen und berücksichtigt werden müssen. So entstehen in bei der Bestimmung der elektrischen Leistung ggf. Leitungsverluste, wenn nicht direkt am Prüfling gemessen werden kann. Im Folgenden wird eine Spannungsmessung direkt am Prüfling angenommen. Des Weiteren werden Wärmeverluste an die Umgebung oder an benachbarte/berührende Komponenten übertragen. Ferner wird bei der Bestimmung der mechanischen Leistung nicht direkt an dem Prüfling gemessen sondern mit Hilfe des Drehmomentmessflansches und Drehzahlgebers innerhalb des Wellenstrangs. Zwischen diesen Sensoren und dem Prüfling befinden sich häufig Lagerstellen, welche Reibmomente verursachen, die nicht dem Prüfling zugeordnet werden dürfen. Im Folgenden wird ein Lagermodell entwickelt, um die systematischen Abweichungen des Prüfstandaufbaus in der Auswertung mit zu berücksichtigen.

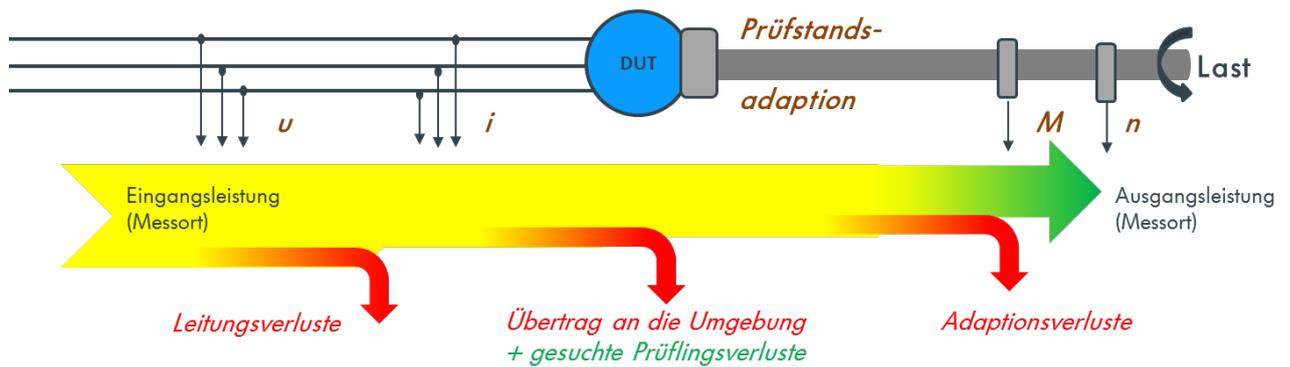


Abbildung 34: Wärmeverluste im Prüfsystem

In einer umfangreichen Einflussanalyse auf das Lagerreibmoment, zeigt das Ishikawa-Diagramm in Abbildung 35 eine Zusammenfassung der relevanten Parameter.

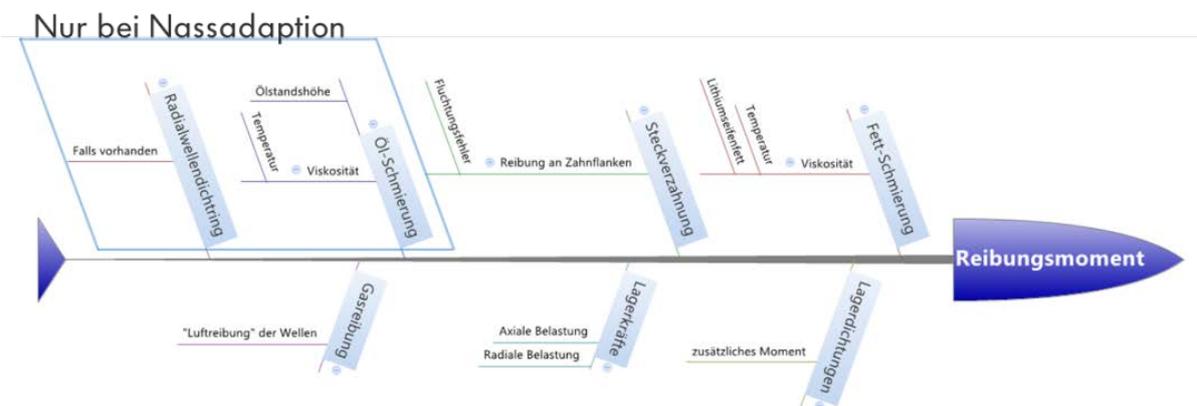


Abbildung 35: Einflussfaktoren auf das Lagerreibmoment bei Trocken- und Nasslagerung

Die Parameter sind in Trocken- und Nassadaption unterteilt. Zusätzlich zu den Einflüssen einer Trockenadaption sind in der Modellbildung bei einer Nassadaption die Ölschmierung und die Radialwellendichtringe zu berücksichtigen.

Die grundlegenden Formeln für die Reibmodellierung nach SKF [29] sind im Folgenden dargestellt.

Gesamtreibmoment in Nmm

$$M = \Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

Rollreibungsmoment in Nmm

$$M_{rr} = G_{rr} (vn)^{0,6}$$

Der Rollreibungsgrundwert G_{rr} multipliziert mit der Drehzahl und der kinematischen Viskosität des Schmierstoffes, hoch einem Formfaktor, ergibt das Rollreibungsmoment.

Reibungsmindernde Einflüsse:

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \cdot 10^{-9} (n \cdot dm)^{1,28} \nu^{0,64}}$$

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs} \nu n (d+D)} \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}}}$$

Gleitreibungsmoment in Nmm:

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

Der Gleitreibungsgrundwert ist analog zum Rollreibungsgrundwert abhängig von Lagerart, mittlerem Durchmesser, Axialbelastung und Radialbelastung. Die Gleitreibungszahl kann unter Voraussetzung eines ausreichend tragfähigen Schmierfilms näherungsweise mit $\mu_{sl} = \mu_{EHD}$ angenommen werden.

Reibungsmoment von Berührungsdichtungen in Nmm:

$$M_{seal} = K_{S1} d_s^\beta + K_{S2}$$

Das Reibungsmoment M_{seal} das durch Berührungsdichtungen im Lager entsteht, wirkt zusätzlich zu den Verlusten aus der Bewegung der Wälzkörper im Lager. Unter Umständen kann es zu höheren Reibverlusten durch die Berührungsdichtungen kommen als es im Lager selbst der Fall ist.

Reibungsmoment bedingt durch Strömungs-, Plansch- oder Spritzverluste in Nmm:

$$M_{drag} = V_M K_{ball} d_m^5 n^2$$

Die Strömungs-, Plansch-, oder Spritzverluste zeigen einen wesentlichen Anteil an den Gesamtverlusten. Durch das Eintauchen der Wälzkörper in ein Ölbad ist das Lager zu einem gewissen Teil von Öl umspült und es treten Strömungsverluste auf.

Abbildung 36 zeigt exemplarisch die Verlustleistung für ein Rillenkugellager Typ 6209-2Z mit folgenden Randbedingungen.

1. Lebensdauer geschmiert durch ein Lithiumseifenfett mit einer Viskosität von $110 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40°C
2. Abgedichtet durch Dichtscheiben

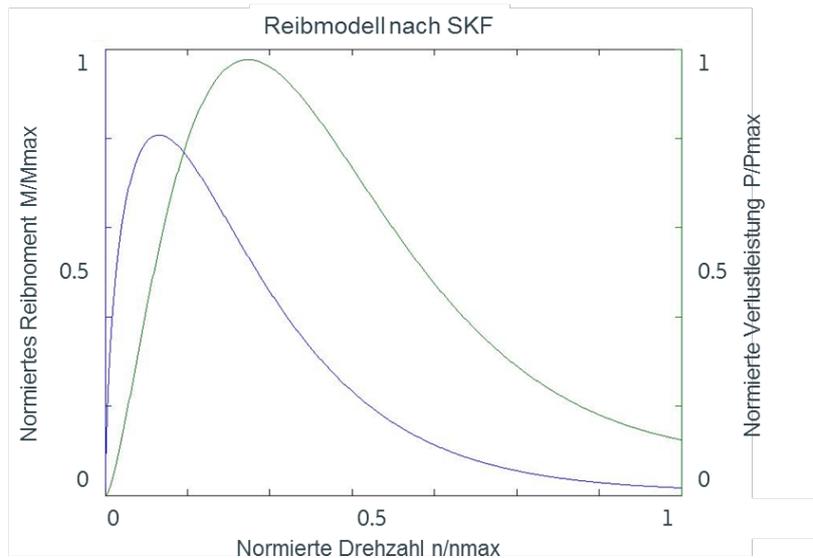


Abbildung 36: Simulation des Reibmomentes und der Verlustleistung für SKF 6209-2Z

Abbildung 36 zeigt, dass das Maximum bedingt durch die Reibungsmindernden Einflüsse nicht zwangsläufig bei höchster Drehzahl auftreten. Durch den Schmierfilmdickenfaktor Φ_{ish} welcher seinen Ursprung im Sachverhalt findet, dass bei einem ausreichend geschmierten Wälzkontakt nie die gesamte Schmierstoffmenge überrollt wird. Es wird nur eine kleine Menge Schmierstoff gebraucht um einen Schmierfilm aufzubauen. Ein Teil des nicht gebrauchten Schmierstoffes formiert sich zu einem Vorlauf. Dieser Vorlauf wird auf Schub beansprucht und erzeugt Wärme, welche die Viskosität herabsetzt und damit auch das Rollreibungsmoment. Zusätzlich zum Schmierfilmdickenfaktor wirkt noch der Schmierstoffverdrängungsfaktor Φ_{rs} welcher bedingt durch Drehzahl und Viskosität die Schmierfilmdicke weiter mindert und somit auch das Rollreibungsmoment.

Die Umsetzung des Modells erfolgte in Matlab, so dass die Auswertesoftware mit den systematischen Abweichungen automatisiert korrigiert wird.

Das vorgestellte Verlustleistungsmodell ist allerdings nur eine erste Schätzung für die Verluste. Für genauere Angaben ist das Modell durch Versuche zu parametrieren.

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen in einer Sensitivitätsanalyse die relevanten Parameter einer Trocken- und Nassadaption, die den größten Einfluss auf die Empfindlichkeit des Modells haben und in Wirkungsgradmessungen berücksichtigt werden sollten.

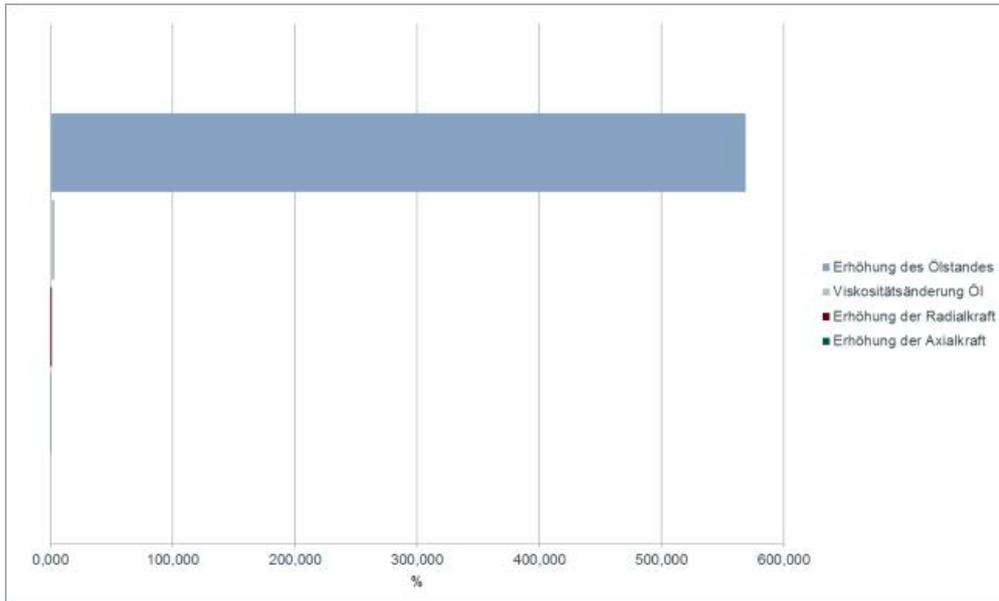


Abbildung 37: Relevante Einflüsse auf die Verlustleistung im Lager beim Nassaufbau

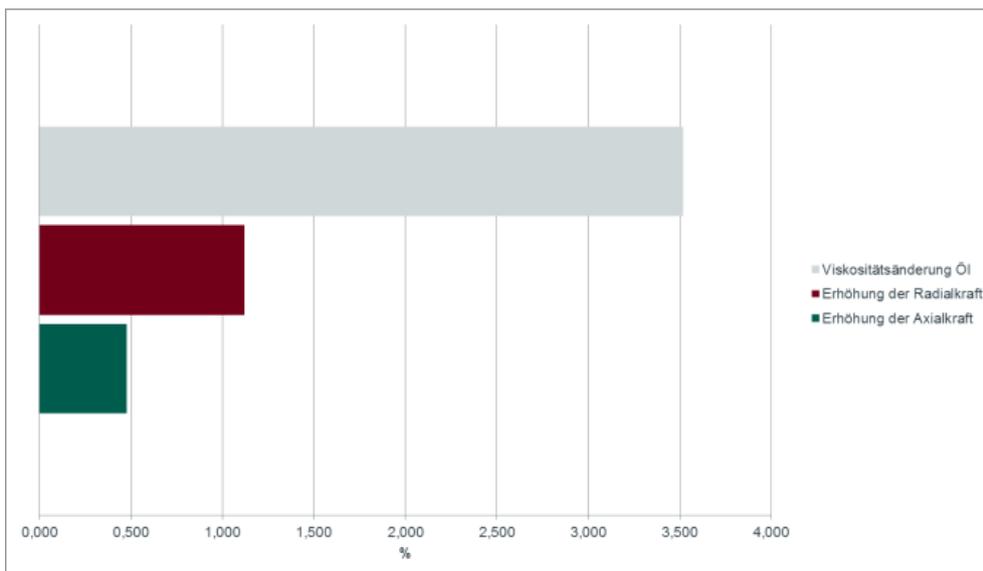


Abbildung 38: Relevante Einflüsse auf die Verlustleistung im Lager beim Trockenaufbau

Abbildung 37 zeigt, dass bei einer kontinuierlichen Erhöhung der Ölstandhöhe H bis zu einem Wert $H/d_m = 1$, eine Erhöhung der Verluste um ca. 570% eintritt. Eine Änderung der temperaturabhängigen Viskosität oder eine Erhöhung der Beanspruchung zeigen im Vergleich nur eine geringe Steigerung der Verluste.

Für die Parametrierung des Modells sind daher die Ölstandshöhe, Öltemperatur sowie die Axial- und Radialkräfte signifikant und für die Berechnung der Reibverluste erforderlich.

2.4 Simulative Untersuchungen der elektrischen Traktionsmaschine

Für eine systematische Optimierung der Maschine werden im Folgenden die Verlustarten definiert und Einflussgrößen in Modellen untersucht und Ergebnisse diskutiert. Die Einflussanalyse wird als Grundlage für die Reduzierung von Verlusten verwendet und ausgehend

von einer zu Beginn des Projekts im Konsortium abgestimmten Referenzmaschine zwei Optimierungsschleifen durchgeführt. Eine thermische Modellierung der Maschinen wird im darauffolgenden Abschnitt erläutert, bevor die Festigkeitsberechnungen mit Fallbeispielen die Simulationen und Auslegung abschließen.

2.4.1 Modellierung und Reduzierung von Maschinenverlusten

Die Verluste in elektrischen Maschinen lassen sich in unterschiedliche Arten von Verlusten einteilen. In der Literatur [22] finden sich unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Einteilung der Verluste in entsprechende Verlustarten sowie in der physikalischen Tiefe Ihrer Beschreibung. An dieser Stelle ist eine Aufteilung auf vier verschiedene Verlustarten vorgenommen worden, deren Entstehung sowie deren weitere Unterteilung im Folgenden kurz erläutert werden soll. Die beschriebenen Verlustarten beinhalten nicht alle theoretisch möglichen Verluste, sondern nur die, die nach derzeitigem Kenntnisstand signifikante Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der Maschine haben.

Kupferverluste

Die Kupfer- oder auch Stromwärmeverluste entstehen durch den ohmschen Widerstandsbeleg der Wicklung der elektrischen Maschine. Bei dem ausgewählten Maschinentyp, der permanentmagneterregten Synchronmaschine, entstehen die Kupferverluste nur im Stator der Maschine, da nur dieser eine Wicklung aufweist. Die Kupferverluste können in 2 Arten aufgeteilt werden. Zunächst die recht einfach zu berechnenden Verluste gemäß der Formel, wie sie derzeit im Standard-Auslegeprozess berechnet werden:

$$P_{Cu} = I^2 * R_{Cu}$$

Des Weiteren entstehen zusätzliche Verluste durch Stromverdrängungsvorgänge in den Leitern der Maschine. Diese können wiederum in zwei unterschiedliche Arten unterteilt werden. Die erste Art, auch Stromverdrängung 1. Ordnung genannt, entsteht durch die ungleichmäßige Aufteilung der Ströme auf parallele Leiter innerhalb der Maschine, dadurch entstehend, dass die parallelen Leiter der Maschine unterschiedliche Flüsse aufgrund des sich innerhalb der Nut ändernden magnetischen Feldes sehen. Die zweite Art der Stromverdrängungsverluste, auch Stromverdrängung 2. Ordnung genannt, entsteht durch die Verdrängung des Stroms innerhalb eines Leiters durch Skin- oder Proximity-Effekte sowie durch den Einfluss des Magnetfeldes der Permanentmagnete.

Für die genannten zusätzlichen Verluste aufgrund von Stromverdrängung wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem es möglich ist diese an einem beliebigen Arbeitspunkt der Maschine zu berechnen. Die Gleichstromverluste sowie die zusätzlichen Verluste aufgrund der Stromverdrängung im Leiter aufgrund Skin- und Proximity-Effekt sowie aufgrund des Permanentmagnetfeldes werden dabei in FEM- gerechnet. Für die unterschiedliche Aufteilung der Ströme auf die parallelen Zweige der Maschine, muss diese über eine externe Schaltung, in der die Speisung der Maschine sowie die parallelen Leiter der Maschine nachgebildet werden, angesteuert werden.

Eisenverluste

Eisenverluste entstehen in elektrischen Maschinen in den ferromagnetischen Bauteilen, also insbesondere im Stator sowie im Rotor der Maschine. Die Verluste entstehen durch die permanente Ummagnetisierung, hervorgerufen durch die in der Maschine umlaufenden Wechselfelder. Die Eisenverluste setzen sich aus zwei unterschiedlichen Verlusten zusammen, den Hysterese- sowie den Wirbelstromverlusten. Die Hystereseverluste entstehen durch die bei der Ummagnetisierung der Weißschen Bezirke zu verrichtende Arbeit. Die Wirbelstromverluste entstehen dadurch, dass der sich ändernde Fluss eine Spannung induziert, die einen Strom im Blech treibt, der entsprechend dem ohmschen Widerstand des Blechs einen Wirbelstromverlust verursacht. Bei der Berechnung der Eisenverluste wird im Auslegeprozess auf eine analytische Näherungsformel zurückgegriffen, da der Aufwand für die Berechnung der tatsächlichen physikalischen Gegebenheiten (Ausrichtung des Elektronenspins aller beteiligter Atome) mittels heutiger Rechen- und Speicherkapazitäten nicht darstellbar ist. Für eine genaue Vorausberechnung müssen die entsprechenden Eisenverluste des verwendeten Blechmaterials über einen weiten Frequenz- sowie Induktionsbereich bekannt sein. Des Weiteren spielt die Bearbeitung des Blechs eine entscheidende Rolle bei der Entstehung der Eisenverluste, da sie die Gefügestruktur in der Nähe der Bearbeitungsstellen verändern und somit die Entstehung der Verluste in diesen Bereichen beeinflussen kann.

Eisenverluste in elektrischen Maschinen teilen sich in Hysterese- und Wirbelstromverluste auf. Beide genannten Eisenverlustarten entstehen durch die periodisch wiederkehrende Ummagnetisierung der Elektrobleche im Betrieb (bei Drehung) der Maschine. Die Hystereseverluste entstehen bei wiederholtem Durchlauf der Hystereseschleife des Blechmaterials. Die prinzipielle Hystereseschleife eines Elektroblechs ist in Abbildung 39 dargestellt. Da die magnetische Flussdichte B bei einem Umlauf der Maschine mehrfach das Vorzeichen wechselt (abhängig von der Polzahl der Maschine) wird die Hystereseschleife entsprechend häufig durchlaufen. Die Hystereseverluste sind näherungsweise der eingeschlossenen Fläche der grünen Hystereseurve des Blechmaterials in Abbildung 39 proportional.

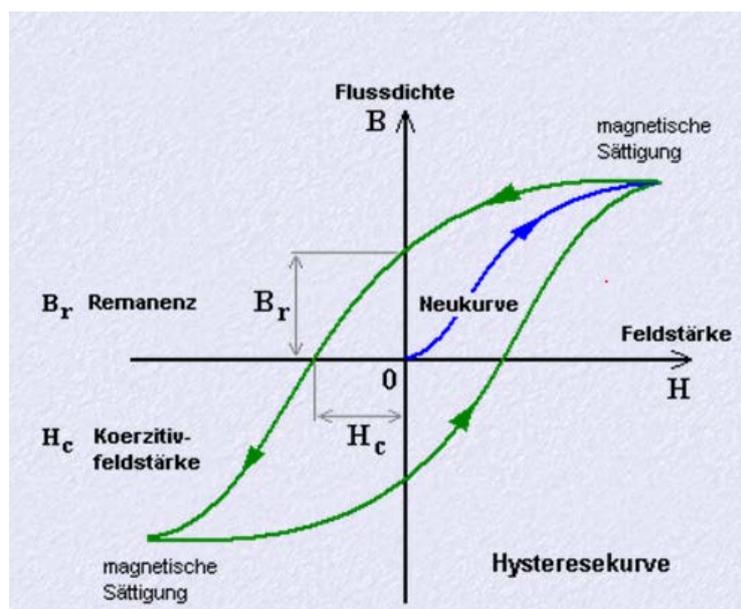


Abbildung 39: Hysteresekurve von Elektroblechen bei wechselnder Magnetisierung (Quelle: [31])

Ein zweiter Eisenverlustanteil in den Elektroblechen entsteht durch induzierte Wirbelströme in den einzelnen Blechlamellen. Abbildung 40 zeigt die prinzipielle Ausbildung der Wirbelstrombahnen in Elektroblechen bei zeitlich veränderlichem Magnetfluss. Ferner wird ein Weg aufgezeigt diesen Verlustanteil durch dünnere Blechlamellen deutlich zu reduzieren, da die möglichen Wirbelstrombahnen verkleinert werden.

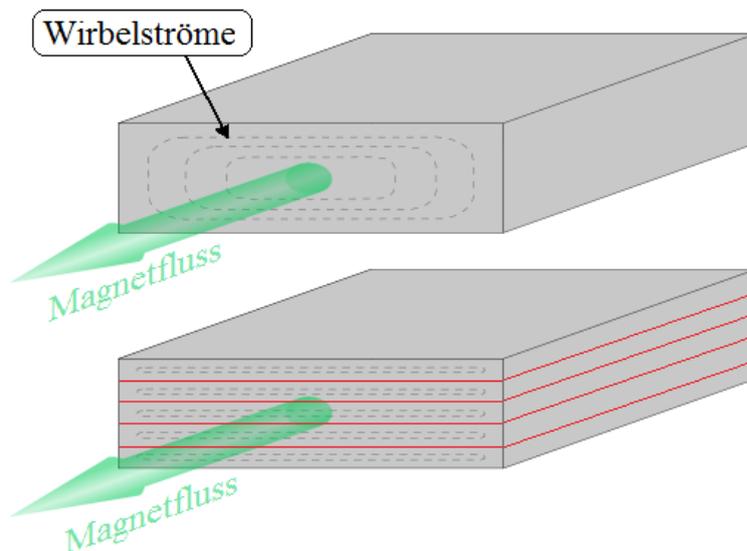


Abbildung 40: Wirbelstrombahnen in ungeblechtem und geblechtem Eisen

Die Berechnung der Eisenverluste in elektrischen Maschinen auf Basis der Steinmetzgleichung erfolgen:

$$P_{fe} = P_{hys} + P_{wirbel}$$

$$P_{fe} = k_{hys} f_1 B_m^2 + k_{wirbel} (f_1 B_m)^2$$

Die Faktoren k_{hys} und k_{wirbel} in oben stehender Gleichung werden aus gemessenen Verlustkennlinien im Epsteinrahmen und Erfahrungswerten der Elektromaschinenbauer bzgl. zusätzlicher Bearbeitungsfaktoren (Stanzgrate der Nuten etc.) bestimmt. Der Epsteinrahmen dient zur Vermessung einzelner Blechlamellen bei variabler magnetischer Flussdichte B_m und monofrequenter sinusförmiger Speisung mit unterschiedlichen Frequenzen f_1 .

Mechanische Verluste

Unter mechanischen Verlusten werden alle auftretenden Verluste, die durch eine Art von Reibung entstehen, zusammengefasst. Reibung entsteht in elektrischen Maschinen unter anderem in den Lagern und durch Luftreibung am sich drehenden Rotor sowie, falls vorhanden, durch einen mit angetriebenen Lüfter. Die mechanischen Verluste sind drehzahlabhängig und werden daher in der Optimierung der Verluste durch den zu entwickelnden Regelungsalgorithmus keine zentrale Rolle einnehmen. Die mechanischen Verluste müssen nur

insofern in die Sollwertgenerierung des Regelungsalgorithmus mit einfließen, da sie ein Lastmoment darstellen, das zur korrekten Drehmomentstellung mit berücksichtigt werden muss. Die mechanischen Verluste können aus Herstellerangaben der eingesetzten Lager oder ggf. des Lüfters relativ einfach bestimmen.

Magnetverluste

Unter Magnetverlusten versteht man ohmsche bzw. Leitverluste, die durch einen Strom im Magnetmaterial verursacht werden. Dieser entsteht durch zeitliche und räumliche Magnetfeldänderungen, die Spannungen im Magneten induzieren, die einen Kreisstrom im Magneten treiben, der der Magnetfeldänderung entgegenwirkt. Da die Magnete in der Maschine nicht, in Analogie zum Eisenkreis, geblecht bzw. auf viele dünne Segmente aufgeteilt, ausgeführt werden können, sind die Wirbelstrombahnen, auf denen sich die Wirbelströme schließen, relativ groß. Das bedeutet, dass entlang der Strombahn eine relativ hohe Spannung abfällt die wiederum einen relativ hohen Strom treiben kann.

Möglichkeiten zur Verringerung der Wirbelströme liegen in der Verkleinerung der Magnetfeldänderungen innerhalb des Magneten, z.B. durch Verringerung der Oberwellen im Rotor oder in der Eindämmung/Verkleinerung der Strompfade, z.B. durch eine gewisse Segmentierung der Magnete.

Da eine Magnetverlustberechnung in einer elektrischen Maschine mittels der genauen 3D-FEM-simulation aufgrund der extrem langen Rechenzeiten nicht in Frage kommt (die Berechnung eines Arbeitspunktes über eine elektrische Periode dauerte über eine Woche), ist zu untersuchen, ob mittels der 2D-FEM-Simulation nicht hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können.

Ein anschauliches Modell eines Magneten ist in Abbildung 41 zu finden. Es ist zu erkennen, dass der Wirbelstrompfad in der 2D-Berechnung lediglich in der z-Achse liegt.

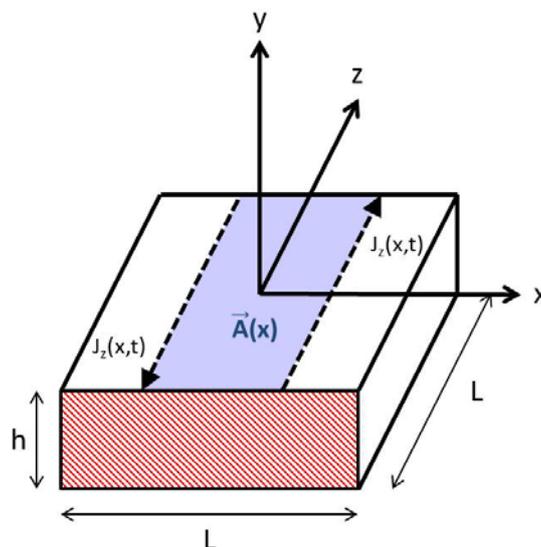


Abbildung 41: Skizze eines Magneten mit dem Stromdichteverlauf einer 2D-FEM-Simulation

Unter der Annahme, dass im Magneten ein räumlich homogenes magnetisches Wechselfeld wirkt, kann gezeigt werden, dass die Verlustleistung im Magneten

$$P_{2D}(t) = \frac{1}{12} \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot \cos^2(\omega t) \cdot h \cdot L^4$$

beträgt.

Vergleicht man dies mit den Verlusten, die innerhalb eines Magneten der in 3D-FEM modelliert wurde, entstehen deutlich geringere Verluste. Es ist zu beachten, dass für die Herleitung der Verluste auf einen zylinderförmigen Magneten mit gleicher Grundfläche und Höhe zurückgegriffen wurde, da sich in ihm kreisförmige Wirbelstrombahnen ausbilden. In rechteckigen Magneten bilden sich wesentlich kompliziertere Wirbelstrombahnen aus, die eine analytische Herleitung erschweren. Die entstehenden Verluste in der 3D-Berechnung ergeben sich zu:

$$P_{3D}(t) = \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot \cos^2(\omega t) \cdot h \cdot L^4.$$

Es ist deutlich abzulesen, dass die in 2D berechneten Magnetverluste um mehr als den Faktor 2 von denen der 3D Simulation abweichen. Aus diesem Grund ist eine Abschätzung der Magnetverluste über eine 2D-Berechnung durchaus möglich, da die Verluste zu hoch abgeschätzt werden und dadurch im schlimmsten Fall eine Überdimensionierung der Magnete stattfindet, jedoch keine Unterdimensionierung die im Betrieb zu einer Entmagnetisierung der Magnete führen könnte. Vor dem Hintergrund der genauen Wirkungsgradabschätzung muss allerdings eine Lösung für die Anpassung der 3D-Berechnungsgenauigkeit auf die wesentlich schnellere 2D-Berechnung durchgeführt werden.

Dazu wurde ein kombiniertes Verfahren aus einer 2D-FEM-Berechnung mit einer analytischen Berechnung entwickelt. Dabei wird in einer 2D-Simulation die Normalkomponente der magnetischen Flussdichte im Magneten bestimmt. Diese Daten werden in ein externes Matlab-Programm exportiert, wo dann die analytischen Berechnungen der Verluste im Magneten durchgeführt werden.

Die Kombination von 2D-FEM Berechnung mit zweidimensionaler analytischer Berechnung bietet auf den ersten Blick keine Verbesserung zur reinen 2D-FEM-Berechnung, da für beide Verfahren dieselben Einschränkungen gelten. Allerdings bietet diese Methode den Vorteil schnelle Änderungen in der Magnetgeometrie, wie z.B. eine Segmentierung, einfließen zu lassen, ohne dass es einer erneuten FEM-Simulation bedarf. Zum anderen lässt sich das entstandene Programm leicht modifizieren, da alle Rechengrößen zugänglich sind, so soll der durch 2D-FEM-Berechnung entstehende Fehler durch Aufnahme von Messdaten korrigiert werden (siehe Kapitel 2.7).

Zusätzliche Verluste durch den Umrichterbetrieb

Um einen drehzahlvariablen Betrieb des Antriebsystems herstellen zu können, wird die elektrische Maschine im Fahrzeugantrieb an einem Spannungszwischenkreisumrichter betrieben. Dieser beaufschlagt die Maschine, entgegen der Berechnung, nicht mit sinusförmigen Spannungen was dazu führt, dass sich nicht-sinusförmigen Ströme in der Maschine ausbilden. Die Umrichterspannung, die an die Klemmen der Maschine angelegt wird hat einen rechteckigen Verlauf, dessen arithmetisches Mittel sich sinusförmig ändert. Der Stromverlauf in

der Maschine wird dank der Tiefpasscharakteristik der Wicklung zwar nahezu sinusförmig, allerdings ist der Sinusform ein sogenannter Rippelstrom überlagert, der zusätzliche Eisen- als auch Kupferverluste verursacht. Es zeigt sich, dass die Eisenverluste bei Betrieb mit sinusförmigen Strömen wesentlich geringer sind, als im PWM-Betrieb. Weiterhin deuten die ersten Untersuchungen darauf hin, dass dieser Effekt mit steigender Drehzahl abnimmt. Detaillierte Untersuchungen hierzu wurden beim Projektpartner Universität Paderborn durchgeführt.

2.4.2 Thermische Modellierung

Mit Hilfe eines thermischen Modells können die Temperaturen in den Wicklungen sowie im Stator der E-Maschine bestimmt werden. Für die Beschreibung des thermischen Verhaltens der E-Maschine ist es wichtig gute Kenntnis über die auftretenden Verluste zu haben, da diese das thermische Verhalten maßgeblich beeinflussen. Das thermische Verhalten der E-Maschine muss aus mehreren Gründen möglichst genau beschrieben werden:

- zur Auslegung der E-Maschine für Überlastbetrieb sowie Bestimmung der dauerhaft zur Verfügung stehenden Leistung
- zur Auswahl der zu verwendenden Materialien, damit es in allen Betriebspunkten der Maschine zu keiner thermischen Beschädigung der Materialien / Bauteilen der Maschine kommt
- Zur genaueren Bestimmung der Verluste innerhalb der E-Maschine, da viele der genannten Verlustarten temperaturabhängig sind

Für den ersten Schritt wird das thermische Modell der Maschine mit einer geringen Anzahl thermischer Elemente angenommen. Es umfasst zunächst nur eine Modellierung der Statorverluste und prognostiziert die Temperaturentwicklung in den Statorwickelköpfen zunächst stationär. Abbildung 42 zeigt das dem thermischen Modell zugrunde liegende thermische Netzwerk. Es besteht aus einem Knotenpunkt T_w , der die Temperatur im Wickelkopf der Maschine repräsentiert und in den die Verlustleistung der Kupferverluste eingepreßt wird. Dieser Punkt ist über den thermischen Widerstand R_{bw} mit dem Stator T_b verbunden. Am den Stator repräsentierenden Ort T_b wird die Eisenverlustleistung P_{fe} eingepreßt. Der Stator ist über den thermischen Widerstand R_{bk} mit dem Kühlmantel T_k verbunden.

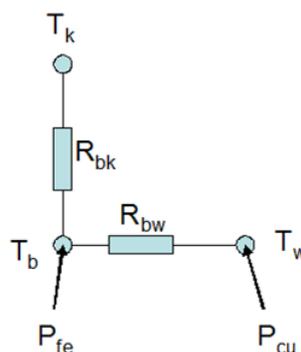


Abbildung 42: Thermisches Netzwerk zur Bestimmung der Temperaturverläufe innerhalb der E-Maschine

Nach erfolgreichem Abgleich mit Messdaten (siehe Kapitel 2.7), konnte dann das thermische Modell weiterentwickelt werden, um zum einen weitere Bauteile der Maschine mit in das Modell aufzunehmen und zum zweiten durch das Einführen von thermischen Kapazitäten das dynamische Verhalten der Maschine nachzubilden.

Die in Abbildung 43 dargestellten thermisch relevanten Bestandteile dieses weiterentwickelten thermischen Modells der elektrischen Maschine sind, von außen nach innen betrachtet: Das Kühlmedium (0) das sich im Kühlmantel des Gehäuses (1) befindet. Hier anliegen befindet sich das Statorjoch (2), daran anschließend die Statorzähne (3). Neben den Zähnen befinden sich die Statornuten mit den darin befindlichen Wicklungen der elektrischen Maschine (4 & 6). Die Wicklung endet nach axial-außen im Wickelkopf (5 & 7). Nach radial-innen folgen dann noch nach dem Luftspalt das Rotorblech (8) mit den darin befindlichen Magneten (10) sowie die Rotorwelle (9).

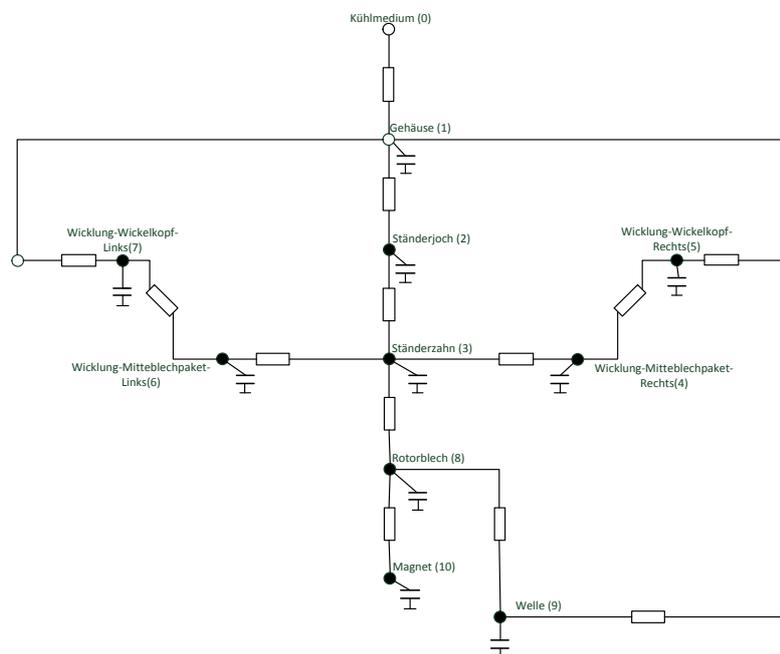


Abbildung 43: Detailliertes thermisches Netzwerk der E-Maschine mit thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten zur stationären sowie transienten Temperatursimulation

Die Berechnung der stationären Temperaturen geschieht nun, unter der Annahme, dass sich die Temperaturen im stationären Betriebspunkt nicht mehr ändern, also $\frac{dT_x}{dt} = 0$. Die so ermittelten Temperaturen können dann anhand von Temperaturmessungen an der Maschine im Dauer-Betrieb validiert und abgeglichen werden. Hierzu wurden eine Reihe von Iterations-schleifen für den Abgleich von thermischer Berechnung mit den Messdaten durchgeführt. Dabei werden die berechneten thermischen Widerstände, die auf Grundlage physikalischer Gegebenheiten (Geometrie, Materialeigenschaften) zunächst bestimmt wurden, in kleinen Grenzen angepasst, um den gemessenen Temperaturverlauf möglichst genau abzubilden. Die erste Bestimmung der thermischen Widerstände kann aufgrund vereinfachender Annahmen fehlerbehaftet sein und eine Korrektur ist daher teilweise notwendig. Der Abgleich findet mit möglichst vielen Temperaturmesspunkten und unterschiedlichen Betriebspunkten statt, um die Genauigkeit des Modells für unterschiedliche Messorte und Betriebspunkte abzugleichen und zu verbessern.

Für den transienten Abgleich des Modells wurde, nach dem Abgleich des stationären Verhaltens, durch Aufnahme einer Reihe von Messreihen und Vergleich mit den theoretisch ermittelten Werten der thermischen Kapazitäten in Analogie zur Bestimmung des stationären Verhaltens vorgegangen.

2.4.3 Festigkeitsberechnung

Die mechanische Festigkeit des Rotors ist ein sicherheitsrelevantes Kriterium bei der Neuauslegung / Optimierung insbesondere von elektrischen Maschinen für Hochdrehzahlenanwendungen. So wirken mehrere Faktoren in die Rotorfestigkeit ein:

- Material von Rotor, Rotorwelle, Magneten, Magnetklebstoff
- Betriebstemperaturen
- Betriebsdrehzahlen
- Art der Magnetverklebung

Besonders folgende Aspekte sind bei der Festigkeitsberechnung des Rotors einer elektrischen Maschine wichtig:

- Spannungen und Dehnungen in den Materialien des Rotors, um deren Festigkeit beurteilen zu können
- Aufweitungen des Rotorblechs durch Temperatur- und Drehzahleinfluss, der zu einer Verringerung des Luftspaltes und damit im schlimmsten Fall zu einem Kontakt mit dem Stator der Maschine führen kann

Die Berechnungsergebnisse der durchgeführten Festigkeitsberechnungen zeigen, dass die maximalen Spannungen innerhalb des Blechschnitts zwischen großen Kavitäten und Luftspalt auftreten, da hier das Rotorblech aufgrund der Fliehkraftbelastung am stärksten deformiert und die Materialdicke am geringsten ist. Die größte Deformation aufgrund der Fliehkraft liegt in der Mitte des Blechschnitts in der d-Achse der Maschine.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse allerdings, dass die Belastungen des Rotorblechschnitts nicht die Festigkeitswerte des eingesetzten Materials überschreiten und somit nicht von einem mechanischen Versagen auf dem Prüfstand ausgegangen werden kann.

In einer weiteren Simulation werden 3 unterschiedliche Lastfälle und deren Wechselwirkung betrachtet:

1. Drehzahlbelastung und dadurch auftretende Fliehkräfte:

Die Belastungen wurden dabei sowohl für die maximale Betriebsdrehzahl, als auch für die 20% höher liegende Schleuderdrehzahl bestimmt sowie unterschiedliche Verhaltensweisen des Magnetklebstoffs (mit / ohne Ablösung) betrachtet.

2. Belastung durch Temperaturerhöhung

Neben dem Betrieb bei Umgebungstemperatur wurde auch der Fall der maximal zulässigen Betriebstemperatur auf die Rotorfestigkeit untersucht. Bei Temperatureinwirkung kommen die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien zum Tragen.

3. Einfluss der axialen Lage der Rotorsegmente auf der Rotorwelle

Die Rotorwelle weist auf ihrer axialen Länge unterschiedliche Steifigkeiten auf, was einen Einfluss auf das Dehnungsverhalten der Rotorsegmente haben kann. Aus diesem Grund wurde dieser Einfluss durch unterschiedliche Wellendurchmesser abgebildet.

Einige Ergebnisse der Berechnung werden exemplarisch im Folgenden dargestellt, das Gesamtergebnis zeigt keine kritischen Belastungen des Rotors für die Prüfstandsversuche.

Die nachfolgende

Abbildung 44 zeigt die Mises-Vergleichsspannung an den drei am stärksten belasteten Auswertestellen (AW1 bis AW3) des Rotors. Die Berechnung wurde sowohl für den linear-elastischen als auch für den elastisch-plastischen Fall durchgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im linear-elastischen Fall die Vergleichsspannungen wesentlich größer sind als im elastisch-plastischen Fall. Dies liegt an der im 2. Fall auftretenden plastischen Dehnung des Materials, die zu einer Verringerung der Spannung führt. Die auftretende Dehnung liegt allerdings in einem so geringen Bereich, weit unterhalb der Streckgrenze des Materials, so dass es nicht zu kritischen Dehnungen im Material kommt.

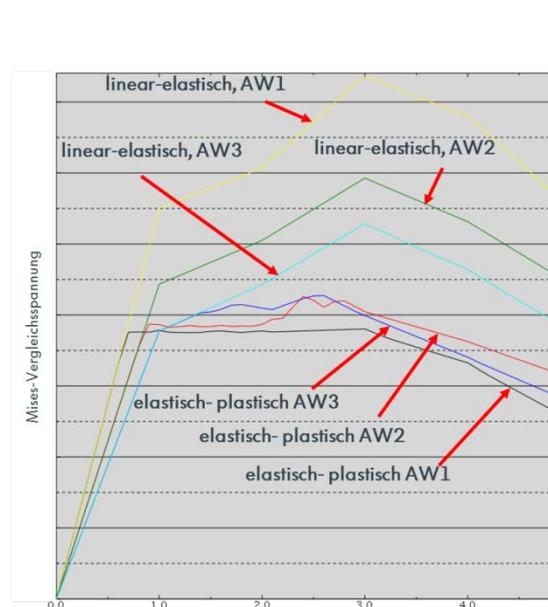


Abbildung 44: Mises-Vergleichsspannung an den 3 am stärksten belasteten Auswertestellen des Rotors bei linear elastischer sowie bei elastisch-plastischer Rechnung

In

Abbildung 45 ist gezeigt, wie sich der Rotor unter Drehzahlbelastung bei Maximaldrehzahl verformt. Dabei wurden verschiedene Fälle der Magnetbefestigung, mit und ohne Klebstoff, untersucht. Der Fall ohne Klebstoff spiegelt dabei den Fall wieder, dass die Klebewirkung

über die Betriebsdauer der Maschine nachlässt, bzw. im schlimmsten Fall vollständig versagt. Hierbei treten die größten radialen Verformungen des Außendurchmessers des Rotors der Maschine ein. Unter Berücksichtigung aller Toleranzen ist allerdings auch für diesen Betriebsfall gewährleistet, dass es zu keiner Überschneidung von Stator und Rotor kommt.

Außerdem ist in

Abbildung 45 zu erkennen (Linien im Unteren Teil des Diagramms), dass nach Drehzahlbeanspruchung keine wesentliche plastische Dehnung stattgefunden hat, die Drehzahlbelastung also nur zu einer elastischen Verformung des Rotors geführt hat.

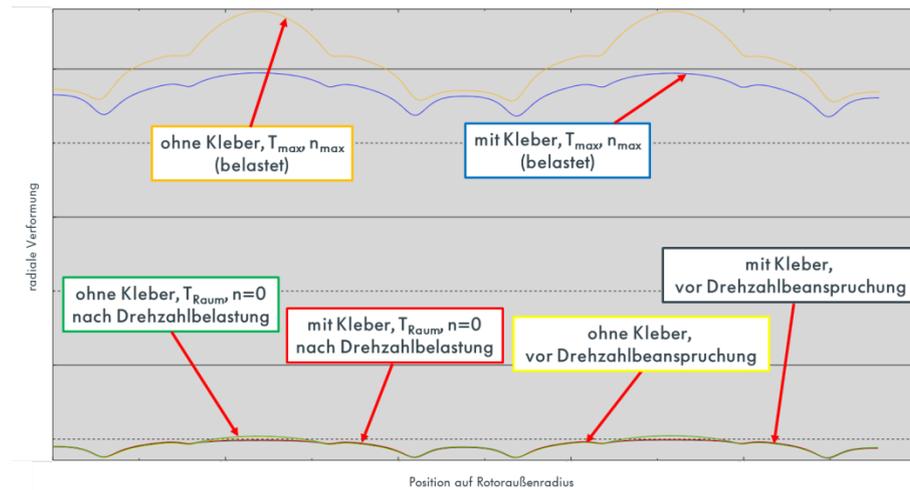


Abbildung 45: Radiale Verformung des Rotoraußendurchmessers bei maximaler Betriebsdrehzahl mit und ohne Magnetklebstoff

2.5 Aufbau und Inbetriebnahme eines Demonstrators

Die Maschinen der 1. und 2. Iterationsstufe sowie die Referenzmaschine wurden mit den folgenden wesentlichen Fertigungsschritten gefertigt:

- Stator- und Rotorlamellenfertigung
- Statormontage
- Rotormontage
- Endmontage / Zusammenbau

Neben dem Aufbau wurden zahlreiche Temperatursensoren eingebaut. Das Wissen um die Temperaturen der elektrischen Maschine im Betrieb ist essentiell, um entstehende temperaturabhängige Verluste genauer bestimmen zu können. Außerdem haben insbesondere die Temperaturen in den Magneten einen Einfluss auf die Haltbarkeit der Magnete. So kann es vorkommen, dass die Magnete im Fehlerfall durch zu hohe Temperaturen beschädigt werden und sich damit das Betriebsverhalten sowie damit auch die Verluste der elektrischen Maschine ändern. Um diese Vorgänge beurteilen zu können, wurden ebenfalls Sensoren in der Nähe der Magnete der Maschine vorgesehen.



Abbildung 46: Beispiel eines temperatursensierten Rotors, aufgebaut bei der Universität Kassel, Fachgebiet FSG

Zur Überprüfung der Fertigungsqualität wird bereits im Fertigungsprozess nach Fertigstellung des Stators sowie nach Fertigstellung des Gesamt-Antriebs eine elektrische Vermessung durchgeführt. Nur bei bestandener elektrischer Messung kann die Maschine auf dem Prüfstand in Betrieb genommen werden. Die elektrische Messung beinhaltet unter anderem:

- Temperatur
- Widerstandsmessung und Streuung
- Induktivitätsmessung und Streuung
- Isolationswiderstandsmessung sowohl der Wicklungsstränge als auch der verbauten zusätzlichen Sensorik
- Surge-Test
- Teilentladungseinsetzspannungsmessung

Die durchgeführten elektrischen Messungen sollen die Sicherheit auf dem Prüfstand gewährleisten sowie mögliche Fehler im Fertigungsprozess aufdecken sowie die Möglichkeit dazu geben, Fehler nachträglich zu beheben. Die beschriebenen Prüfungen wurden für jede der im Projekt aufgebauten E-Maschinen durchgeführt und dokumentiert.

2.6 Experimentelle Untersuchung

Ein neues Verfahren zur modellbasierten Wirkungsgradmessung leitet dieses Kapitel ein und stellt neue Werkzeuge für den Versuch der elektrischen Maschine vor.

Danach folgen Darstellungen zur Validierung der durchgeführten Berechnungen. Dazu wurden ausführliche Prüfstandsläufe durchgeführt, in denen etliche Prüfparameter aufgenommen wurden. Hierzu gehörten unter anderem die abgegebenen Drehmomente in verschiedenen Betriebszuständen (z.B. Maximal- und Dauerleistung), Wirkungsgrad- und Verlustbestimmung, Kurzschlussuntersuchungen sowie thermische Untersuchungen mit den thermosensierten Maschinen. Des Weiteren wurden Untersuchungen an Subkomponenten durchgeführt.

Beispielhaft werden im Folgenden die Untersuchungen zum Abgleich der thermischen Modelle sowie Untersuchungen zu den Verlusten in den Permanentmagneten einer elektrischen Maschine dargestellt.

2.6.1 Verfahren zur modellbasierten Bestimmung von Messabweichungen

Das Verfahren zur Bestimmung der Messabweichungen basiert auf den Erläuterungen aus Kapitel 2.3 und setzt sich aus vier Phasen zusammen. In der ersten Versuchsphase wird die zu verwendende Messkette inkl. der Prüfanforderungen näher betrachtet und je nach Anforderungen ausgewählt. Mit Hilfe einer entwickelten Software wird die Messunsicherheit der Leistungsmessketten für jeden Betriebspunkt berechnet und in einem gewünschten Format (.mat, .xls) ausgegeben. Mit dieser Vorbereitung werden die erwarteten stochastischen Abweichungen berücksichtigt. In der späteren Versuchsdurchführung werden parallel zu den leistungsrelevanten Messungen zusätzlich die Messunsicherheitsrelevanten Parameter (z.B. Sensortemperaturen) aufgezeichnet und die Modelle parametrisiert.

Für die Korrektur von systematischen Abweichungen wird in der Kalibrier- und Inbetriebnahmephase die Sensormodellierung inkl. Kennlinienabgleich vorgesehen. Für die Erhöhung der Vergleichbarkeit zwischen Messungen empfiehlt sich ein Vorversuch, indem in einem Leerlaufversuch die elektromotorische Kraft erfasst wird. Damit lässt sich bei einem späteren Vergleich eine Wirkungsgraddifferenz z.B. aufgrund einer Entmagnetisierung plausibilisieren. Weitere systematische Abweichungen wie Leistungsverluste bei Prüfstandsaufbauten lassen sich in den Voruntersuchungen bestimmen. Die Messorte der mechanischen und elektrischen Leistung bestimmen zugleich die auftretenden Verluste. Somit ist die Energiebilanz genau zu betrachten und die Verluste der Hochvoltleitung im Falle einer entfernten Spannungsmessung genauso zu berücksichtigen wie die Verluste durch z.B. Lagerreibung in der Prüfstandsadaption.

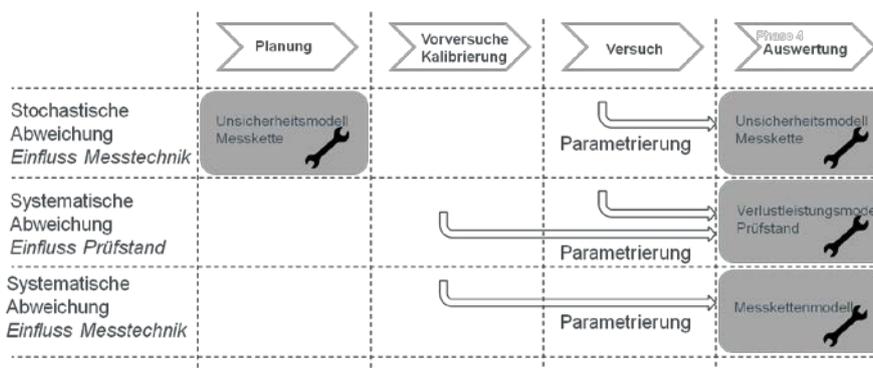


Abbildung 47: Modellbasierte Bestimmung der Messabweichungen

2.6.2 Validierung der thermischen Modelle

Der Abgleich des berechneten und auf dem Prüfstand gefahrenen Drehmoments der Maschine ist nahezu identisch, siehe Abbildung 48. Dies erlaubt einen Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen in den jeweiligen Betriebspunkten.

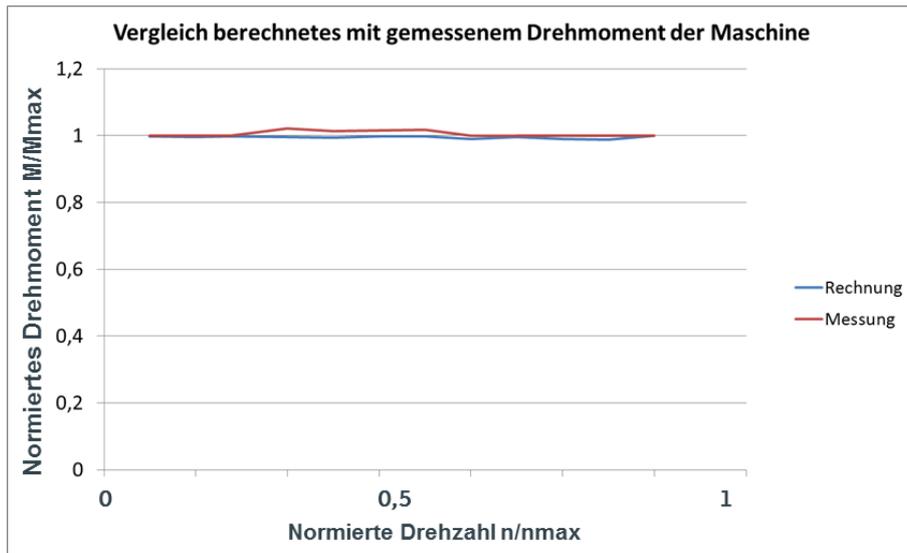


Abbildung 48: Vergleich berechnetes mit auf dem Prüfstand gemessenem Drehmoment

Der Abgleich der thermischen Berechnung mit Hilfe des oben beschriebenen thermischen Modell mit thermischen Prüfstandsmessungen, dargestellt in Abbildung 49, zeigt eine gute Korrelation von Berechnung und Messung, obwohl das genutzte thermische Modell lediglich aus drei Knotenpunkten, zwei thermischen Widerständen sowie zwei Wärmequellen besteht.

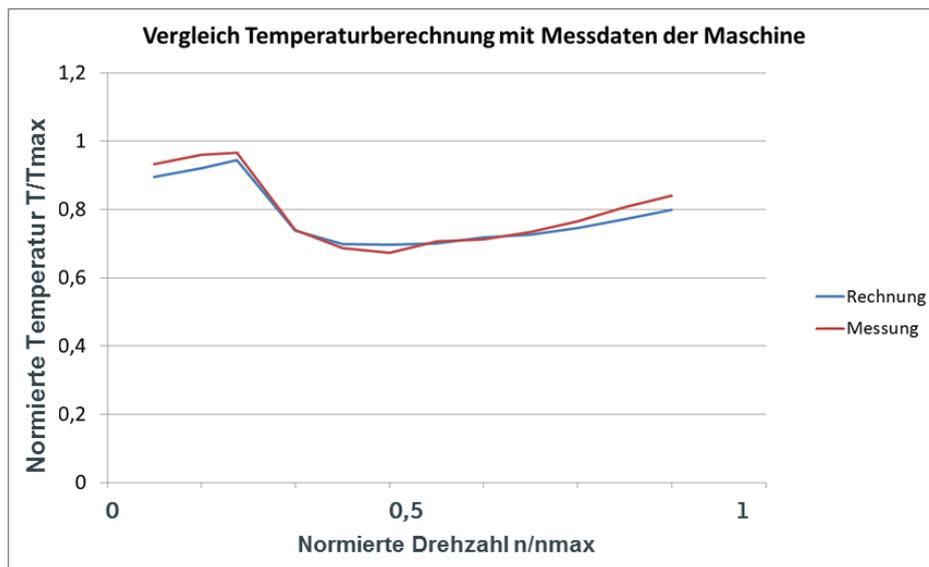


Abbildung 49: Vergleich berechneter und gemessener Temperatur im stationären Zustand der E-Maschine über den gesamten Betriebsbereich

Die erkennbaren Abweichungen liegen in einem akzeptablen Bereich unterhalb 5%. Aus diesem Grund erscheint das aufgestellte thermische Modell für die Weiterentwicklung hin zu einem dynamischen Modell mit Betrachtung aller Maschinenkomponenten als sehr gut geeignet.

Die mit diesem Temperaturmodell im stationären Bereich erreichbaren Temperaturvorausagen sowie eine der zugehörigen Messungen, werden in Abbildung 50 und Abbildung 51 vorgestellt und mit der Temperaturvorausberechnung sowie der Messung mit dem vereinfachten thermischen Modell aus Kapitel 2.4.2 verglichen.

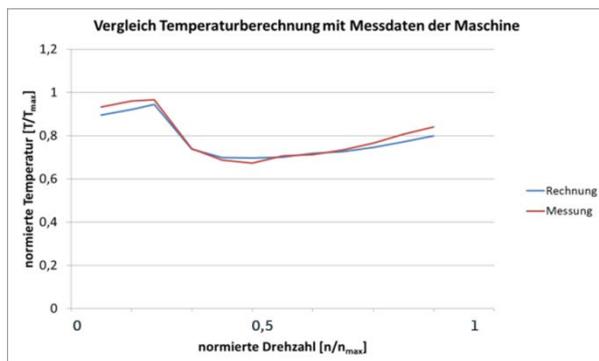


Abbildung 50: Temperaturvorausberechnung und Messung mit Hilfe des im 2. Zwischenbericht 2013 dargestellten „einfachen“ thermischen Netzwerks

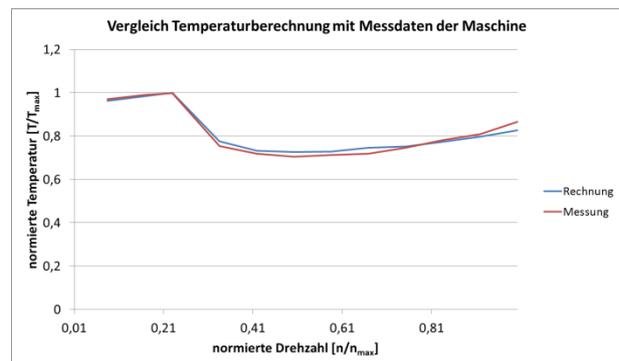


Abbildung 51: Temperaturvorausberechnung und Messung mit Hilfe des weiterentwickelten thermischen Netzwerks

In den beiden vorstehenden Abbildungen ist zu erkennen, dass durch die genauere Modellierung der elektrischen Maschine mit Hilfe des detaillierteren Modells die schon sehr gute Genauigkeit des ersten Modells noch verbessert werden konnte. So ist insbesondere im Grundstellbereich die Genauigkeit nochmals verbessert worden, auch für den hohen Feldschwächbereich ist diese Genauigkeitsverbesserung festzustellen. Allerdings gibt es noch geringe Abweichungen zur Messung. Eine Erklärung hierfür liefert Abbildung 52. So ist im oberen Drehzahlbereich das Drehmoment in der Messung größer, als in der Rechnung angenommen. Somit kann der größere, dafür benötigte Strom, zu den erhöhten Verlusten und damit Temperaturen geführt haben.

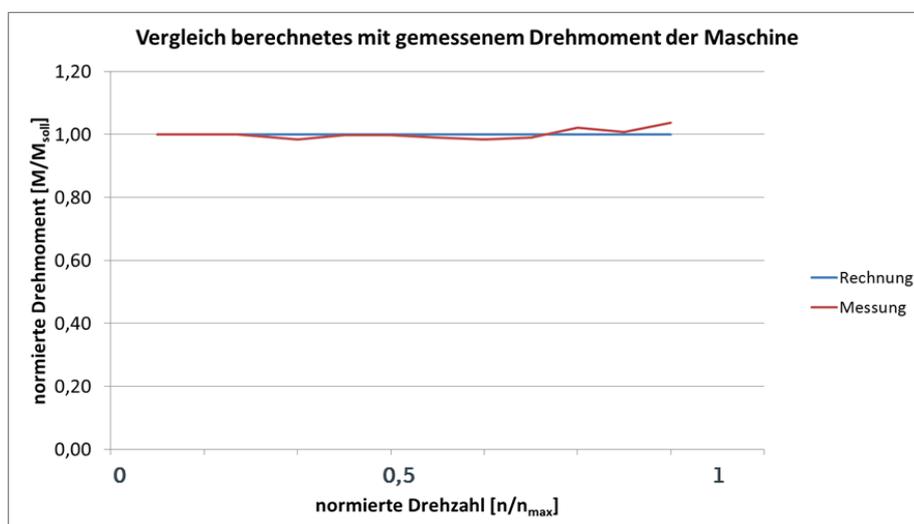


Abbildung 52: Vergleich des Solldrehmoments/berechneten Drehmoments mit dem auf dem Prüfstand während der Temperaturmessung gemessenen Drehmoment

2.6.3 Verlustmessungen

Da die Verluste, die innerhalb eines Magneten entstehen, nicht innerhalb der Maschine gemessen werden können (Gründe hierfür liegen in der fast unmöglichen Zugänglichkeit sowie der schnellen rotatorischen Bewegung des Rotors) und die genaue Verlustberechnung in 3D

viel zu zeitaufwändig ist, ist ein Prüfaufbau zur Vermessung der Verluste innerhalb des Magneten entwickelt worden (siehe Abbildung 53).

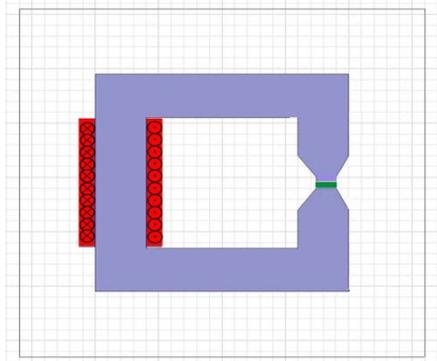


Abbildung 53: 2D-Modellierung des Versuchsaufbaus zur thermischen Vermessung der Magnetverluste

Mit Hilfe dieses Prüfaufbaus kann das kombinierte Verfahren zur Berechnung der Magnetverluste mit 2D- sowie 3D-Berechnungen abgeglichen und auch anhand thermischer Messungen validiert werden. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Verhältnisse des Magneten innerhalb der Maschine zu gewährleisten, wird die Versuchsgeometrie an die Maschinengeometrie angepasst. Die räumliche sowie zeitliche Verteilung der Flussdichte im Magneten innerhalb der Maschine ist in Abbildung 54 dargestellt.

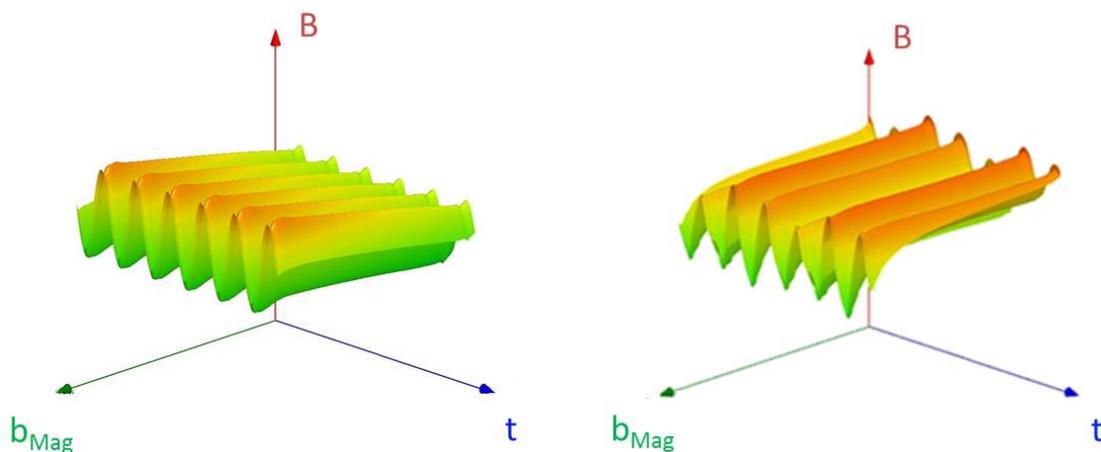


Abbildung 54: Flussdichteverlauf auf der Oberfläche des Magneten im Versuchsaufbau (links) sowie innerhalb der Maschine (rechts)

Es ist zu erkennen, dass der Flussdichteverlauf nicht exakt übereinstimmt, allerdings stimmen die wichtigsten Charakteristika der magnetischen Flussdichte wie Amplitude, Steigung der B-Feldänderung sowie Frequenz überein. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das aus den Verlusten bestimmte Modell der Magnetverluste gut auf die Verhältnisse innerhalb der Maschine übertragen werden kann.

Zu dem in Abbildung 53 dargestellten zweidimensionalen Versuchsaufbau mit Magnet, ist dieser auch in 3D modelliert worden. Mit Hilfe dieser Modelle wurden die Verluste im Magneten in 2D, 3D sowie mit Hilfe einer entwickelten kombinierten Methode berechnet. Die Be-

rechnung wurde für unterschiedlich segmentierte Magnete mit allen drei Berechnungsmethoden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 1.

In [W]		$P_{\text{mag}} \text{ 3D}$	$P_{\text{mag}} \text{ 2D}$	$P_{\text{mag}} \text{ Kombi}$
Segmentierungen				
	1t	4,54	10,27	10,71
	2t	1,66	2,61	2,75
	3t	0,79	1,18	1,18
	1t*2a	2,01	10,27	10,71
	2t*2a	1,09	2,61	2,75
	3t*2a	0,60	1,18	1,18
	2f	13,48	20,53	21,42
	3f	22,75	30,80	32,13
	4f	32,01	41,07	42,83

Tabelle 1: Übersicht der berechneten Magnetverluste

Es sind sowohl die wesentlich kleineren Verluste in der 3D-Berechnung zu erkennen, als auch die relativ gute Übereinstimmung der berechneten Verluste in 2D verglichen mit der entwickelten kombinierten Methode. Dieses Ergebnis war so zu erwarten. Um zu einer genaueren Abschätzung der Magnetverluste in der kombinierten Berechnung zu gelangen, müssen im nächsten Schritt die Rechenergebnisse durch Versuche am Magneten validiert werden. Ein entsprechender Aufbau in Abbildung 55 wird im Folgenden näher erläutert.



Abbildung 55: Versuchsaufbau zur Messung der Magnetverluste aus dem thermischen Verhalten des Magnets

Der Versuchsaufbau besteht aus einem geblechten Eisenkern, der auf einer Seite mit einer Spule umwickelt ist. Der zu vermessene Permanentmagnet wird in den Luftspalt der Anordnung eingebracht. Um die Messergebnisse möglichst realitätskonform zu gestalten, wurde der Magnet durch eine isolierende Kunststoffschicht mit geringer Wärmeleitung zum Eisenkreis isoliert, andernfalls wäre ein Teil der durch die Magnetverluste erzeugten Wärme in den Eisenkreis abgefließen und hätte nicht von den am Magneten angebrachten Temperatursensoren gemessen werden können. Um die optimale Anordnung der Temperatursensoren am Magneten zu erhalten, wurden unterschiedliche Messungen mit veränderlichen Sensoranordnungen, isolierenden Zwischenschichten, Einsatz von Wärmeleitpasten etc. durchgeführt.

Die Messung wurde bei ein und demselben Arbeitspunkt durchgeführt, so dass die Magnete immer mit denselben magnetischen Induktionen beaufschlagt wurden. Die mittels der Temperatursensoren aufgenommenen Temperaturverläufe zeigt exemplarisch Abbildung 56.

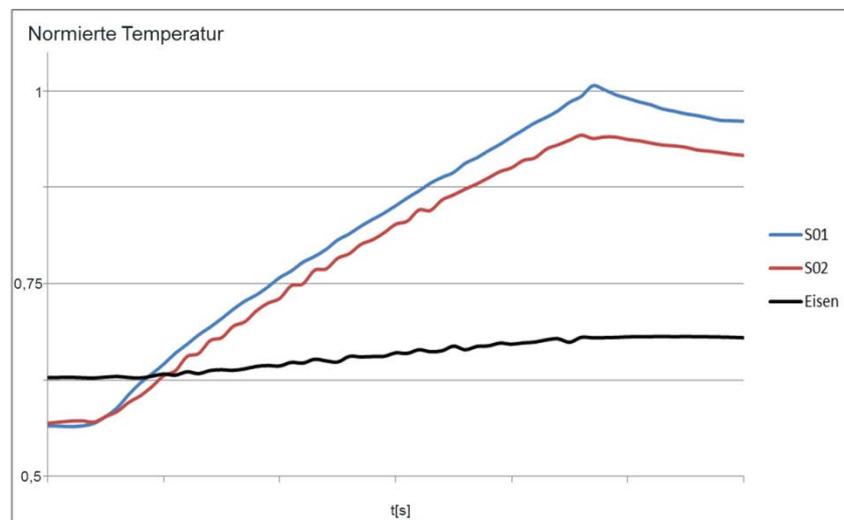


Abbildung 56: Temperaturverlauf an zwei Temperatursensoren am Magneten bei Beaufschlagung mit magnetischem Wechselfeld

Die Verlustleistung im Magneten kann nun mit Hilfe eines thermischen Netzwerkes aus dem Temperaturverlauf der beiden Sensoren berechnet werden.

Zur Bestimmung der Verlustleistung im Magneten sind Kenntnisse der Temperatur des Eisenkreises notwendig. Außerdem müssen der thermische Übergangswiderstand zum Eisen und die Wärmekapazität des Magneten bekannt sein. Aus diesem Grund enthalten die Messdaten, wie in Abbildung 56, die während des Versuchs aufgenommene Eisentemperatur. Der Übergangswiderstand und die thermische Kapazität des Magneten können aus den geometrischen Gegebenheiten des Aufbaus sowie aus den Kenndaten der verwendeten Materialien berechnet werden.

Es ergeben sich aus den Temperaturverläufen der zwei Sensoren am Magneten zwei unterschiedliche Verlustleistungen im Magneten. Dies ist auf den Aufbau der Messanordnung zurückzuführen. Hiermit soll die unterschiedliche Feldstärke im Magneten im Betrieb der elektrischen Maschine bereits in der Versuchsanordnung berücksichtigt werden. Die gute Übereinstimmung von Feldverlauf im Betrieb mit dem Feldverlauf in der Versuchsanordnung

wurde in Abbildung 54 dargestellt. Das Ergebnis der Magnetverlustberechnung ist in Tabelle 2 dargestellt.

	2D-Berechnung	Kombinierte Methode	3D-Berechnung	Messung minimal	Messung maximal
Magnetverluste normiert auf die Maximalverluste	0,953	1	0,424	0,372	0,442

Tabelle 2: Vergleich der Magnetverluste aus Messung und Berechnung

In Tabelle 2 ist deutlich zu erkennen, dass die berechneten Werte der Magnetverluste der 2D-FEM-Methode sowie der kombinierten Methode wesentlich zu groß sind, wie die theoretische Betrachtung bereits vermuten ließ. Die Verlustberechnung mittels 3D-FEM-Methode liegt dagegen genau zwischen den minimalen und maximalen Werten der Messung, was darauf schließen lässt, dass die 3D-Berechnung recht exakte Ergebnisse liefert.

Allerdings ist die Berechnung der Magnetverluste über die 3D-FEM-Methode durch den wesentlich erhöhten Modellierungs- und Rechenaufwand für einen schlanken und kostengünstigen Auslegungsprozess nicht praktikabel, weshalb es wünschenswert wäre die Ergebnisse der 3D-FEM-Methode auf die kombinierte analytische Berechnung der Magnetverluste zu übertragen.

Dazu wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse der Abweichung der Magnetverluste zwischen 2D- und 3D-Rechenmethode durchgeführt, deren Ergebnis es war, dass der Rechenfehler insbesondere vom Verhältnis von Magnetbreite zu –länge abhängig ist. Abbildung 57 zeigt das Verhältnis der mit der 3D-FEM-Methode berechneten Magnetverluste zu den mit der kombinierten Methode berechneten in Abhängigkeit des Längen-Breiten-Verhältnisses des Magneten. Dazu wurde ausgehend vom vermessenen Magneten dieser in unterschiedliche axiale und tangential Segmente aufgeteilt, um unterschiedliche Längen-Breiten-Verhältnisse herzustellen (grüne und blaue Rechenergebnisse in Abbildung 57). Dieses ist im Elektromaschinenbau ein häufig verwendetes Verfahren zur Reduzierung der Magnetverluste. Außerdem wurde der ursprünglich vermessen Magnet in der Länge skaliert und diese Ergebnisse ebenfalls in die Auswertung mit aufgenommen, um größere Verhältnisse der Magnetlänge zur –breite erreichen zu können. Es ist gut zu erkennen, dass die Annahme der Abhängigkeit vom Längen-Breiten-Verhältnis stimmt, da Magnete mit unterschiedlichen geometrischen Abmaßen aber ähnlichem Längen-Breiten-Verhältnis zu relativ gleichen Verlustverhältnissen der 3D-FEM-Methode zur kombinierten Methode führen.

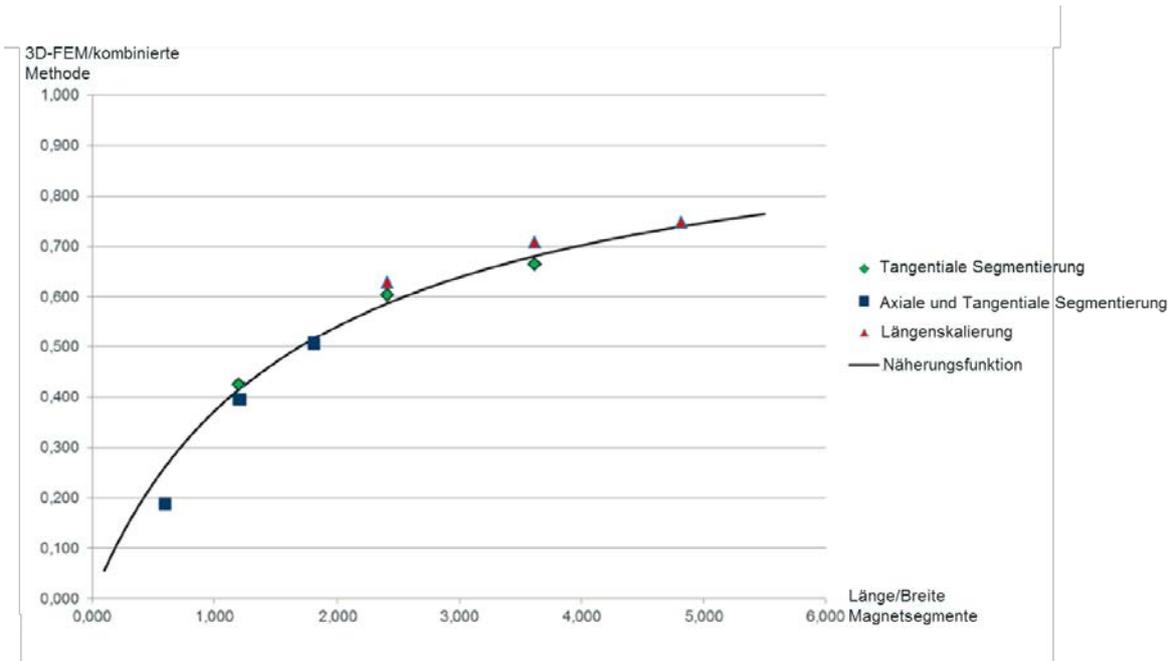


Abbildung 57: Verhältnis der Ergebnisse aus der 3D-FEM-Berechnung und der kombinierten Methode über dem Verhältnis Länge zu Breite der Magnete

Mittels eines Polynomfits ist es nun möglich eine mathematische Funktion über die Rechenpunkte zu legen um damit für Berechnung der Magnetverluste einen Korrekturfaktor in Abhängigkeit der geometrischen Abmaße des zu betrachtenden Magneten zu bestimmen und damit die Berechnung der Magnetverluste durch die 2D-FEM-Methode oder mittels der kombinierten Methode zu korrigieren. Damit ist ein einfaches und schnelles Verfahren gefunden, um die Magnetverluste zu bestimmen. Diese Methode ist als sehr gute Näherung zu verstehen, da sie nicht auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht. Allerdings liefert sie im Bereich der betrachteten Längen-Breiten-Verhältnisse des Magneten sehr gute Ergebnisse, deren Abweichung von den Rechenwerten der 3D-FEM-Methode unterhalb von 5% liegen, was Abbildung 58 verdeutlicht.

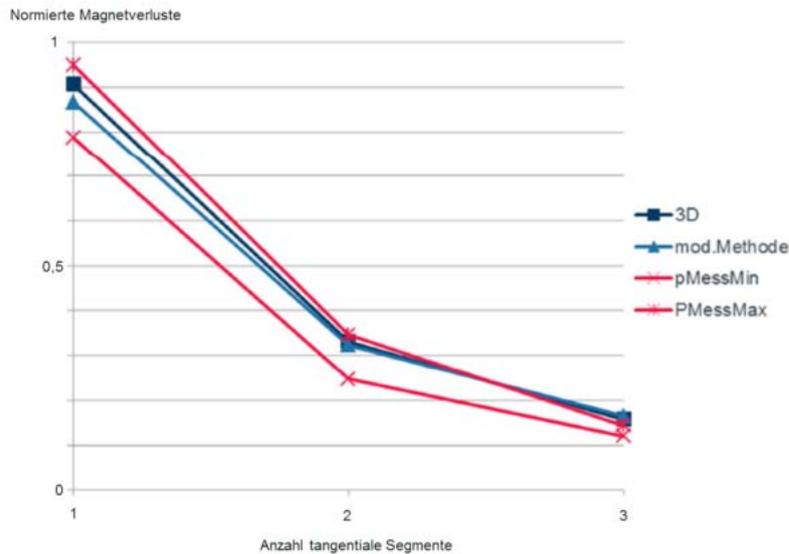


Abbildung 58: Magnetverluste der modifizierten Berechnungsmethode, der 3D-FEM-Berechnungsmethode und der Messung dreier unterschiedliche tangential segmentierter Magnete

2.7 Evaluierung der Verfahren

In der Evaluierung werden die Ergebnisse zur Verringerung der Messunsicherheit sowie die Maschinenoptimierung vorgestellt und diskutiert.

2.7.1 Verbesserung der Messunsicherheit

Die Zielstellung der Erhöhung der Messgenauigkeit konnte besonders für die fahrzeugrelevanten Arbeitspunkten (z.B. im NEFZ) deutlich erhöht werden. Der Fokus lag in der gezielten Optimierung der konventionellen Wirkungsgradmessung und es wird eine Erhöhung der Genauigkeit vom bis zu 5-fachen erzielt. Die Abbildung 59 visualisiert die Messunsicherheiten in dem relevanten Kennfeldausschnitt. Für die Zielerreichung lag das Augenmerk besonders bei der Reduzierung von messbereichsbezogenen Messunsicherheitsanteilen.

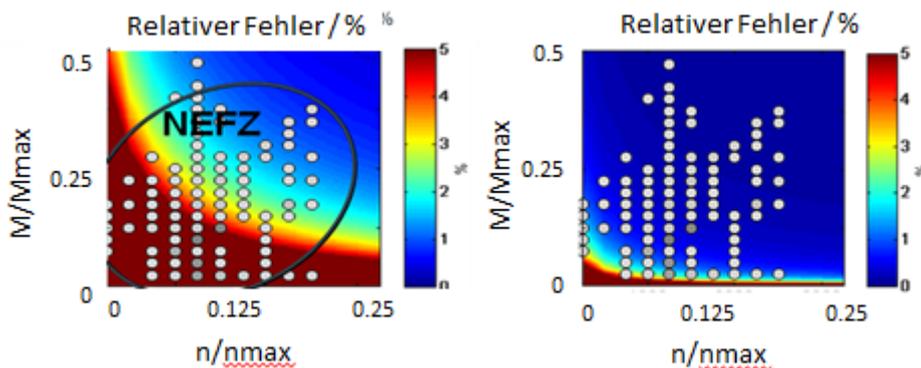


Abbildung 59: Messunsicherheit im Teillastbereich (links: Projektstart, rechts: Projektende)

2.7.2 Maschinenoptimierung

Ziel der Optimierung war es, die Effizienz der elektrischen Maschine, ausgehend von der zu Projektbeginn festgelegten Referenzmaschine, weiter zu steigern, ohne Einbußen bei den abgebbaren Drehmomenten und Leistungen der Maschine zu erhalten und ohne den Bau- raum- und Materialaufwand der Maschine zu erhöhen. Es wurden ansprechende Ergebnisse innerhalb von zwei Optimierungsschleifen erreicht.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden relativ große Änderungen an den Aktivteilen der Maschine vorgenommen. So wurde unter anderem der Luftspaltdurchmesser verringert, um für den Stator mehr Material zur Verfügung zu stellen. Außerdem wurde die Nutform im Stator angepasst, was zur Folge hatte, dass auch die Wicklung der Maschine angepasst werden musste. Durch die Vergrößerung des Stators musste der Rotor der Maschine entsprechend verkleinert werden. Die Auswirkungen auf die mechanische Beanspruchung des Rotors wurden ebenso untersucht wie die nun darstellbaren Leistungen und Wirkungsgrade. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Maschinenoptimierung werden im Folgenden dargestellt und untereinander verglichen.

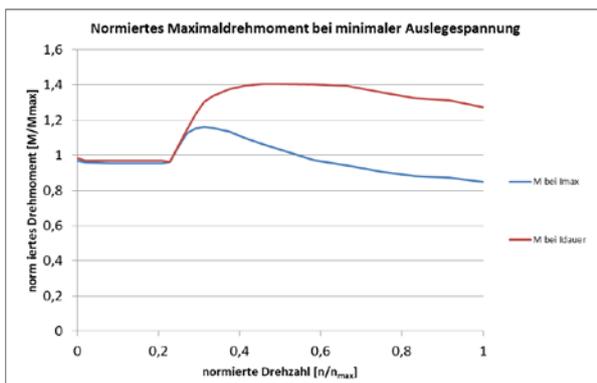


Abbildung 60: Normiertes Maximal- und Dauerdrehmoment der Maschine der 1. Iterationsstufe

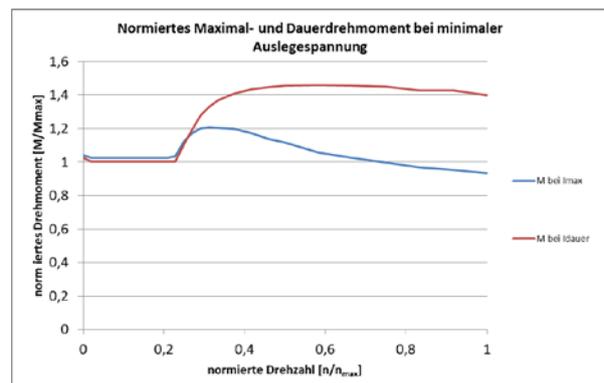


Abbildung 61: Normiertes Maximal- und Dauerdrehmoment der Maschine der 2. Iterationsstufe

Die vorstehenden Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen deutlich, dass die Weiterentwicklung zur Maschine der 2. Iterationsstufe Vorteile in der Leistungs- / Drehmomentenbereitstellung mit sich bringt. So ist bei gleichen Strömen das maximal abgebbare Drehmoment bei allen Betriebsdrehzahlen höher als bei der Maschine der 1. Iterationsstufe. Auch das mit maximalem Dauerstrom abgegebene Drehmoment ist bei der Maschine der 2. Iterationsstufe höher als zuvor.

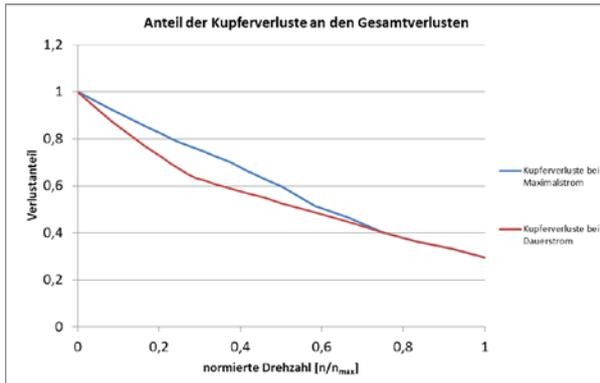


Abbildung 62: Kupferverluste der Maschine der 1. Iterationsstufe

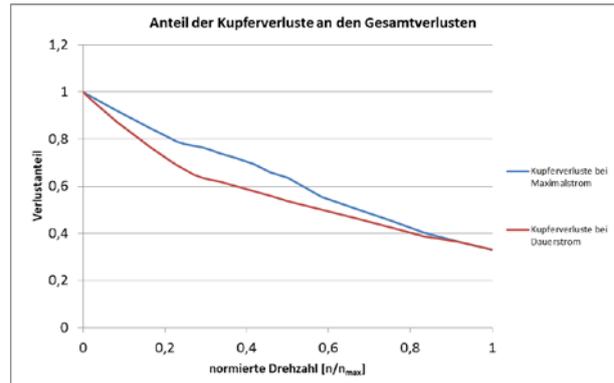


Abbildung 63: Kupferverluste der Maschine der 2. Iterationsstufe

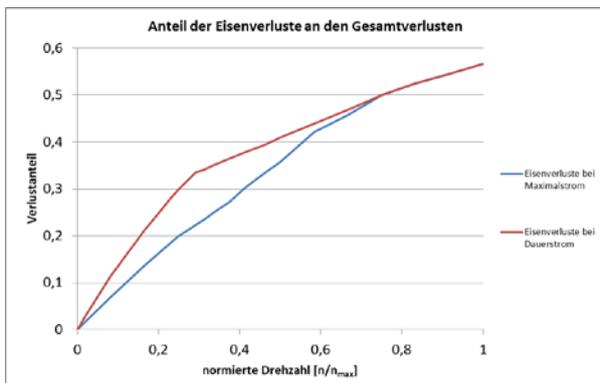


Abbildung 64: Eisenverluste der Maschine der 1. Iterationsstufe

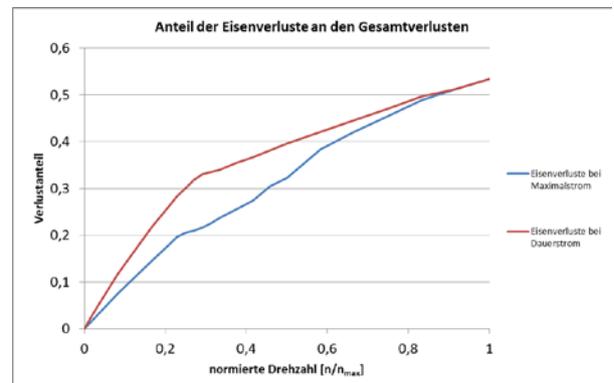


Abbildung 65: Eisenverluste der Maschine der 2. Iterationsstufe

Die Abbildung 62 bis Abbildung 65 zeigen, dass sich an der Verlustverteilung bei der optimierten elektrischen Maschine nicht mehr wesentlich zu den Verlusten der Maschine der 1. Iterationsstufe geändert haben. Es ist lediglich ein leicht verringerter Anteil der Eisenverluste an den Gesamtverlusten erkennbar, der Anteil der Kupferverluste ist damit etwas größer. Dies war noch wesentlich anders bei der Optimierung der Referenzmaschine, wo die Eisenverluste insbesondere bei höheren Drehzahlen eine wesentlich größere Rolle spielten. Es ist daher davon auszugehen, dass mit der jetzigen Auslegung eine nahezu optimale Aufteilung der Eisen- und Kupferverluste gefunden wurde.

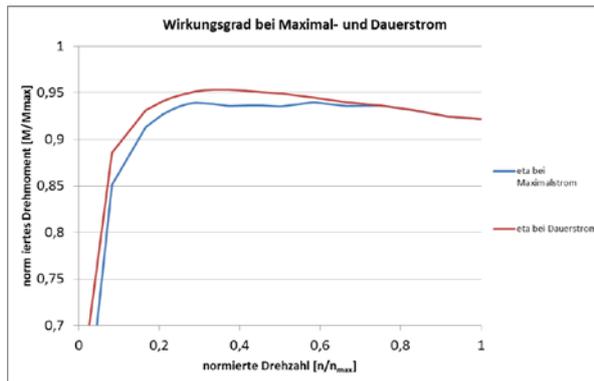


Abbildung 66: Wirkungsgrad der Maschine der 1. Iterationsstufe

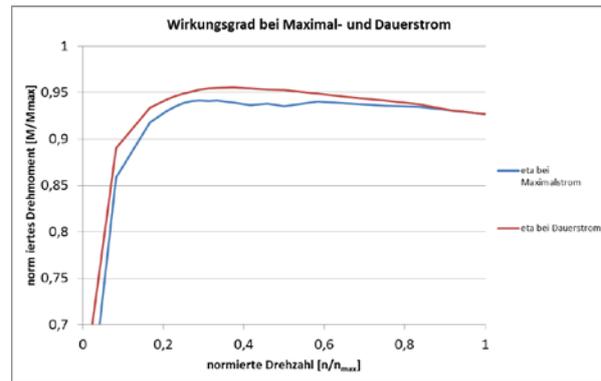


Abbildung 67: Wirkungsgrad der Maschine der 2. Iterationsstufe

Abschließend wird in Abbildung 66 und Abbildung 67 der Wirkungsgrad der beiden Maschinen miteinander verglichen. Es sind keine wesentlichen Abweichungen zu erkennen, die Maschine der 2. Iterationsstufe weist einen etwas verbesserten Wirkungsgrad sowohl im Maximal-, als auch im Dauerbetrieb auf.

Zusammen mit der verbesserten Drehmomenten- und Leistungsabgabe der Maschine der 2. Iterationsstufe kann von einer erfolgreichen Optimierung ausgehend von der Referenzmaschine gesprochen werden.

2.8 Zusammenfassung

Die Optimierung des Wirkungsgradkennfeldes erfolgt heute im Wesentlichen iterativ, d.h. durch die experimentelle und simulative Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen. Diese variieren über zahlreiche konstruktive und elektrische Maschinenauslegungen, Verwendung alternativer Materialien, diverse Regelungsstrategien oder unterschiedliche Einsatzprofile.

Mit zunehmender Verbesserung der Maschinen, d. h. mit immer geringeren Maschinenverlusten in Vergleich zur Leistung der Maschine steigen die Genauigkeitsanforderungen an die Messtechnik.

Die Zielstellungen im Teilvorhaben des Verbundprojektes VerfaS der Volkswagen AG, Bauatal lagen in der Wirkungsgradsteigerung der elektrischen Traktionsmaschinen mit dem Fokus von relevanten Fahrbereichen sowie der Erhöhung der Messgenauigkeit zum Nachweis von Verbesserungen oder Änderungen.

Für die Erhöhung der Messgenauigkeit wurden umfangreiche Studien, qualitativ, simulativ und experimentell durchgeführt. Es konnte durch die Reduzierung des signifikanten Messbereichfehlers die Messgenauigkeit um bis zum 5-fachen erhöht werden. Des Weiteren konnten die Prüfzeiten für die relevanten Wirkungsgraduntersuchungen um ca. 30% verkürzt werden. Die Untersuchungen bezogen sich auf die konventionelle Wirkungsgradmessung. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner der Universität Kassel wird eine Kombination der optimierten konventionellen Messung mit der von der Universität Kassel entwickelten kalorimetrischen Messung angestrebt.

Die Wirkungsgradoptimierung der Maschine erfolgte simulativ und durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen. Die durchschnittliche Verlustleistung der E-Maschine konnte im

Zyklusbetrieb um mehr als 20% verringert werden und liefert neben der Messgenauigkeitserhöhung sowie der Verringerung der Prüfzeiten einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung des Projektziels

3. Zahlenmäßiger Nachweis

Die im Projekt entstandenen Gesamtkosten sind zu einem sehr großen Anteil in den Personalkosten angefallen (>90%). Kleine Anteile entfielen auf Abschreibungen für Anlagen sowie auf Reisekosten.

Der Hauptgrund hierfür liegt in den durchgeführten Berechnungs- und Prüfstandsoptimierungen sowie der anschließenden Verfahrensoptimierung des Entwicklungsprozesses einer elektrischen Maschine. Diese Arbeiten wurden durch die Entwicklungs- und Prüfengeieure ausgehend von der vorhandenen Infrastruktur durchgeführt, weswegen keine großen Neuschaffungen von Hard- und Software erfolgen musste. Es wurden lediglich zwei größere Anschaffungen im Prüffeld getätigt, die bei der Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen halfen. Diese wurden entsprechend der Abschreibungsregeln anteilig für die Projektlaufzeit abgerechnet, weswegen die dafür angefallenen Kosten relativ gering ausfielen:

Ein EMV-Messgerät zur Bestimmung des Verhaltens unterschiedlicher Prüfstandskomponenten und ihren Einfluss auf die Wirkungsgradmessung

Ein Leistungsanalysator und Transientenrekorder zur Erfassung der mechanischen und elektrischen Messgrößen mit dem Vorteil der freien Programmierung, um detailliertere Erkenntnisse vom Prüfling zu gewinnen und den Prüfstand gezielter zu optimieren.

Ein weiterer Grund für den hohen Personalkostenanteil war die Tatsache, dass eine zu Projektbeginn geplante Beauftragung eines anderen Unternehmens zur Unterstützung bei Prüfstandsaufbauten sowie für den Aufbau von E-Maschinen-Prototypen nicht durchgeführt wurde. Die Arbeiten waren zu Projektbeginn bei einem externen Anbieter angefragt, da die Kapazitäten im Prüffeld sowie im Prototypenbau für die Durchführung einer Modellpflege, die dann nicht umgesetzt wurde, belegt waren. Die Umstrukturierung wurde zusammen mit dem Projektträger in zwei Umwidmungen durchgeführt. Dabei konnten ca. 6% der ursprünglich im Projekt geplanten Kosten eingespart und an das Ministerium zurückgegeben werden.

Reisekosten sind zu zwei besuchten Konferenzen/Workshops zum Thema Design of Experiments und aktiver Schwingungsbeeinflussung am Prüfstandsystem angefallen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten wären von einem Unternehmen der Größe Volkswagens mit Sicherheit durchzuführen gewesen. Die Arbeiten unterliegen allerdings, wie alle Entwicklungsvorhaben im Konzern, einer vorwiegend kurz- bis mittelfristigen Planung, in der sie einen entsprechenden ROI aufweisen müssen.

Die Elektromobilität an sich bringt bereits ein hohes finanzielles Risiko für die Automobilindustrie mit sich, was die Förderung spezieller Entwicklungsmethoden rechtfertigt und notwendig macht, da diese Methoden andernfalls nicht oder mit erheblicher Verzögerung angegangen werden.

Die Optimierung des E-Antriebs für künftige Batterie- und Hybrid-Elektrofahrzeuge ist zudem noch nicht Kernkompetenz der Fahrzeug- und Aggregatehersteller, wie z.B. die Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen und erfolgt deshalb sinnvoller Weise im Verbund qualifizierter Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen.

Durch die Förderung des vorstehenden Projektes ist es beim Projektpartner Volkswagen gelungen am Beispiel der untersuchten E-Maschinen für batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) den Maschinenwirkungsgrad wesentlich zu verbessern sowie den Zyklusverbrauch deutlich zu verringern. Die eingesetzte Methode konnte zudem eine Zeitersparnis der Wirkungsgradmessung erreichen.

Eine Förderung des Vorhabens war auch angesichts der nachstehend in Tabelle 3 aufgelisteten Projektrisiken unabdingbar.

Technisches Risiko	Folge	Eintrittswahrscheinlichkeit 1:unwahrscheinlich 10:sicher	Schwere für Projekt 1:irrelevant 10:schwerwiegend	Gegenmaßnahme
Prüfstandstechnik ist nicht kompatibel zur Messtechnik	Wirkungsgrade können nicht ausreichend erfasst werden	2	4	Unterstützung von Partnern, die beide Sparten abdecken.
Regelungstechnik ist nicht kompatibel zur Messtechnik	Wirkungsgrade können nicht ausreichend erfasst werden	2	4	Unterstützung von Partnern, die beide Sparten abdecken.
Messgenauigkeit nicht erreicht	Nicht alle Wirkungsgradänderungen können erfasst werden	1	5	FEM-Rechnungen zur Plausibilisierung der Messergebnisse
FEM-Berechnungen erfassen nicht alle Verluste	Nicht alle konstruktive Massnahmen können erfasst werden	2	3	Empirische Messdaten werden in Modellierung integriert
Konstruktive Massnahmen zu Bauraum und Kosten sind nicht umsetzbar	Massnahmen sind wirtschaftlich nicht umsetzbar	1	7	Frühzeitige Bewertung der konstruktiven Massnahmen

Tabelle 3: Darstellung der Projektrisiken

5. Verwertbarkeit nach Verwertungsplan

Die im Projekt entstandenen Verbesserungen im Auslege- sowie im Prüfprozess stellen eine hohe Relevanz für ein Unternehmen, wie die Volkswagen AG, dar. Sie helfen dabei den Entwicklungsprozess zu beschleunigen, und Prüfzeiten zu verkürzen, was die Wirtschaftlichkeit des gesamten Entwicklungsprozesses verbessert.

Außerdem helfen die Projektergebnisse dabei effizientere E-Maschinen zu entwickeln, was sich insbesondere bei den elektrischen Reichweiten der Fahrzeuge auswirkt und dabei hilft Kosten einzusparen und einen ressourcenschonenderen Umgang mit wichtigen Rohstoffen zu etablieren.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse werden bereits im täglichen Entwicklungsalltag eingesetzt und haben bereits jetzt einen positiven Einfluss auf die Entwicklung der Elektromobilität bei der Volkswagen AG. Einen Überblick gibt die nachfolgende Tabelle 4.

Nr.	Ergebnisse	Verwertungsmöglichkeit, -aktivität nach Art und Wirkung/Nutzen (ZE und Standort)	Zeithorizont der Realisierung
1	Werkzeuge zur Verfahrensoptimierung	Erprobungsumgebung für zukünftige Entwicklungen von Komponenten des elektrischen Fahrzeugantriebsstrangs	- abgeschlossen - Werkzeuge stehen für Entwicklungen bei Volkswagen Kassel zur Verfügung und sind im täglichen Einsatz angekommen
2	Elektromaschinenprüfstand mit spezifischer Mess- und Auswertetechnik zur Effizienzmessung von elektrischen Maschinen	Test- und Entwicklungsumgebung für aktuelle und zukünftige Antriebsprojekte Sukzessive Einführung der Mess- und Auswertetechnik Verbesserung laufender Projekte	- abgeschlossen - Die verbesserten Messmethoden sowie die angeschaffte Prüfstandstechnik sind auf den Prüfständen bei Volkswagen Kassel im Einsatz
3	Neue Steuerungssoftware für den Antrieb	Effizientere Antriebe in allen Fahrzeugprojekten	- abgeschlossen - Versuche für den Einsatz eines ME-Regelverfahrens sind bei Volkswagen Kassel durchgeführt worden. Eine Übernahme in die Fahrzeugelektronik ist derzeit nicht geplant, da hierzu eine komplette Umstellung der gesamten Fahrzeugumrichtersoftware notwendig wäre. Für zukünftige Projekte wird die Einführung einer ME-Regelung betrachtet.
4	Neu Möglichkeiten zur Kostenoptimierung der Abtriebe	<ul style="list-style-type: none"> • Größeres Kundeninteresse an E-Fahrzeugen • Größere Stückzahlen möglich • Ergebnis: Mehr Beschäftigung 	- abgeschlossen - Seit Start des Projekts 2013 hat die Volkswagen AG drei selbstentwickelte Antriebseinheiten für Golf und up! in den Markt eingeführt. Es ist seit dem ein, wenn auch langsames, Steigen des Kundeninteresse wahrzunehmen. Die im Projekt gemachten Fortschritte im Bereich der Effizienz der E-Maschine gepaart mit Weiterentwicklungen der Batterietechnologie werden zukünftig zu höheren Reichweiten der Elektrofahrzeuge führen, was das Kundeninteresse weiter steigern wird. Größere Stückzahlen zeichnen sich aus der voranschreitenden E-Mobilitätsentwicklung und den politischen Rahmenbedingungen bereits jetzt für zukünftige Antriebsprojekte in den derzeitigen Planungen ab, die zu einem Anstieg der Beschäftigung im Bereich der E-Traktion führen werden. Die Projektergebnisse unterstützen dabei die steigenden Anforderungen an Entwicklungszeit und (Kosten-)Effizienz der Antriebe zu adressieren.

Tabelle 4: Verwertung der Projektergebnisse

6. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

In einer Forschungsarbeit [26] an der RWTH Aachen wird für die Getriebewirkungsgradmessung ein kalorimetrisches Messsystem untersucht. Der Projektpartner der Universität Kassel, FSG hat diese Fortschritte in ihren Arbeiten der kalorimetrischen Messung berücksichtigt.

7. Ergebnisveröffentlichung

- Paper-Veröffentlichung mit Vortrag bei dem Wissenschaftssymposium der AutoUni vrsl. im Juli 2016
- Zeitschriftenartikel in der ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) vrsl. in der Ausgabe 9/16
- Paper-Veröffentlichung mit Vortrag bei der Tagung VPC- Simulation und Test im September 2016
- Geplante Promotion zur Untersuchung der Wirkungsgradmessung

Literaturverzeichnis

- [1] G. Stoehr, M. Huppert, L. Brabetz, M. Ayeb, A. Reza, F. Dräger, A. Flach, H. Krömker und S. Falke, „Forschung für eine prädiktive Diagnose von elektrischen Maschinen in Fahrzeugantrieben,“ Universität Hannover, Hannover, 2011.
- [2] T. Woll, Aerodynamik des Automobils, W. Hucho, Hrsg., Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2005.
- [3] TÜV SÜD Automotive GmbH, „Reichweitenermittlung von Elektrofahrzeugen,“ Oktober 2010. [Online]. Available: http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1296656610031102360044/ts-am_reichweitenermittlung_4-seiter_a4_d.pdf. [Zugriff am 08.04.2013].
- [4] TÜV SÜD Automotive GmbH, „TÜV SÜD,“ 1. Oktober 2010. [Online]. Available: http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1296656610031102360044/ts-am_reichweitenermittlung_4-seiter_a4_d.pdf. [Zugriff am 8. April 2013].
- [5] N. Hawlitzky, Integriertes Qualitätscontrolling von Unternehmensprozessen, München, 2002.
- [6] D. E. 60812, Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), 2006.
- [7] E. Hering, J. Triemel und H. Blank, Qualitätsmanagement für Ingenieure, Düsseldorf: VDI Verlag, 1996.
- [8] Kuhl, Brabetz, M. Ayeb und Krieger, „A new approach to calorimetric efficiency measurements for optimizing battery electric vehicle drives,“ in *12. Braunschweiger Symposium Hybrid and Electric Vehicles*, Braunschweig, 2015.
- [9] Takeno, Chiba, Hoshi, Orgaswara und Takemoto, „Power an Efficiency Measurements and Design Improvement of a 50 kW Switched Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles,“ in *IEEE*, 2011.
- [10] Mukherjee, Hoft und McCormick, „Digital measurements of the efficiency of inverter-induction machines,“ in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1990.
- [11] Aarniovuori, Kolehmainen, Kosonen, Niemela und Pyrhönen, „Uncertainty in Motor Efficiency Measurements,“ 2014.
- [12] J. 100:2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 2008.
- [13] Heidenhain, „Modulare Winkelmessgeräte mit magnetischer Abtastung,“ Oktober 2015. [Online]. Available: http://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/745168-13_Modulare_Winkelmessgeraete_de.pdf. [Zugriff am 1. November 2015].
- [14] HBM, „T12 Digitaler Drehmomentaufnehmer,“ 2015. [Online]. Available: http://www.hbm.cz/Prospekty/Moment/T12/p_t12_d.pdf. [Zugriff am 1. November 2015].
- [15] K. Hoffmann, Anwendung der Wheatstonschen Brückenschaltung, Darmstadt: HBM GmbH, 1974.
- [16] K. Hoffmann, Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Darmstadt: HBM GmbH, 1974.
- [17] HBM, *Datenblatt Digitaler Drehmomentaufnehmer T12*, Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [18] M. Haller, „Präsentation: Berechnung der Messunsicherheit,“ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2013.
- [19] Yokogawa, „Handbuch WT3000“.
- [20] Signaltec, „www.signaltec.de,“ [Online]. Available: <http://signaltec.de/shuntsnstuff/wp-content/uploads/2013/12/TPS-01.2014.pdf>. [Zugriff am 25.9.2015].
- [21] Kühnel, Rückführbare Messung der mechanischen Eigenschaften von Federkörpern für die Kraftmesstechnik, TU Ilmenau, 2013.
- [22] R. Schicker und G. Wegener, Drehmoment richtig messen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2002.
- [23] Preissach, „Über die magnetische Nachwirkung,“ *Zeitschrift für Physik*, 94, pp. 277-302, 1938.
- [24] T. U. München, „www-m6.ma.tum.de,“ [Online]. Available: www-m6.ma.tum.de/~turova/html/preissach.jpg. [Zugriff am 27. September 2015].
- [25] U. C. Cork, „www.ucc.ie/en,“ [Online]. Available: www.euclid.ucc.ie/hysteresis. [Zugriff am 27. September 2015].
- [26] G. Finocchio, M. Carotieri, E. Cardelli, B. Azzerboni und G. Consolo, „About identification of Scalar Preisach functions of soft magnetic materials,“ *IEEE Transactions of Magnetism*, pp. 923-926, 20. April 2006.

- [27] T. U. Chemnitz, „www.pt-piesa.tu-chemnitz.de,“ [Online]. Available: www.pt-piesa.tu-chemnitz.de{P_2{en{img{C6_2a_en.PNG. [Zugriff am 20 September 2015].
- [28] Yokogawa, „Handbuch WT3000,“ [Online]. Available: <http://tmi.yokogawa.com/de/products/digitale-leistungsanalysatoren/digitale-leistungsanalysatoren/wt3000-precision-power-analyzer/>. [Zugriff am 15 November 2013].
- [29] SKF, Hauptkatalog SKF, 2015.
- [30] G. Müller, K. Vogt und B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2008.
- [31] Elektroniktutor, „Elektroniktutor,“ [Online]. Available: Elektroniktutor.de/grundlagen/magkurve.html. [Zugriff am 29 März 2016].
- [32] E. Homann, „Kalorimetrisches Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung von Getrieben,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 116, Nr. 11, pp. 68-74, 2014.
- [33] B. Kipp, *Analytische Berechnung thermischer Vorgänge in permanenterregten Synchronmaschinen*, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr, 2008.