



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



LEANTEC ANTRIEB

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Elektrotechnisches Institut, Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Abschlussbericht VP1 – Teilprojekt 1.5
Technische Universität Dresden
Elektrotechnisches Institut
Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Förderkennzeichen: 03WKBY01E
Förderzeitraum: 01.03.2011 bis 31.12.2014

Inhalt

I	Allgemeine Angaben.....	2
1	Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens.....	2
2	Voraussetzungen	2
3	Planung und Ablauf	4
4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	5
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II	Eingehende Darstellung	12
1	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)	12
1.1	AP 1.1.5 Voruntersuchungen am vorhandenen Labormuster Elektr. Aktivbauteile.....	12
1.2	AP 1.2.5 Erstellung Simulationsmodell elektrische Aktivbauteile.....	12
1.3	AP 1.3.5 Design – Anforderung elektrische. Aktivbauteile.....	23
1.4	AP 1.4.5 Design – Auslegung elektrische Aktivbauteile	24
1.5	AP 1.5.5 Design – Herstellung elektrische Aktivbauteile.....	24
1.6	AP 1.8.5 Bauteilentwicklung – Konstruktion elektrische Aktivbauteile	25
1.7	AP 1.9.5 Bauteilentwicklung – Fertigungstechnologie elektrische Aktivbauteile	25
1.8	AP 1.12.5 Integration in das LEANTEC-Antriebssystem elektrische Aktivbauteile.....	26
1.9	AP 1.13.5 Prüfstandentwicklung elektrische Aktivbauteile	27
1.10	AP 1.14.5 Vorstandstätigkeit, Regionalmanagement.....	29
2	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Aufstockungsphase).....	30
2.1	AP 1.5.15.1 Inbetriebnahme und Tests	30
2.2	AP 1.5.15.2 Erprobung.....	32
2.3	AP 1.5.15.3.....	33
3	Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises.....	38
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	38
5	Voraussichtlicher Nutzen	38
6	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	38
7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	39
	Literaturverzeichnis	40
III	Erfolgskontrollbericht.....	41
IV	Kurzfassung – Berichtsblatt.....	42
V	Document Control Sheet.....	44

I Allgemeine Angaben

1 Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens

Ziel des Verbundprojektes 1 (VP1) im Wachstumskern LEANTEC ist die elektromagnetische, mechanische und thermische Auslegung einer Transversalfuss-Reluktanzmaschine. Gegenüber am Markt verfügbarer Elektromotoren sollen dabei die Parameter Leistungsdichte und Drehmomentdichte verbessert werden. Neben diesen Zielen steht die Reduktion kostenintensiver Materialien wie Kupfer oder Permanentmagnete. Das am ETI umgesetzte Teilprojekt 1.5 umfasst dabei den elektromagnetischen und thermischen Teil, für den im Einzelnen folgende Ziele gesetzt wurden:

- Entwicklung einer transversalen Flussführungsstruktur für Stator und Rotor, die eine Realisierung des Reluktanzprinzips bei gleichzeitiger optimaler Aufnahme der Wicklungskopffreien Statorwicklung gestattet.
- Elektrische, magnetische und thermische Optimierung der Hohlleiterwicklung, so dass sowohl im Dauerbetrieb als auch Überlastbereich eine ausreichende Abfuhr der Verluste gesichert ist.
- Maximierung der Tangentialkräfte (Drehmoment) bei gleichzeitiger Minimierung der Axialkräfte, die zu einer Durchbiegung der Rotorscheibe führen.
- Findung einer optimalen Zahn-Nut-Struktur von Stator und Rotor, die in Verbindung mit einer Sandwich-Bauweise eine gute Anpassbarkeit von Leistung, Drehmoment, Drehzahl und Drehmomentqualität gewährleistet und somit für die verschiedensten Anwendung prädestiniert ist.

2 Voraussetzungen

Der Lehrstuhl EMA ist seit vielen Jahren tätig auf dem Gebiet der Methodik, Modellierung und Simulation. Werkzeuge für elektrische Maschinen und Antriebe mit Verfahren zur Modellierung, zum Entwurf und zur Dimensionierung sowie zur Optimierung der Einzelkomponenten von Maschinen und Stromrichtern und des Energiewandlersystems im Grundsatz, aber auch die Lösung von Einzelfragestellungen zur Konstruktion und Auslegung von Maschinen sollen dabei im Mittelpunkt stehen.

Optimierung von hochpoligen Dauermagnetmotoren

Im Rahmen eines SMWA-Projektes (Freistaat Sachsen) wurde am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe der TU Chemnitz in Kooperation mit der Fa. Berliner Elektro Hochtechnologie Elektrische Antriebssysteme GmbH, später Beldrive GmbH, von 1996 bis 2001 ein Direktantriebssystem mit hochpoligen Dauermagnetmotoren und Einzelzahnwicklung untersucht, entwickelt und erfolgreich abgeschlossen [Abs01]. Die Vorentwicklung war Basis einer Motorenserie, die von der Fa. Beldrive insbesondere für Transportsysteme in der Automobilindustrie angeboten wird. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf dem ganzheitlichen Entwurf und der Optimierung von hochpoligen Dauermagnetmotoren mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente und der Evolutionsstrategie [Boc99]. Die Methode konnte auch erfolgreich auf Motoren für Hybridfahrzeuge

angewandt werden. In Bezug auf die Vorausberechnung der Temperatur wurde eine neue Methode zur Abstimmung des Wärmeersatzschaltbildes eines Direktantriebs erstmals erprobt. Durch praktische Vergleichsmessungen mit eingebauten Temperaturfühlern an wenigen Punkten der Maschine konnte die Modellparametrierung mit Hilfe der evolutionären Optimierung automatisch abgestimmt werden [Boc07]. Die Methodik und die Ergebnisse sind in Publikationen zusammengefasst. Die Fa. Beldrive hat mit dem entwickelten Antriebssystem in den Jahren 1999 und 2007 den Innovationspreis des Landes Sachsen erhalten.

Anwendung neuer magnetischer Pulververbundwerkstoffe

Am Lehrstuhl läuft seit 2009 ein von der DFG gefördertes dreijähriges Grundlagenprojekt „Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen“, bei dem die Eignung der neuen weichmagnetischen Materialien zur Verringerung der Wirbelstromverluste in aktiven Magnetlagern nachgewiesen werden soll. Obwohl dabei die Anwendung für höhere Drehzahlen, mit Werten größer 20.000 1/min, vorgesehen ist, so ist aufgrund der hohen Polzahl des Zielmotors ebenfalls eine vergleichbar hohe Speisefrequenz von ca. 1.000 Hz vorhanden, so dass man sich auf einige nützliche Erfahrungen mit dem neuen Werkstoff stützen kann [Fle09], [Fle10].

Berechnung und Simulation von Wirbelstromverlusten

Am Lehrstuhl bestehen jahrelange Erfahrungen aus Industrieprojekten mit Voith Hydro und Hitachi zur Modellierung, Simulation und Berechnung von Wirbelstromverlusten und Zusatzverlusten in Großgeneratoren. Die Methodik (3D-Simulationen) und die Ergebnisse wurden in [Bär08], [Bac09] publiziert.

Entwicklung eines hochkompakten luftgekühlten Fahrmotors eines Serienhybrid-Busses

Der Komplex Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen stellt einen Schwerpunkt der Forschungsarbeit an der Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe dar. Die Intensivierung der Kühlung elektrischer Maschinen und die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für ihre thermodynamische und strömungstechnische Auslegung in Verbindung mit der elektromechanischen Optimierung ist eine wesentliche Reserve für die Entwicklung hocheffizienter Antriebe. Im Rahmen eines Wachstumskerns AUTOTRAM werden von 2009-2012 PM-Synchronfahrmotoren entwickelt, untersucht und optimiert. Erste Ergebnisse sind in [Fes09], [Fes10] publiziert.

Literatur

- [Abs01] Abschlussbericht zum Förderprojekt Elektrisches Direktantriebssystem Projekt Nr. (PT): 2909, TU Chemnitz 2001.
- [Bac09] Bach, T.; Wöhner, D.; Takahashi, K.; Hattori, K.; Liese, M., Hofmann, W.: Determining Negative Sequence Currents of Turbine Generator Rotors, ICEMS 2009, CD-Proceedings, Tokyo, 2009, p.1-6
- [Bär08] Bärnklaus, H.; Bach, T.: Experience with Model Simplifications for making a large FEM Calculation Case Computable. Internat. Conference on Electrical Machines ICEM 2008, Villamoura, Portugal, p.1-5
- [Boc99] Bochnia, D.; Hofmann, W.; Hupe, H.: Design Optimization of Permanent Magnet Motors by Evolution Strategies and Finite Element Analysis, EMDD'99 pp. 297-301.

- [Boc07] Bochnia, D.: Optimierung hochpoliger Dauermagnetmotoren unter Verwendung der Finiten Elemente Methode und der Evolutionsstrategie, Dissertation TU Chemnitz 2002, Shaker Verlag 2007.
- [Fes09] Festa, M.; Eberhardt, H.-D.; Hofmann, W.: Design Aspects of Circumferentially Cooled Frameless Machines, ICEMS 2009, Proceedings, Tokyo 2009, p.1-6
- [Fes10] Festa, M.; Eberhardt, H.G.; Hofmann, W.: Inter-laminar Flux and Eddy Current Losses in a Circumferentially Cooled Stator Core. Int. Conf. on Electrical Machines ICEM 2010, p.1-6
- [Fle09] Fleischer, E.; Hofmann, W.: Einsatz von Pulververbundwerkstoffen in aktiven Magnetlagern zur Reduzierung der Rotorverluste, ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, VDE-Verlag: ETG-Fachbericht 119, S. 35-40.
- [Fle10] Fleischer, E.; Hofmann, W.: Application of Soft Magnetic Composites in Active Magnetic Bearings. WWM2010, p.1

3 Planung und Ablauf

Die Planung des TP 1.5 umfasste im ursprünglichen Antrag 75 Personenmonate für wissenschaftliche Mitarbeiter (WM) und jeweils 36 Personenmonate für studentische (SHK) und wissenschaftliche Hilfskräfte (WHK). In der Aufstockungsphase von 10 Monaten wurden nochmals 7,8 Personenmonate WM und 2 Personenmonate für WHK bewilligt. Das Teilprojekt gliederte sich in zehn Arbeitspakete aus dem ursprünglichen Antrag und drei Arbeitspaketen aus der Aufstockungsphase. Inhaltlich erstreckten sich die Arbeiten vom 01.03.2011 bis 28.02.2014 für den Erstantrag und vom 01.03.2014 bis 31.12.2014 für die Aufstockung. Die bewilligten Bundesmittel beliefen sich auf 524.395,00 Euro inklusive Projektpauschale. In den Tabellen 1 und 2 sind die Arbeitspakete des TP 1.5 und deren Aufwand (PM) innerhalb des Verbundprojektes 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Arbeitspaketeplan des TP 1.5 aus dem Erstantrag

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
1.1.5	Voruntersuchungen am Labormuster Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	8 5 3
1.2.5	Erstellung Simulationsmodell Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	24 14 14
1.3.5	Design – Anforderung Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	6 3 3
1.4.5	Design – Auslegung Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	6 3 3
1.5.5	Design – Herstellungsverfahren Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	6 3 3
1.8.5	Bauteilentwicklung – Konstruktion Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	3 1 1
1.9.5	Bauteilentwicklung – Fertigungstechnologie	WM	3

	Elektr. Aktivbauteile	WHK SHK	2 2	2
1.12.5	Integration in das LEANTEC-Antriebssystem Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	0 0 0	6
1.13.5	Prüfstandentwicklung Elektr. Aktivbauteile	WM WHK SHK	6 6 6	10
1.14.5	Vorstandstätigkeit, Regionalmanagement	WM		3
Summe		WM WHK SHK	36 36 36	75

Tabelle 2: Arbeitspaketeplan des TP 1.5 aus der Aufstockungsphase

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
1.5.15.1	Inbetriebnahme und Tests	WM WHK SHK	0,5 0,5 0
1.5.15.2	Erprobung	WM WHK SHK	4,5 0,5 0
1.5.15.3	Integration Aktivbauteile Abgleich Prüfergebnisse mit Modellierung Vereinfachungen	WM WHK SHK	2,8 1 0
Summe		WM WHK SHK	7,8 2 0

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Für die Aktivteile des Zielmotors Geschaltete Reluktanzmaschine in Transversalflussbauweise wird nachfolgend der Wissensstand referiert.

Geschaltete Reluktanzmaschine (GRM)

Erste umfassende Grundlagenuntersuchungen zur GRM kommen aus dem angelsächsischen Raum und wurden in [Law72] vorgestellt und in [Mil93] zusammengefasst. Sie behandeln den grundsätzlichen Aufbau der unterschiedlich gezahnten Stator- und Rotorhauptelemente.

Bekannt geworden sind in die ersten systematischen Untersuchungen in Deutschland Anfang der 90er Jahre an der Uni Karlsruhe, dem dortigen Elektrotechnischen Institut unter der Leitung von Prof. Späth. Die Arbeiten führten zu einem 26-kW-Prototyp in 16/12-Ausführung (16 Stator- und 12 Rotorzähne) und wurden in zwei Dissertationsschriften [Ste92], [Wo97] zusammengefasst. Die Arbeiten wurden erstmalig in die Industrie transferiert und vom Elbtalwerk Heidenau in Kleinserie gebaut und auf der Hannover Messe 1997 ausgestellt [Elb97]. Über eine größere Verbreitung oder gar Markteinführung ist nichts bekannt. Die Arbeiten wurden z.T. über mehrere Jahre von der DFG aber auch der Industrie gefördert und schließen mit dem Jahr 2000 ab.

Eine langjährige und systematische Untersuchung klassischer geschalteter Reluktanzmaschinen in Radialflussbauweise begann ca. 1996 am ISEA in Aachen. Die Arbeiten waren zunächst grundlagenorientiert [Car07], [Fie07] und verlagerten sich dann im Rahmen der Anwendungen auf

die Industrie [Rei98], [Ris00], [In02]. Zu dem Themengebiet liegen 5 Dissertationen vor, deren Schwerpunkt auf dem Gebiet der Antriebstechnik anzusiedeln ist. Die rein elektromaschinenbautypischen Entwicklungen wurden mit kommerziell verfügbaren Tools erledigt und bewegen sich auf dem Niveau des Stands der Technik. Besondere Bauformen oder neuere Konstruktionsvarianten sind nicht in Angriff genommen worden. Besondere Schwerpunkte der Forschungsarbeiten liegen auf der Steuerung und Regelung, der Lärmreduzierung (4-Jahresförderung über DFG) sowie der Umrichtertechnologie, in denen das Institut eine Führungsrolle einnimmt. Aus dem benachbarten Aachener Institut für Elektrische Maschinen liegt eine Dissertationsschrift vor [Löw02], die aus einem Industrieprojekt für die Fa. Bosch hervorgegangen ist und eine Monographie [Hen01], die das Ergebnis einer internationalen Kooperation mit der Uni Cluj-Napoca (Rumänien) ist und einen weiten und ausführlichen Überblick über die möglichen Bauformen der GRM gibt. Hier wird auch eine mögliche Transversalflussbauweise vorgestellt.

An der Uni der Bundeswehr München beschäftigen sich zwei Lehrstühle mit geschalteten Reluktanzmaschinen. Am Lehrstuhl Leistungselektronik (Prof. Marquardt) stehen Arbeiten zu effektiver Umrichtertechnik und neue Regelverfahren im Vordergrund, es werden aber auch neuartige Bauweisen von Reluktanzmotoren verfolgt. Mit [Hid09] wird eine Arbeit vorgelegt, die dem Zielmotor sehr nahekommt, aber als Forschungsgegenstand deren sensorlose Regelung zum Ziel hat. Verwiesen wird auf die Hochpoligkeit der Maschine, ihre Scheibenläuferbauweise und die Verwendung von SMC-Materialien. Am Lehrstuhl für Antriebstechnik (Prof. Gerling) haben elektromaschinenbauliche Aspekte wie Entwurf und Modellierung den Vorrang [Sci09]. Die anderen Arbeiten beziehen sich auf Sonderprobleme klassischer Radialfluss-Bauweisen [Hil08], [Sca06].

In [Bol05] wird zunächst ein 1-phasiger geschalteter Reluktanzmotor mit Ringwicklung im Stator beschrieben, der eine Homopolarstruktur besitzt, bei dem der Luftspalt noch radial verläuft und Statorzähne sowie Rotorzähne ineinander eingreifen. Er ist geeignet für hohe Drehmomente aber niedrige Drehzahlen. Die Kraft- und Leistungsdichte wird erhöht durch eine Stapelbauweise von Stator- und Rotorringen und Erweiterung zu einem mehrphasigen Motor nach [Bol08]. In Aufbau und Ausführung kommt der dort beschriebene Variablen- (geschaltete) Reluktanzmotor dem Zielmotor am nächsten. Er ist in Scheibenform mit axialem Luftspalt, toroidal geführten Hauptfluss aufgebaut und trägt eine Ringwicklung. Durch axial modulare Bauweise lässt er sich durch eine mehrmalige Wiederholung von Stator- und Rotorringen im Drehmoment höher skalieren. Der Unterschied besteht in der axialen Flussführung und der damit beschränkteren elektromagnetischen Ausnutzung gegenüber der Transversalflussbauweise des Zielmotors. Eine weitere Version eines geschalteten Axialfluss-Reluktanzmotors aber mit niedriger Zähnezahl wird in [Pul98] behandelt. Auch hier ist eine Stapelung zur Leistungs- und Drehmomentsteigerung möglich.

Transversalflussmaschine (TFM)

Sehr umfassende und grundlegende Arbeiten wurden über 2 Jahrzehnte an der TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (Prof. Weh) durchgeführt. Vorrangig wurden aber Transversalflussmaschinen mit Permanent-magneten untersucht [Weh88], [Jia88], [Jaj94], [Gao94], [Bey97], [Lan00].

Für Daimler Chrysler Bahnsysteme wurde an der RWTH Aachen eine Transversalflussmaschine für einen Direktantrieb in Bahnanwendungen entwickelt [Bli00]. Der Motor war in synchroner Bauweise mit Permanentmagneten ausgeführt.

Dem Zielmotor in geschalteter Reluktanzausführung nahe kommt eine Arbeit aus der Uni Erlangen (Prof. Pfaff) von [Kru00], die allerdings aufgrund der geblechten Magnetkreisausführung nur sehr schlechte Wirkungsgrade unter 70% erzielen konnte.

Im Industriebereich hat die Transversalflussmaschine auch ein vorübergehend starkes Interesse gefunden, vgl. [Lan00], wo von einem 150 kW-Traktionsmotor mit einem maximalen Anfahrmoment von 2750 Nm und einer Höchstdrehzahl von 2400 U/min berichtet wird, wie er zur Zeit bei Voith Turbo zur Serienreife entwickelt wird. Bei einem maximalen Durchmesser von 510 mm, einer Länge von 435 mm und einem Gewicht von ca. 200 kg wird er die herkömmlichen Maschinenarten aus vielen Anwendungen verdrängen. Weitere Vorteile dieser neuentwickelten Technologie sind hoher Wirkungsgrad, in allen Betriebspunkten niedriges Drehzahlniveau, dadurch Verzicht auf schnelllaufende Getriebestufen, Kurzschlussstrom kleiner gleich Nennstrom, dadurch uneingeschränkt feldschwächfähig, keine Begrenzung durch Zwischenkreisspannung, Leistungsgewicht 0,75 kW/kg bis 1,25 kW/kg im Leistungsbereich 75-300 kW, kostengünstig herstellbar aufgrund Einsatz neuartiger weichmagnetischer Pulververbundwerkstoffe.

Weitere Aktivitäten sind von Voith Siemens im Kraftwerksbereich (Windgeneratoren) und bei Siemens im Traktionsbereich (Fahrertrieb) bekannt geworden [Lan02].

Von einer geschalteten Reluktanzmaschine in Transversalflussbauweise mit U-Kern bzw. Klauenpolanordnung wird in [Vio04] berichtet. Der Rotor ist vielzahnig aufgebaut und besitzt steilkantige oder abgerundete Zahnflanken. Bei der Klauenpolanordnung mit statorseitigem L-Kern können die L-Richtungen alternativ aufgebaut sein. Die Anordnung ist relativ kompliziert und erreicht ca. 1/3 der Kraftdichten und Leistungsgewichte, die vom PM-Motor in Transversalflussbauweise bekannt sind.

Die Vielfalt der Transversalfluss-Reluktanzmaschinen wird in [Asp97] noch erweitert, indem teilweise Permanentmagnete zur Flussunterstützung eingebaut werden. Eine erste Abschätzung bzw. Simulation der relevanten elektromagnetischen Größen für eine geschaltete Transversal-Reluktanzmotor wird in [Has99] vorgestellt. Der Rotor ist passiv und der Stator besitzt eine Ringwicklung und kann wahlweise noch mit Permanentmagneten ausgestattet sein. In dieser Publikation werden ferner einige wichtige Kenngrößen der TFM berechnet und mit anderen Maschinentypen verglichen. Es zeigt sich, dass die Zahnbreite auf der Statorseite einen wesentlich größeren Einfluss auf die Kraftdichte hat als auf der Rotorseite. Im Vergleich zu Asynchron- oder Synchronmotor wird eine 2... 3-fache Kraftdichte im Dauerbetrieb für die TFM angegeben.

SMC-Pulververbundmagnete

Maschinen in Transversalflussbauweise zeichnen sich durch 3-dimensionale Flussführung aus, was isotrope magnetische Eigenschaften der Weichmagnete wünschenswert macht. Langsam drehende Direktantriebe sind hochpolig aufgebaut und erfordern demzufolge höhere Speisefrequenzen des Stroms. Das begünstigt die Entstehung von Wirbelströmen in Leitern und im Magnetmaterial. Hier kann die Verwendung von Pulververbundmagneten (SMC= Soft Magnetic Composites) eine Verbesserung schaffen. Der Einsatz von SMC-Material für geschaltete Reluktanzmaschinen wird in [Vi08-1]-[Vi08-3] behandelt. Jedoch beschränken sich die Beiträge auf die klassische Radialflussanordnung mit 8 Stator- und 6 Rotorzähnen. Verwendet wird SOMALOY 500 und verglichen mit geblechtem Weicheisen. Die bisher wenigen Ergebnisse zeigen, dass die Drehmomentausbeute mit SMC-Material 20% geringer als bei geblechtem Eisen sein kann. Die Massereduktion bei gleichen Abmessungen der Aktivteile erreicht allerdings nur 4%.

Durch den Einsatz von SMC-Materialien wird die Notwendigkeit eines dreidimensionalen Entwurfs des SMC-haltigen Magnetkreises offensichtlich, wie in [Nor05] am Beispiel eines Reluktanzmotors mit zwei Luftspalten und vertikaler Ausrichtung der Zahngeometrie gezeigt wurde.

Ein Beispiel für die verkoppelte numerische Berechnung von Multiphysics-Feldern (thermisch, magnetisch, strömungstechnisch) wird in [Mar08] demonstriert, wobei hierbei eine permanentmagneterregte Synchronmaschine in Axialflussbauweise untersucht wird. Die Verkopplung erfolgt, wie im Projekt vorgesehen, auf Netzwerkebene.

Dass aber auch dreidimensional mit einem SMC-Stator analytisch gerechnet werden kann, wird in [Che07] gezeigt. Es handelt sich hierbei um einen hochtourigen bürstenlosen und nutfreien Motor.

Ferner wurde eine intensive Patentrecherche durchgeführt. Es stehen keine Patente oder Schutzrechte Dritter der Realisierung des zur Förderung beantragten Verbundprojekts 1 entgegen.

Kühlkonzept / Leiterinnenkühlung

Die hohe Leistungsdichte kann nur mit einer aktiven Flüssigkeitskühlung erreicht werden. Vorgesehen ist eine direkte Kühlung der Wicklung durch Verwendung von Kupferhohlleitern. Ähnliche Konzepte finden bislang nur in experimentellen Anwendungen Verbreitung [Sta10]. Im Bereich großer Synchrongeneratoren ist es üblich, einige der Teilleiter innerhalb eines Leiterstabes auch als Hohlleiter auszuführen.

Spätere Generationen des LEANTEC-Motors verfügen zudem noch über separate Edelstahlkühlleiter im Stator. Damit vergleichbar ist eine direkte Kühlung des Blechpaketes durch entsprechend eingebrachte Rohre, wie sie bei großen Elektromaschinen verwendet wird.

Literatur

- [Asp97] Aspden, H.: Power from Magnetism: The transverse reluctance motor. Energy Science report No.7 1997.
- [Bey97] Beyer, S.: Untersuchungen am magnetischen Kreis der permanentmagnet-erregten Transversalflußmaschine in Sammler-Bauweise. Dissertation 1997, TU Braunschweig, Institut Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen.
- [Bli00] Blissenbach, R.; Henneberger, G.; Schäfer, U.; Hackmann, W.: Development of a transverse flux traction motor in a direct drive system. Int. Conf. on Electrical Machines, ICEM 2000
- [Bol05] Bolognesi, P.; Bruneo, O.; Taonecco, L.: A Switched Reluctance Machine for High-Torque Low-Speed Applications. EPE 2005 pp.10
- [Bol08] Bolognesi, P.: Design and Manufacturing of an Unconventional Variable Reluctance Machine. IET Conf. PEMD 2008, pp.45-49
- [Car07] Carstensen, C.: Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines. Dissertation 2007, RWTH Aachen
- [Che07] Chebak, A.; Viarouge, P.; Cros, J.: Analytical Model for Design of High-Speed Slotless Brushless Machines with SMC Stators. IEEE Int. Electrical Machines and Drives Conf. IEMDC 2007, p. 159-164

- [Elb97] Wolff, J.: Geschalteter Reluktanzmotor - Drehmomentstarker Elektromotor mit kleinem Bauvolumen. (Messeprospekt anlässlich der Hannover Messe´97, Elbtalwerk Heidenau GmbH)
- [Fie07] Fiedler, J.: Entwurf von geräuscharmen Geschalteten Reluktanzmaschinen. Dissertation 2007, RWTH Aachen
- [Gao94] Gao, H.: Numerisches Berechnungsverfahren für Synchronmaschinen in Transversalfluß-Bauweise. Dissertation 1994, TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Has99] Hasubek, B.E.; Novicki, E.P.: Two Dimensional Finite Element Analysis of Passive Rotor Transverse Flux Motors with Slanted Rotor Design. Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering p.1199-1204
- [Hen01] Henneberger, G.; Viorel, J.A.: Variable Reluctance Electrical Machines, Shaker Verlag Aachen 2001
- [Hid09] Hildinger, J.: Neuartige indirekte Rotorpositionserfassung an hochpoligen Reluktanzantrieben, Dissertation 2009 UBW München, Lehrstuhl Leistungselektronik
- [Hil08] Hiller, M.: Dynamische Drehmomentregelung eines Geschalteten Reluktanz-antriebs auf Basis eines Echtzeitmodells, Dissertation 2008, UBW München, Lehrstuhl Leistungselektronik
- [In02] Inderka, R.: Direkte Drehmomentregelung Geschalteter Reluktanzantriebe. Dissertation 2002, RWTH Aachen
- [Jaj94] Jajtic, Z.: Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflußmaschine. Dissertation 1994, TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Jia88] Jianzong, H.: Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversalflussmaschinen. TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)
- [Kru00] Kruse, R.: Entwurfsverfahren für Transversalfluß-Reluktanzmotoren. Dissertation 2000, Uni Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Elektrische Antriebe und Steuerungen.
- [Lan00] Lange, A.: Analytische Methoden zur Berechnung elektromagnetischer und thermischer Probleme in elektrischen Maschinen. Dissertation TU Braunschweig 2000
- [Lan02] Lange, A.: Transversalflußmaschinen in Fahrzeugantrieben. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 1, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik * Band 484 (2002) Seite 90-100 (11 Seiten, 9 Bilder) Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Law72] Lawrenson, P.J. et. al.: Variable Speed Switched Reluctance Motors. IEE Proceedings Vol. 127, Pt. B, No.4, 1980 p.253 -265
- [Löw02] Löwenstein, L.: Kurbelwellen-Starter-Generatoren auf der Basis von Reluktanzmaschinen, Dissertation 2002, RWTH Aachen

- [Mar08] Marignetti, F.; Colli, V.D.; Coia, Y.: Design of Axial Flux PM Synchronous Machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid-Dynamical Finite-Element Analysis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, Oct 2008, p.3591-3691
- [Mil93] Miller, T.J.E.: Switched Reluctance Motors and their Control Magna Physics Publishing and Clarendon Press 1993
- [Nor05] Nord, G.; Jansson, P.; Petersen C.C., Yamada, T.: Vertical Electrical Motor using Soft Magnetic Composites. IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Drives IEMDC 2005 p.373-377
- [Pul98] Pulle, D.; Petersen, I.R.: A Unified approach to Switched Reluctance Drive Modeling: Application to an axial flux (SRASF) motor. Proceedings of IEEE PESC 1998 p.1681-1686
- [Rei98] Reinert, J.: Optimierung der Betriebseigenschaften von Antrieben mit geschalteter Reluktanzmaschine. Dissertation 1998, RWTH Aachen
- [Ris20] Risse, St.: Entwicklung einer geschalteten Reluktanzmaschine als Elektrofahrzeugantrieb, Dissertation 2002, RWTH Aachen
- [Sca06] Schramm, A.: Redundanzkonzepte für Geschaltete Reluktanzantriebe. Dissertation 2006 UBW München, Lehrstuhl Antriebstechnik
- [Sci09] Schinnerl, B.: Analytische Berechnung Geschalteter Reluktanzmaschinen, Dissertation 2009 UBW München, Lehrstuhl Antriebstechnik
- [Sta10] A. Stadler, C. Gulden: The Calculation of Eddy Current Losses in Tube Wound High Current Transformer Windings. Proceedings of EOE-PEMC 2010.
- [Ste92] Steiert, U.: Drehmomentsteuerung einer Reluktanzmaschine mit beidseitig ausgeprägten Polen und geringer Drehmomentwelligkeit. Dissertation Universität Karlsruhe 1992
- [Vi08-1] Vijayakumar, K.; Karthikeyan, R. et al.: Two Dimensional Magnetic and thermal Analysis of High Speed Switched Reluctance Motor using Soft Magnetic Composite Material. IEEE TENCON 2008, p.1-5
- [Vi08-2] Vijayakumar, K.; Karthikeyan, R. et al.: Influence of Soft Magnetic Composite Material on the Electromagnetic Torque Characteristics of Switched Reluctance Motors. IEEE Power India Conference POWERCON 2008 p. 1-6
- [Vi08-3] Vijayakumar, K.; Karthikeyan, R. et al.: Torque to Weight Ratio Improvement with Soft Magnetic Composite Material in high Speed Switched Reluctance Motor. Proceedings of IEEE TENCON 2008, p. 1-4
- [Vio04] Viorel, I.A.; Crivii, M.; Löwenstein, L. et al: Direct Drive Systems with Transversal Flux Reluctance Motors. Acta Electrotechnica Vol.45, No.3 2004 p. 33-40
- [We88] Weh, H.; Jiang, J.: Berechnungsgrundlagen für Transversalflussmaschinen, Archiv für Elektrotechnik Bd. 71 (1988), H.3, S.187-199

[Wo97] Wolff, J.: Drehzahlveränderbarer Industrieantrieb mit Geschaltetem Reluktanzmotor. Dissertation Universität Karlsruhe, 1999

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Forschungsvorhaben erfolgte eine konsequente Zusammenarbeit mit allen Verbundpartnern innerhalb des Wachstumskerns LEANTEC. Intensivere Partnerschaften, die inhaltlich im Verbundprojekt 1 zu finden sind, bestanden mit:

- der SAMAG Saalfelder Werkzeugmaschinen GmbH,
- der BITSz engineering GmbH,
- der Schmuhl FVT GmbH & Co. KG,
- dem KI Keramik-Institut GmbH und
- der TU Dresden, Lehrstuhl für Baumaschinen und Fördertechnik (BFT).

Darüber hinaus erfolgten weitere Zusammenarbeiten mit Zulieferern und Forschungseinrichtungen, die eine erfolgreiche Umsetzung des Forschungsvorhabens ermöglichten. Das sind u. a.:

- die MIMNET GmbH,
- die Magnettechnik Kleine,
- die EPSa GmbH,
- die IBE Ermisch GmbH und
- die TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft, Metallographie-Labor.

II Eingehende Darstellung

1 Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)

1.1 AP 1.1.5 Voruntersuchungen am vorhandenen Labormuster Elektr. Aktivbauteile

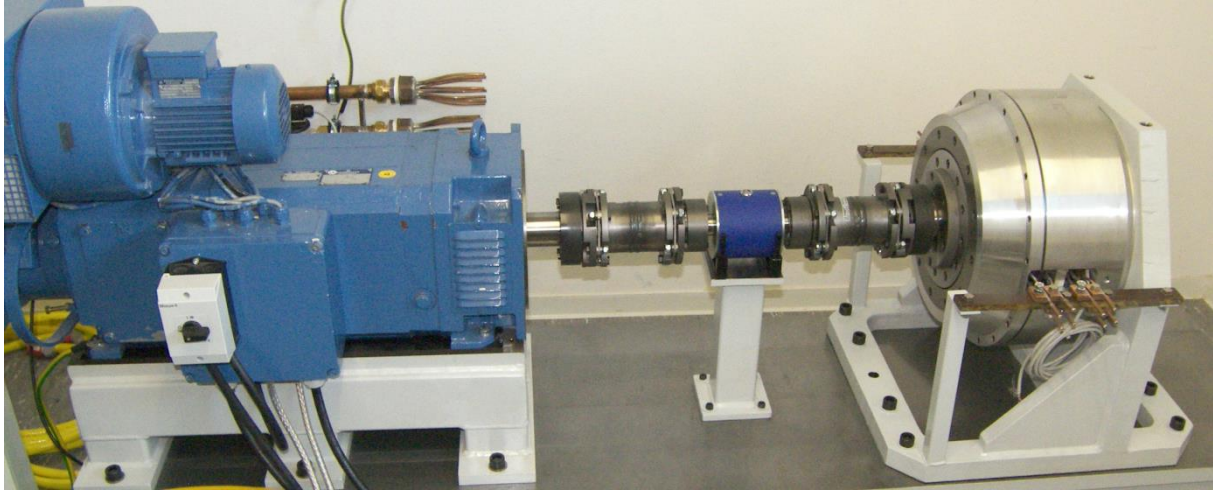


Abbildung 1: Versuchsstand Testmotor bei der BITSz in Zwickau; der LEANTEC-Testmotor ist auf der rechten Seite zu erkennen

Zunächst erfolgte die Erarbeitung einer Messkonzeption und eines Ablaufplans für Messungen am Labormuster. Die experimentellen Untersuchungen am Labormuster beschränkten sich auf eine allgemeine Funktionsprüfung hinsichtlich Drehzahl- und Drehmomentverhalten im Auslegungsbereich sowie die Messung der Spannungs-Strom-Kennlinien bei verschiedenen Arbeitspunkten des Labormusters und thermische Messungen.

Auffällig dabei waren insbesondere Schwingungen und Geräusche im oberen Drehzahlbereich, was eingehendere Voruntersuchungen zur mechanischen Stabilität der Rotoren und zu den magnetischen Eigenschaften des verwendeten Magnetkreismaterials bei höheren Schaltfrequenzen des erregenden Stroms notwendig erscheinen ließ.

Aus thermischer Sicht konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Allerdings wird an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Verwendung von unbehandeltem Wasser in Kontakt mit den Kupferrohren bei Spannungen über 800 V die Gefahr der Kupfererosion besteht. Es sind Vorkehrungen bezüglich des Schutzes vor Gefährdungen durch unzureichende Potenzialtrennung zwischen Kühlmedium und elektrischer Einspeisung zu treffen.

1.2 AP 1.2.5 Erstellung Simulationsmodell elektrische Aktivbauteile

AP 1.2.5.1 Voruntersuchungen zu Materialien und Werkstoffen

Magnetische Eigenschaften von SMC

Während die konstruktiven und mechanischen Eigenschaften von SMC hinreichend bekannt sind, ist ihre magnetische Eignung im Vergleich zu den üblichen lamellierten Eisenkreisen bei hohen Frequenzen und hohen Feldstärken nur lückenhaft nachgewiesen.

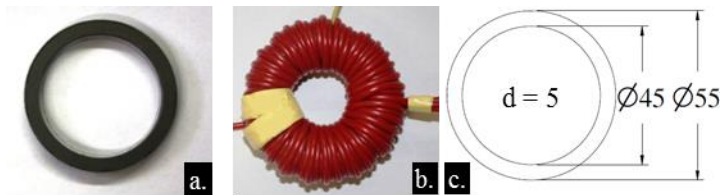


Abbildung 2: Ringprobe: a. Ring aus SMC-Material; b. Ring mit Erreger- und Messwicklung; c. Genormte Abmessungen einer Ringprobe

Anhand von standardisierten Ringkernproben (siehe Abbildung 2) wurden deshalb verschiedene SMC-Materialqualitäten und für hohe Frequenzen geeignete Elektrobleche (EB) im Bereich von 50 Hz bis 2 kHz und Induktionen von bis zu 1,5 T einer Messung der spezifischen Ummagnetisierungsverluste und der relativen Permeabilität entsprechend DIN EN 60404-6 unterzogen. Bei den in Tabelle 3 aufgeführten SMC-Ringproben handelt es sich um eine Auswahl von acht untersuchten Proben.

Tabelle 3: Ringproben aus SMC und Elektroblech

Bezeichnung	Typ	Herstellung	Material
SMP*	SMC	*gedreht	SMP 1321
3P700*	SMC	*gedreht	Somaloy 3P 700
MIM4	SMC	gepresst	Fe 94 % + Binder
3P700	SMC	gepresst	Somaloy 3P 700
3P1000	SMC	gepresst	Somaloy 3P 1000
NO20	EB	gelasert	NO20
35A	EB	gelasert	M350-35A
Hersteller: SMP – Sintermetalle Prometheus GmbH; 3P700 / 3P1000 – Höganäs AB; MIM4 – MIMNET GmbH; NO20 – ThyssenKrupp			

Die Neukurven der SMC-Prüflinge sind in Abbildung 3 gefaltet dargestellt. Dabei hat das von allen untersuchten Pulververbundwerkstoffen am längsten am Markt befindliche SMP 1321 bei einer magnetischen Feldstärke $H = 10 \text{ kAm}^{-1}$ die niedrigste magnetische Polarisation (J_{10000}). Den geringsten Magnetisierungsbedarf hat der 3P1000-Prüfling. Die magnetische Polarisation von SMP (J_{10000}) wird von ihm schon bei einer Feldstärke von $2,2 \text{ kAm}^{-1}$ erreicht bzw. die magnetische Polarisation $J_{10000}(3P1000)$ ist mit 1,59 T die größte aller untersuchten SMC-Ringproben. Unwesentlich höher ist der Magnetisierungsbedarf für den 3P700-Prüfling. Bemerkenswert ist dabei, dass auch die untersuchten Elektroblech-Prüflinge mit 1,65 T bzw. 1,64 T nur geringfügig höhere Werte aufweisen. Diese erzielen vor allem im unteren Feldstärkebereich ($H < 0,5 \text{ kAm}^{-1}$) gegenüber SMC höhere magnetische Polarisationen bei gleicher Feldstärke.

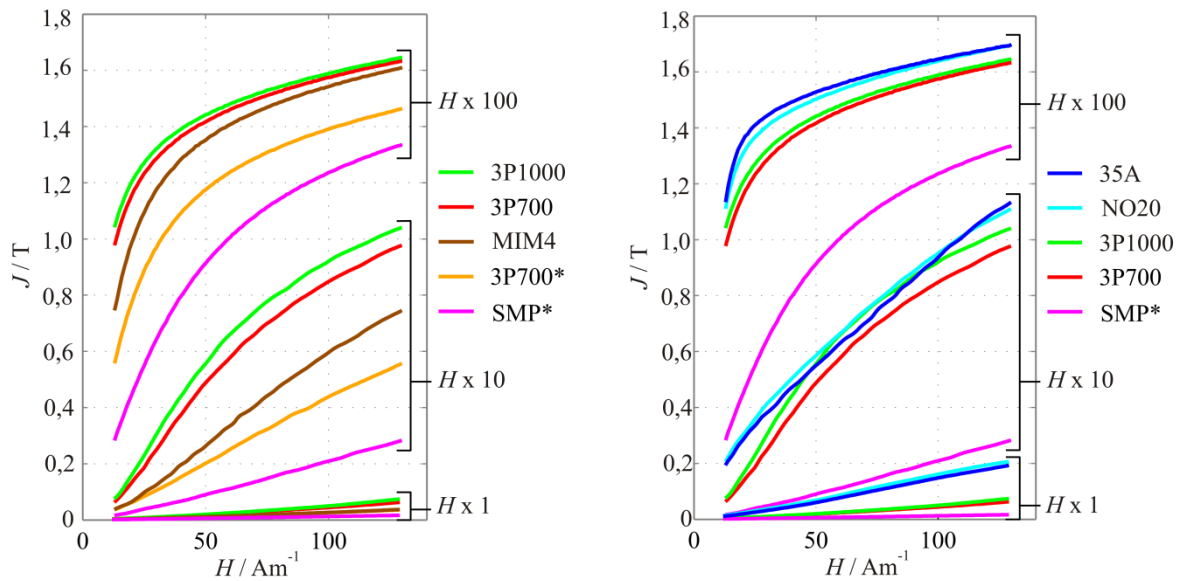


Abbildung 3: Messtechnisch ermittelte Neukurven (Magnetisierungskennlinie) in gefalteter Darstellung bei $f = 50$ Hz; SMC-Ringproben (links); SMC- und Elektroblech-Ringproben (rechts)

Einen wesentlichen Einfluss auf die Neukurve hat der Herstellungsprozess der Ringproben (Tabelle 3). Der Prüfling 3P700* wurde aus einer Ronde gedreht, 3P700 in die Ringform gepresst. Letzterer weist eine deutlich höhere magnetische Polarisation bei gleicher Feldstärke auf.

In Abbildung 4 sind die Amplitudenpermeabilitäten μ_a ausgewählter SMC- und Elektroband-Ringproben über der Feldstärke aufgetragen. Die Elektroband-Prüflinge haben im unteren Feldstärkebereich ($H < 0,5 kAm^{-1}$) eine deutlich höhere Permeabilität. Das spiegelt sich in der höheren maximalen Amplitudenpermeabilität $\mu_{a, max}$ wieder. Ab $H = 0,5 kAm^{-1}$ sind die Ringproben aus 3P Somaloy 1000 und 3P Somaloy 700 durchaus konkurrenzfähig. Die Weiterentwicklung von SMC-Pulvern und Herstellungsverfahren für SMC-Magnetkreiselemente wird beim Vergleich von Somaloy®- mit SMP-Ringproben in Abbildung 3 sehr deutlich.

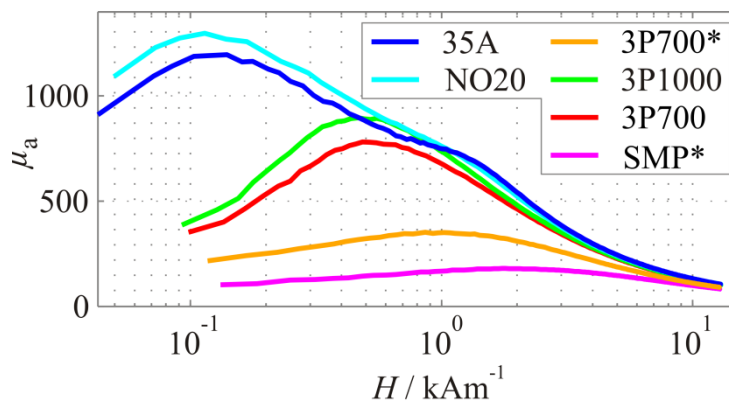


Abbildung 4: Amplitudenpermeabilität μ_a

Die gemessenen spezifischen Gesamtverluste p_{FE} der untersuchten SMC-Ringproben sind bei unterschiedlichen magnetischen Polarisationen in Abbildung 5 über der Frequenz aufgetragen. Bei niedriger Polarisation ($J = 0,5 T$) dominieren die spezifischen Hystereseverluste p_H , welche linear mit der Frequenz in p_{FE} eingehen. Mit ansteigender Polarisation nehmen die spezifischen

Wirbelstromverluste p_w zu, d.h. der quadratisch mit der Frequenz eingehende Term aus (1) wird stärker gewichtet.

$$p_{Fe} = p_H + p_W = F_H(J) \cdot f + F_W(J) \cdot f^2 \quad (1)$$

Nicht in Abbildung 5 dargestellt sind die Verläufe für Elektroblech. Aufgrund der komplexen Magnetkreisgeometrie, die sich aus SMC besser herstellen lässt, werden für die weiteren Untersuchungen die Materialien Somaloy 3P700 bzw. 3P1000 favorisiert. Diese können ohne größere Nachbearbeitung in die gewünschte Form gepresst werden.

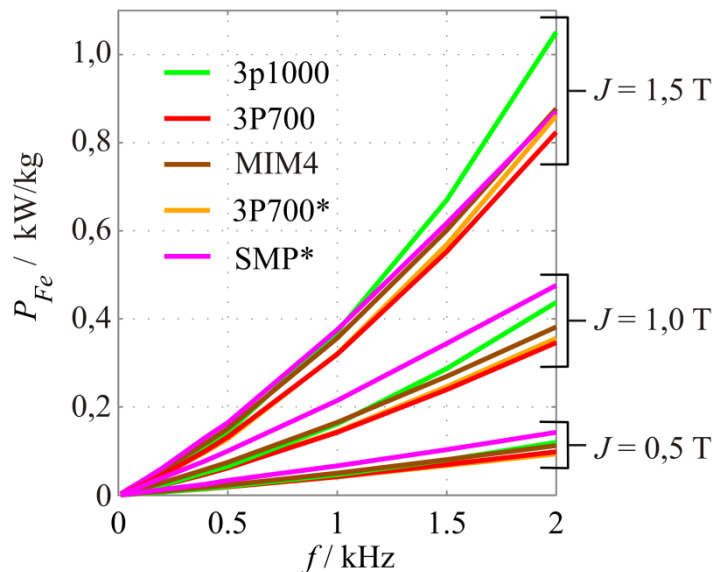


Abbildung 5: Messtechnisch ermittelte Eisenverlustdichte verschiedener SMC-Materialien für Induktionen von $B = (0,5; 1,0; 1,5)$ T abhängig von der Frequenz

Da aufgrund der geringen Luftspaltweite sehr hohe Maßhaltigkeitsanforderungen an den magnetischen Kreis gestellt werden, ist eine mechanische Nachbearbeitung der luftspaltseitigen SMC-Flächen nötig. Allerdings ist zu vermuten, dass diese Bearbeitung zur Bildung einer leitfähigen Schicht an der Oberfläche der SMC-Zähne führt und dadurch die Ummagnetisierungsverluste steigen. Deshalb wurde der Einfluss verschiedener Bearbeitungsverfahren (Schleifen, Fräsen) eingehend auf metallographischer und elektromagnetischer Basis untersucht. Darüber hinaus wurde ein Teil der Proben anschließend im Säurebad mit Salpetersäure geätzt, um die beim Bearbeiten entstandene leitfähige Schicht wieder zu entfernen und außerdem die Oberflächenstruktur für optische Untersuchungsmethoden zugänglich zu machen.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnte für die Bearbeitungsmethode Fräsen kein messbarer Einfluss auf die Ummagnetisierungsverluste ermittelt werden. Bei der Bearbeitungsmethode Schleifen konnte eine geringe Verlusterrhöhung festgestellt werden. Das anschließende Ätzen brachte für beide Bearbeitungsverfahren keine Veränderung der gemessenen Werte. Bei der mechanischen Nachbearbeitung des magnetischen Kreises ist also die Methode des Fräsens zu bevorzugen.

Die vorangegangenen Ausführungen werden noch detaillierter in einer am Lehrstuhl ausgearbeiteten Veröffentlichung präsentiert [Bar13].

Weitere Materialien

Die Vergussmasse des Statorträgers wurde hinsichtlich ihrer thermischen Leitfähigkeit von der Firma Schmuhl untersucht. Es konnte dabei ein Wert von $\lambda = 0,91 \text{ W/mK}$ ermittelt werden.

AP 1.2.5.2 Modellierung und Simulation des Stators

Auf Basis der o. g. Voruntersuchungen bzw. Erkenntnisse erfolgten die Erstellung erster Modelle für die 2- u. 3D-Simulation zur stationären Magnetfeldberechnung eines Motorsegmentes aus 5 Polpaaren sowie erste Testrechnungen und die Vorbereitung des Modells für transiente Berechnungen. Schwerpunkt der 2D-Untersuchungen war die Ermittlung von Ummagnetisierungsverlusten in den SMC-Abschnitten des Stators. Die 3D-Anordnungen dienen zur Bestimmung der Magnetfeldstreuung und der Flussausbildung in den magnetischen Aktivteilen des Stators. Damit kann der Einfluss des Magnetkreis-Designs auf die Luftspaltfeldkurve bestimmt werden. So kann gezeigt werden, dass die Separierung des Stators in einzelne u-förmige Magnetkreise sich nicht negativ auf die Ausbildung des Drehmoments und die Verluste auswirkt.

Simulative Untersuchung des Einflusses der mechanischen Trägerkonstruktion für die Magnetkreisabschnitte des Stators und des Rotors auf die Ausbildung und die Höhe des magnetischen Feldes sowie die Ummagnetisierungsverluste wurden durchgeführt. Durch die Zerlegung der massiven Statorsegmente in einzelne u-förmige Magnetkreisabschnitte kann die Masse reduziert werden. Die dadurch fehlende mechanische Verbindung der Statorsegmente untereinander kann durch eine entsprechende glasfaserverstärkte Trägerplatte übernommen werden. Entsprechende mechanische Untersuchungen beim Partner TUD-IVMA brachten positive Ergebnisse. Die magnetischen Einflüsse sind vernachlässigbar. Die entstehenden Kräfte bzw. Drehmomente können übertragen werden.

Zusätzlich wurden auch Variationsrechnungen zum Einfluss von Luftspaltveränderungen und zur Veränderung der gesamten Nutgeometrie im Stator durchgeführt. Entsprechende FEM-Simulationen zeigten, dass die Größe des Luftspalts im Zusammenspiel mit der Nuthöhe entscheidenden Einfluss auf den Streufluss hat. Je breiter und dafür flacher die Nut ist, desto weniger spielen Luftspaltänderungen für den Nutstreufluss eine Rolle. Ordnet man z. B. die vier Windungen nicht quadratisch sondern nebeneinander in der Nut an, sinkt der Streufluss um (26 ... 40) %.

Eine weitere Verlustquelle im Stator stellen die Wicklungen mit den Kupferhohlleitern dar. Die reinen Gleichstromverluste werden hierbei noch durch die frequenzabhängigen Stromverdrängungsverluste erhöht. Die exakte analytische Berechnung der Stromverdrängungsverluste ist allerdings nur in einfachen Spezialfällen möglich. Eine transiente FEM-Simulation ist aufgrund des komplexen Stromverlaufs nicht sinnvoll.

Ein analytisches Modell wurde deshalb unter bestimmten Vereinfachungen auf die vorliegenden Gegebenheiten angepasst. Die grundlegende Berechnung stützt sich auf die analytischen Formeln zur Bestimmung des Stromverdrängungsfaktors, die in [Mül06] und [Car07] beschrieben werden. Eine Verallgemeinerung dieser Formeln, die auch rechteckige Hohlleiter erfasst, wird in [Rei65] dargelegt. Die hier dargestellten Methoden gelten dabei jeweils nur für einen sinusförmigen Stromverlauf konstanter Frequenz. Der Zeitverlauf der Phasenströme eines LEANTEC-Motors ähnelt aber einem Rechteck, lässt sich mithin also als Summe sinusförmiger Schwingungen verschiedener Amplitude und Frequenz ausdrücken. Für jede dieser Schwingungen wurden die Kupferverluste unter dem Einfluss der Stromverdrängung berechnet. Die Summe dieser Teilverluste bildet die

Gesamtkupferverluste einer Wicklung und muss am Ende noch mit der Anzahl der Wicklungen multipliziert werden.

Das Modell vereinfacht die Realität dahingehend, dass von einer unendlich hohen Eisenpermeabilität des Statoreisens ausgegangen wird. Die Bewegung des Rotors, die das Nutquerfeld an den Statorzähnen beeinflusst, kann ebenfalls nicht berücksichtigt werden, bzw. wird im Modell angenommen, dass der Rotor das Nutquerfeld bei Rotation nicht verändert. Die ursprünglichen Gleichungen gehen von einer unendlich langen Nut aus. Im LEANTEC-Motor wird die Nut aber regelmäßig durch magnetisch nicht leitfähige Abschnitte des Statorträgers unterbrochen, in denen Stromverdrängung in weit geringerem Maße nur durch den Skin-Effekt hervorgerufen wird. Dem wird durch Aufteilung des Gleichstromwiderstandes in einen durch Stromverdrängung beeinflussten und einen unbeeinflussten Teil Rechnung getragen. Übergangseffekte zwischen den Bereichen sind im Modell nicht erfassbar. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die berechneten Stromverdrängungsfaktoren und Kupferverluste am Beispiel des Demonstrators magnetisches Spannmittel (siehe Abschlussbericht zu TP 3.5) bei verschiedenen Drehzahlen und festem Drehmoment.

Tabelle 4: Stromverdrängungsfaktor und Kupferverluste für verschiedene Arbeitspunkte am Beispiel des Demonstrators RAKO Spannmittel

<i>M</i> in Nm	<i>n</i> in rpm	<i>k_r</i>	<i>P_{Vcu}</i> in W
500	300	2,97	423,3
	600	4,88	598,7
	1000	6,52	864,6
	1600	7,49	825,7

Es ist klar erkennbar, dass der Stromverdrängungsfaktor mit steigender Drehzahl zunimmt und aufgrund der großen Frequenzen auch beachtliche Höhen erreicht. Im Vergleich zu den Eisenverlusten, die die Kupferverluste um Faktor 3,5 ... 15 übertreffen, sind die Kupferverluste trotzdem sehr gering, da durch den großen Leiterquerschnitt auch nur geringe ohmsche Widerstände auftreten.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wird empfohlen, für weitere LEANTEC-Motoren die Polzahl und/oder die Drehzahl zu verringern, um die maximale elektrische Frequenz zu senken.

AP 1.2.5.3 Modellierung und Simulation des Rotors

Die Variantenrechnungen mit den 2D- und 3D-Modellen haben Zahnformen für Stator und Rotor ergeben, die mit zunehmender radialer Ausdehnung der Maschine bezüglich ihrer Umfangsabmessungen größer werden ("Tortenstück-Form") und die im Fall der Statorzähne außerdem in axialer Richtung in Luftspaltnähe einen kleineren Querschnitt aufweisen, um die Luftspaltinduktion zu erhöhen und die Verluste im breiteren Rücken zu senken.

Die Rotorzähne bestehen in radialer Richtung aus zwei Einzelzähnen, was zu einer weiteren Massereduzierung der Aktivteile beiträgt, aber keinen Nachteil bezüglich der magnetischen Eigenschaften aufweist. Mit den numerischen Simulationsmodellen kann für die getrennten Rotorzähne sogar eine Senkung der Streuung nachgewiesen werden. Eine verringerte Streuung im Zahnbereich bewirkt eine Reduzierung von magnetischen Kräften, die in axialer Richtung auf die Rotorscheibe wirken und damit den Luftspalt einseitig vergrößern. Eine einseitige

Luftspaltvergrößerung würde neben einem verschlechtertem Betriebsverhalten zu erhöhten mechanischen Spannungen bis hin zum Bruch der Rotorscheibe führen.

Die 2D- und 3D-Rechnungen zeigen auch die Anhängigkeit der Streuung von der Lage der Ständer- und Rotorzähne zueinander sowie von der Höhe des Stromes. In der unausgerichteten Position ist der Anteil der Streuung (36 %) an der gesamten Flussverkettung unabhängig vom Strom. Bis zu ca. 100 A ist in der ausgerichteten Position der Anteil der Streuung konstant (15 %) und oberhalb von 100 A nimmt mit steigender Sättigung der Zähne der Streuanteil (30 %) zu.

AP 1.2.5.4 Modellierung der Kühlung

Die Berechnung der Übertemperaturen im Motor erfolgte mittels eines thermischen Netzwerkes, auf das im Unterpunkt zu AP 1.2.5.6 noch näher eingegangen werden soll. Im Netzwerk werden konvektive Wärmeübergänge durch Ersatzwiderstände bestehend aus dem Wärmeübergangskoeffizient α und der angeströmten Fläche ausgedrückt. Inhalt des AP 1.2.5.4 ist es, für alle diese konvektiven Übergänge die Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln. Im Einzelnen müssen die Wärmeübergänge Gehäuse – Umgebung, Hohlleiter – Kühlmedium und Rotor – Luft und Stator – Luft im Luftspalt untersucht werden. Für den Referenzmotor und den Extruder Version 2 ist neben der Innenleiterkühlung eine zusätzliche Wasserkühlung im Stator der Maschine vorgesehen. Hier müssen entsprechend ebenfalls die Wärmeübergangskoeffizienten der verwendeten Edelstahlkapillarrohre an das Kühlmedium berechnet werden.

Gehäuse

Alle untersuchten LEANTEC-Motoren waren in ein unlackiertes, glattes Metallgehäuse eingebettet. Als Wärmeübertragungsmechanismen kommen hier Strahlung und natürliche Konvektion in Betracht, da das Gehäuse nicht angeströmt wird. Die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten hängen von der Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft ab und müssen deshalb für jeden Zeitschritt neu berechnet werden. Aufgrund der schlechten Wärmeübergänge am Gehäuse und der recht langen Wege von den Wärmequellen werden nur etwa 3 % der gesamten Verlustleistung über die Gehäuseoberfläche abgeführt. Der Einfluss auf die Maximaltemperaturen ist gering.

Innenleiterkühlung / Statorkühlung

Die Innenleiterkühlung bzw. die optionale Statorkühlung stellen die Hauptwärmesenken des LEANTEC-Motors dar. Für die Bestimmung von Druckverlust und Wärmeübergangskoeffizient erfolgte hauptsächlich eine analytische Rechnung und – zur Validierung der Ergebnisse – auch eine numerische Strömungssimulation für die Innenleiterkühlung mittels der kommerziellen Software Ansys Fluent. Vorgegebene Größe ist dabei stets die Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, die auf ca. 1,5 bar festgelegt wurde. Mit dieser Maßgabe kann pro Hohlleiterwicklung mit vier Windungen ein Volumenstrom von ca. 1,5 l/min realisiert werden. Der Wärmeübergangskoeffizient liegt für diesen Fall bei ca. 15000 W/m²K. Die numerische Simulation bestätigt diese Ergebnisse. Die Wärmeübergangszahlen sind so hoch, dass der entsprechende thermische Widerstand im Vergleich zu den thermischen Leitwiderständen hin zur Wärmesenke verschwindend gering ist. Die Maximaltemperatur im Motor ist daher nur wenig vom tatsächlichen Kühldurchfluss und mehr von den innermotorischen Wärmeübergängen abhängig.

Luftspalt

Um die Wärmeübergangskoeffizienten im Luftspalt zu ermitteln, müssen zunächst Randbedingungen geklärt werden um die Form der Strömung zu bestimmen. Da der Luftspalt nur an der Außenseite über Fenster im Gehäuse mit der Umgebung verbunden ist, kann es nicht zu einer radialen Durchströmung kommen. Weiterhin verhindert die geringe Luftspaltweite die Entstehung von Turbulenzen. Die Viskosität von Luft in Verbindung mit der Oberflächenreibung sorgt für das Entstehen einer laminaren Grenzschicht, in der Turbulenzen nicht möglich sind. Diese Schicht nimmt im LEANTEC-Motor mehr als die halbe Luftspaltweite pro Luftspaltseite ein. Es können deshalb keine Turbulenzen entstehen und die Luftspaltströmung verhält sich wie eine laminare Couette-Strömung. Bei einer laminaren Strömung kommt es nicht zu einer Durchmischung der „Stromfäden“. Die an das Kühlmedium abgegebene Wärmeleistung kann sich deshalb nur über reine Wärmeleitung im Luftspalt ausbreiten. Als Formel für den Wärmeübergangskoeffizienten im Luftspalt gilt

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{2\delta}, \quad (\text{II } 2)$$

wobei die Nußelt-Zahl aufgrund der laminaren Verhältnisse auf ihren unteren Grenzwert 2 festgesetzt ist. Zusätzlich werden die thermische Leitfähigkeit von Luft λ_L und als charakteristische Länge die doppelte Luftspaltweite 2δ berücksichtigt. Für den Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich dabei für eine Temperatur von 60 °C und eine Luftspaltweite von 300 µm ein Wert von ca. 95 W/m²K.

AP 1.2.5.5 Modellerweiterung für dynamische Betriebsfälle

Dieses Arbeitspaket beinhaltete eine Erweiterung des zu erstellenden Netzwerkes um die Wärmekapazitäten. Die Wärmekapazität gibt das Speichervermögen eines Materials für thermische Energie an. Je größer sie ist, desto mehr thermische Energie wird gespeichert und desto langsamer erwärmt sich das Material. Die Berücksichtigung dieser Kapazitäten ermöglicht die Simulation dynamischer Lastfälle und ermöglicht das Gewinnen zeitlicher Abhängigkeiten bei der Erwärmung. Aus den so entstehenden Temperatur-Zeit-Verläufen kann die thermische Zeitkonstante einzelner Motorabschnitte ermittelt werden. Diese ermöglichen eine Vorhersage darüber, wann ein mit Bemessungslast betriebener Motor seine Endtemperatur erreicht, bzw. wann ein mit Überlast betriebener Motor unzulässig hohe Temperaturen erreicht.

AP 1.2.5.6 Thermische Netzwerkmodellierung

Die Berechnung der Maschinenerwärmung erfolgte über ein Wärmenetzwerk. Die gegebene Motorgeometrie wird dabei in quader- oder zylinderförmige Volumina aufgeteilt, in deren Mittelpunkt jeweils ein Knotenpunkt liegt. An diesem Knotenpunkt kann die mittlere Volumentemperatur entnommen und gegebenenfalls im Volumen erzeugte Verlustleistung eingespeist werden. Das im Projekt aufgestellte Wärmenetz umfasst 51 Knoten und umspannt die Hälfte einer Polteilung einer Phase. Zusätzlich wird ein Teil des Gehäuses, die Stirnfläche des Motors sowie eins der beiden Lager berücksichtigt. Die Temperaturen im restlichen Motor ergeben sich dann über Symmetriebedingungen. Jedem Volumen können zusätzlich Wärmekapazitäten zugeordnet werden, die das Netzwerk für dynamische Betriebsfälle erweitern. Alle Geometrie- und Materialwerte sind über Excel-Tabellen für verschiedene Motortypen und Materialpaarungen beliebig anpassbar. Simulationsgrundlage ist stets eine Umgebungstemperatur von 40 °C und eine Wasservorlauftemperatur von 20 °C. Wo bekannt, sind die Materialeigenschaften der verwendeten

Stoffe temperaturabhängig hinterlegt, sodass auch andere Umgebungstemperaturen und/oder Wasservorlauftemperaturen simuliert werden können.

Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Wärmenetz des Stators. Ein Statorzahn besteht dabei aus einem Rückenbereich, einem äußeren Zahn und einem inneren Zahn. Davon eingeschlossen ist die Wicklung im Nutbereich. Der Statorzahn ist demnach in sieben Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt werden gemäß den in AP 1.2.5.2 ermittelten spezifischen Verlustdichten unterschiedliche Gesamtverluste eingespeist. Über die Widerstände, die aus dem Bildabschnitt herausragen, erfolgt eine Anbindung an das restliche Wärmenetz im Motor.

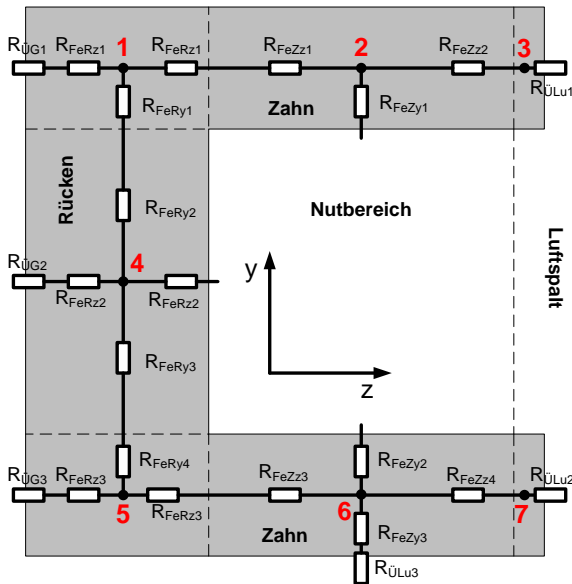


Abbildung 6: Zweidimensionaler Ausschnitt aus dem Wärmenetz eines Statorisenelements

Abbildung 7 zeigt das Wärmenetz des Nutbereichs und der Wicklung. Es wird zusätzlich die Originalgeometrie des Labormusters gegenübergestellt. In diesem Wärmenetz gibt es fünf Knoten, in die die Kupferverluste eingespeist werden und vier Knoten, in die die Verlustleistung abgeführt wird (Innenleiterkühlung). Entscheidend für den Wärmeübergang im Nutbereich ist die Isolierung, deren Dicke möglichst genau bekannt sein muss.

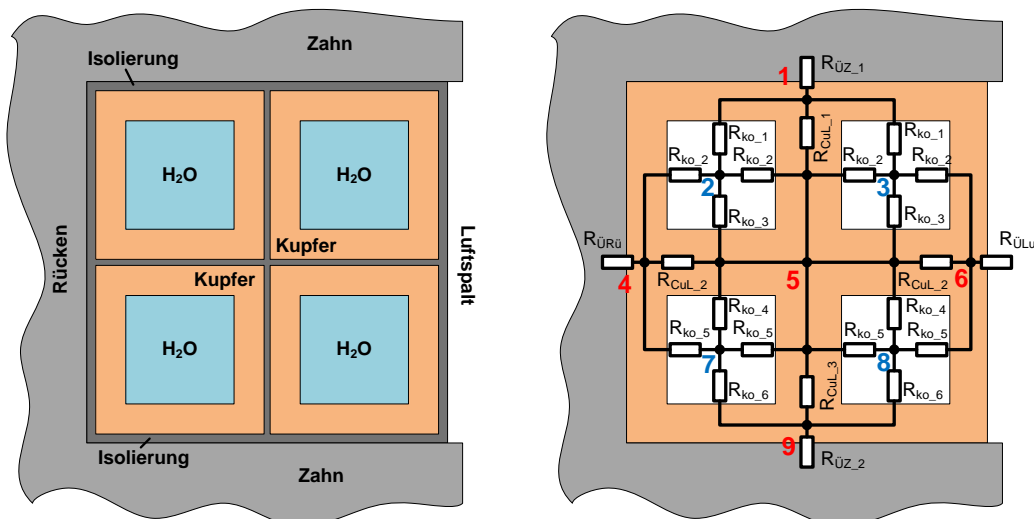


Abbildung 7: Nutgeometrie und angelegtes Wärmenetz für den Nutbereich

Das Wärmenetz wird mit Hilfe einer angepassten Knotenspannungsanalyse analytisch unter Berücksichtigung der Wärmekapazitäten gelöst. Im Ergebnis kann ein zeitabhängiger Erwärmungsverlauf gewonnen werden. Je nach Anforderung, ist es auch möglich eine Abkühlungskurve ohne Verlustleistung, einen Ausfall der Wasserkühlung oder ein Lastspiel mit unterschiedlichen An- und Ausschaltphasen zu simulieren. Abbildung 8 zeigt den Erwärmungsverlauf an vier ausgewählten Knoten am Beispiel der im Voraus berechneten Verluste des Demonstrators Spannmittel für $M = 500 \text{ Nm}$ und $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.

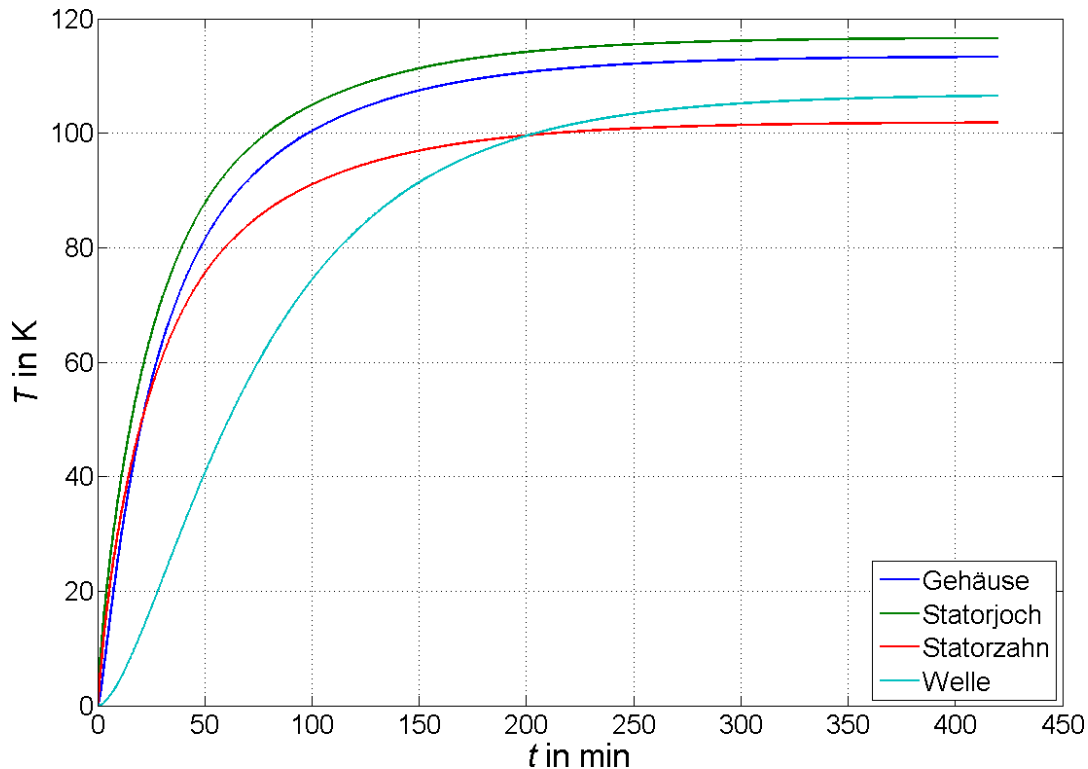


Abbildung 8: Zeitverlauf der Übertemperatur T am Beispiel des Demonstrators Spannmittel bei $M = 500 \text{ Nm}$ und $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

Der asymptotische Verlauf sowie die unterschiedlichen Zeitkonstanten für die verschiedenen Abschnitte lassen sich deutlich erkennen.

Es steht mit dem Wärmenetz ein Werkzeug zur Verfügung, für verschiedenste Ausführungen derselben Geometrie und für unterschiedliche Arbeitspunkte und Umgebungsbedingungen den Erwärmungs- oder Abkühlungsverlauf zu simulieren.

AP 1.2.5.7 Test und Abgleich des Gesamtmodells

Die messtechnischen Voruntersuchungen am Labormuster konnten mit dem neu beschafften Power Analyzer und den dreiphasigen Stromsensoren abgeschlossen werden. Die Ergebnisse für Drehzahl, Drehmoment und daraus berechnete Wirkungsgrade sowie die gemessenen U-I-Kennlinien wurden für verschiedene Lastfälle mit den aus den analytischen und numerischen Berechnungen vorliegenden Ergebnissen verglichen und entsprechende Abgleiche bzw. Anpassungen der Simulationsmodelle vorgenommen. Die Messergebnisse fließen unmittelbar auch in das TP2.3 zur Auslegung des Referenzmotors und den Vergleich mit den simulierten Betriebskennlinien ein.

Die ebenfalls gemessenen Zeitverläufe der elektrischen Größen und insbesondere die der Ströme dienen als Vergleich für die Berechnungen zur Drehmomentwelligkeit im TP2.3.

Ingesamt muss allerdings konstatiert werden, dass die Einsatzfähigkeit des Labormusters stark eingeschränkt war, was auf den mangelnden Erfahrungen aus der Vorprojektphase beruht. So kam es häufig zu Ausfällen aufgrund von mechanischen Instabilitäten (Schwingungen, Schleifen) und zu elektrischen Problemen durch Fehlerströme und Entladungen.

AP 1.2.5.8 Optimierungszyklen

Da aufgrund der Komplexität der Auslegung kein in sich geschlossenes Gesamtmodell erstellt werden kann, kann eine Optimierung immer nur anhand einzelner Parameter erfolgen. Die elektromagnetische und mechanische Auslegung der Aktivbauteile (SMC und Wicklung) darf aber auch nicht unabhängig voneinander erfolgen. Daher ist eine enge Zusammenarbeit zwischen mechanischer und elektromagnetischer Berechnung erforderlich. Abbildung 9 zeigt den Entwurfsgang schematisch.

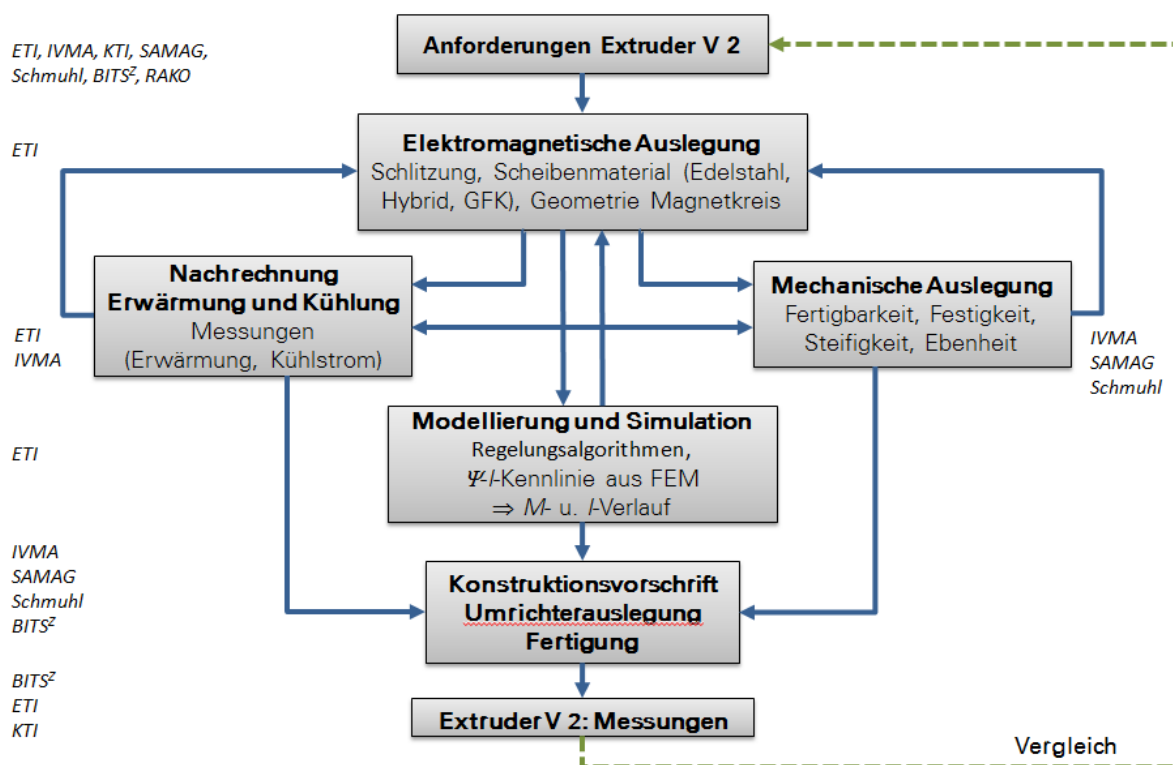


Abbildung 9: Iterationsschema des Entwurfsgangs

Ein beispielsweise optimaler elektromagnetischer Entwurf muss mechanisch auf Machbarkeit, Festigkeit und Verformung überprüft werden. Die Auswirkungen der dabei festgestellten mechanisch notwendigen Veränderungen müssen wiederum elektromagnetisch bewertet werden und erfordern eine erneute mechanische Prüfung. Außerdem müssen während der Auslegung die Temperaturverteilung und die Ansteuerung des Motors berücksichtigt werden. Der Entwurfsprozess ist daher ein aufwendiger iterativer Prozess, welcher die folgenden Punkte umfasst:

- Anforderungen an die Maschine (mechanisch, Bauraum, elektromagnetisch, ...)
- Konstruktive Anpassung der Geometrie
- Ermittlung der elektromagnetischen Kräfte
- Numerische Betrachtung der Steifigkeit
- Festigkeitsberechnungen

- Bauraum- und Gewichtsermittlung
- Auswirkungen auf das thermische Verhalten und die Herstellungstechnologie
- Magnetkreismaterial (SMC gepresst, SMC gefräst)
- Wicklung (hohl, massiv, verseilt)
- Isolierung (Alterungs- und Teilentladungsbeständigkeit, Verguss)
- Trägermaterial
- Kühlsystem
- Analytische Auslegung des magnetischen Kreises und der Wicklung
- Numerische Berechnung der elektromagnetischen Eigenschaften
- Berücksichtigung der Wirbelstromrückwirkung auf das verursachende Feld
- Ermittlung der notwendigen Windungszahl
- Festlegung des Leitertyps der Wicklung
- Bauraumbemessung und Wicklungsauslegung
- Simulation des Antriebsverhaltens
- Berechnung der dynamischen Antriebsverluste und Untersuchung des thermischen Verhaltens
- Auswertung und Überprüfung
- Anpassung der Regelungsstrategie(z. B.: Drehmomentwelligkeit, Dynamik)

AP 1.2.5.9 Integrales Modell als Projektierungsunterstützung

Die teilweise in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Teilmodelle zur Berechnung des magnetischen Kreises aus den SMC- Rotor- und Statorsegmenten, der Wicklungsauswahl und –auslegung und der thermischen Nachrechnung bilden in vereinfachter Form den Kern einer Projektierungshilfe. Ausgangsdaten der Projektierung sind dabei die charakteristischen Parameter des gewünschten Antriebsfalls. Aus diesen Daten werden die notwendigen mechanischen, elektrischen und thermischen Grenzkennlinien klassisch berechnet. Grenzen sind z. B. die Fliehkraft (maximale Drehzahl), die elektrische Spannungsfestigkeit der Isolierstoffe, die verfügbare Zwischenkreisspannung des Umrichters (600 V), die thermische Beständigkeit der Isolierstoffe (Wärmeklasse) und die verfügbare Grenzfrequenz des Umrichters (1 ... 2 kHz). Unter Wahl eines Optimierungsziels (Drehmoment oder Leistung) erfolgt über die o. g. vereinfachten Berechnungsmodelle die Grobauslegung eines geeigneten Antriebsmotors. In Zusammenschaltung mit den Berechnungsprozeduren des Partners IVMA zur Nachrechnung der mechanischen Festigkeit (Steifigkeit der Hauptbauteile) entsteht daraus ein erster Antrieb, der dann durch gezielte Optimierungseinzelrechnungen u. a. mit numerischen Modellen (FEM) in seiner Auslegung verfeinert werden kann.

1.3 AP 1.3.5 Design – Anforderung elektrische. Aktivbauteile

Mit den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen und speziell angefertigten Mustermagnetkreisabschnitten konnte auch die Bauteilentwicklung für die Konstruktion der elektrischen Aktivteile in Zusammenarbeit mit dem Partner SAMAG abgeschlossen werden. Schwerpunkt neben der Grundkonstruktion war die Veränderung der Nutfläche zur Aufnahme einer verstärkten Isolierung, um die Teilentladungseinsetzspannung (TE-Spannung) zu vergrößern. Versuche am ETI hatten gezeigt, dass die bisherige Lösung (Labormuster) nicht geeignet war. Hier

wurden TE-Spannungen in der Größenordnung von 1,25 kV bei Raumtemperatur und 0,75 kV bei 80 °C gemessen. Bei einer Boost-Spannung des Stromrichters von 1 kV ist das nicht ausreichend.

Durch die Zerlegung der massiven Statorsegmente in einzelne U-förmige Magnetkreisabschnitte kann die Masse reduziert werden. Die dadurch fehlende mechanische Verbindung der Statorsegmente untereinander kann durch eine entsprechende glasfaserverstärkte Trägerplatte übernommen werden. Entsprechende mechanische Untersuchungen beim Partner TUD-IVMA brachten positive Ergebnisse. Die magnetischen Einflüsse sind vernachlässigbar. Die entstehenden Kräfte bzw. Drehmomente können übertragen werden.

Der unter 1.5 beschriebene Steg zur Positionierung der Statorsegmente verringert zwar konstruktiv den Fehler bei der Positionierung des Antriebs, kann ihn aber aufgrund der Addition von Herstellertoleranzen nicht gänzlich eliminieren. Deshalb ist eine nachträgliche Feinkalibrierung über die Steuerungssoftware notwendig, deren Anwendung aber auch nur in geringen Grenzen möglich ist. Die hohen Anforderungen aus den Lastenheften der Demonstratoren haben dazu geführt, dass die Bündnispartner einvernehmlich beschlossen haben, die SMC-Statorsegmente nach dem Pressen einzeln zu vermessen und zu sortieren. Damit lassen sich die genannten Schwierigkeiten bei Positionierung der Einzelteile, Positioniergenauigkeit des Motors, Ebenheit, Aufwand an Nachbearbeitung und Gleichmäßigkeit der Kraft- bzw. Drehmomentbildung auf ein Minimum reduzieren.

1.4 AP 1.4.5 Design – Auslegung elektrische Aktivbauteile

Entsprechende Simulationen bestätigen die hohe Sensibilität der Drehmomenterzeugung auf Veränderungen des Luftspalts durch Schwingungen bzw. Fertigungs- und Montagetoleranzen. Die Luftspaltveränderungen während des Betriebs der Maschine sind deshalb auf ein Minimum zu reduzieren. Entsprechende konstruktive Veränderungen der Rotorscheibenbefestigung sind mit den Partnern SAMAG, IVMA und Schmuhl abgestimmt und realisiert worden.

Zusätzlich wurden auch Variationsrechnungen zum Einfluss von Luftspaltveränderungen und zur Veränderung der gesamten Nutgeometrie im Stator durchgeführt. Entsprechende FEM-Simulationen zeigen, dass die Größe des Luftspalts im Zusammenspiel mit der Nuthöhe entscheidenden Einfluss auf den Streufluss hat. Je breiter und dafür flacher die Nut ist, desto weniger spielen Luftspaltänderungen für den Nutstreufluss eine Rolle. Ordnet man z. B. die vier Windungen nicht quadratisch sondern nebeneinander in der Nut an, sinkt der Streufluss um (26 ... 40) %.

Schwerpunkt sind auch entsprechende Anordnungen von direkt gekühlten Leitern, um eine effektive Kühlung bei allen Nutgeometrien zu gewährleisten. Im Fokus sind dafür auch Kühlstrategien, die eine völlige galvanische Entkopplung des Kühlmediums von der auf elektrischem Potenzial befindlichen Kupferwicklung zum Ziel haben. Dazu entstand innerhalb der Arbeiten ein Patent [Pat13].

1.5 AP 1.5.5 Design – Herstellung elektrische Aktivbauteile

In mehreren Schritten haben die Partner gemeinsam ein einheitliches Design für die Aktivteile entwickelt, welches für die SMC-Teile neben einer einfachen Pressbarkeit und damit einer hinreichenden Maßhaltigkeit auch eine ausreichende Positionierbarkeit zueinander in den Vergussformen gewährleistet. Hervorzuheben ist hier ein spezieller Steg an den Statorsegmenten, welcher diese Positionierung vor dem Verguss sicherstellt. Dabei erfüllen die SMC-Teile alle

erforderlichen magnetisch und elektrisch (Erdung und Potenzialausgleich) notwendigen Forderungen.

Die SMC-Segmente sind außerdem mit entsprechenden Radien versehen, damit keine Risse bei der Pressung entstehen und je nach Auslegung notwendige Kühlleitungen oder die Wicklung optimal an die SMC-Oberfläche im Nutbereich thermisch kontaktiert werden können.

Für die Wicklung wurden entsprechend den Anforderungen aus den Prüfungen zur Spannungsfestigkeit und zur Teilentladungseinsetzspannung die Nutmaße neu spezifiziert, um für den Harzverguss genügend Spaltmaß zur Verfügung zu stellen.

Für die elektrischen Zuleitungen am Stator ist die Wicklung so geformt, dass der Abstand der Biegestellen zu den scharfkantigen SMC-Zähnen zu keiner kritischen Erhöhung der elektrischen Feldstärke und damit der Durchschlagswahrscheinlichkeit führt. Der dafür notwendige Platz wird durch das Weglassen von ein bis zwei Statorsegmenten je Anschluss realisiert. Der Einfluss auf die Drehmomentbildung wird in den Berechnungsmodellen berücksichtigt.

1.6 AP 1.8.5 Bauteilentwicklung – Konstruktion elektrische Aktivbauteile

Die Rotorzähne bestehen in radialer Richtung aus zwei Einzelzähnen, was zu einer weiteren Massereduzierung der Aktivteile beiträgt, aber keinen Nachteil bezüglich der magnetischen Eigenschaften aufweist. Mit den numerischen Simulationsmodellen kann für die getrennten Rotorzähne sogar eine Senkung der Streuung nachgewiesen werden. Eine verringerte Streuung im Zahnbereich bewirkt eine Reduzierung von magnetischen Kräften, die in axialer Richtung auf die Rotorscheibe wirken und damit den Luftspalt einseitig vergrößern. Eine einseitige Luftspaltvergrößerung würde neben einem verschlechtertem Betriebsverhalten zu erhöhten mechanischen Spannungen bis hin zum Schleifen der Rotorscheibe am Stator führen.

Neu gegenüber dem ursprünglichen Design der Statorsegmente sind jetzt abgerundete Übergänge zwischen Joch und Zähnen, was zu geringeren Verlustwerten bei der Ummagnetisierung (bis -7,8 %) und der Stromwärme (bis -19,1 %), zu einer besseren Herstellbarkeit sowie zu neuen Möglichkeiten der Wicklungsdrahtgeometrie führt.

Eine weitere Design-Variante ist die Nutzung desselben magnetischen Rückschlusses im Stator für axial aneinander grenzende Segmente. Die sogenannte H-Form der Statorsegmente führt zu einer Reduzierung der axialen Baulänge und der Aktivteilmasse. Mit FEM-Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass keine magnetischen Nachteile auftreten. Selbst bei Bestromung beider benachbarter Phasen (Kommutierung) kommt es zu keinem magnetischen "Engpass" im Rücken, da die Flüsse sich nahezu kompensieren. Nach Abschluss der Kommutierung ist der volle Fluss der bestromten Phase im Rücken wirksam und nur ca. 3 % des Flusses im Statorsegment der bestromten Phase stellt sich auch im Statorsegment der unbestromten Phase ein. Das bringt enorme Vorteile bei der Fertigung, da nur ein Pressteil und damit ein Pressvorgang pro Statorsegment notwendig sind.

1.7 AP 1.9.5 Bauteilentwicklung – Fertigungstechnologie elektrische Aktivbauteile

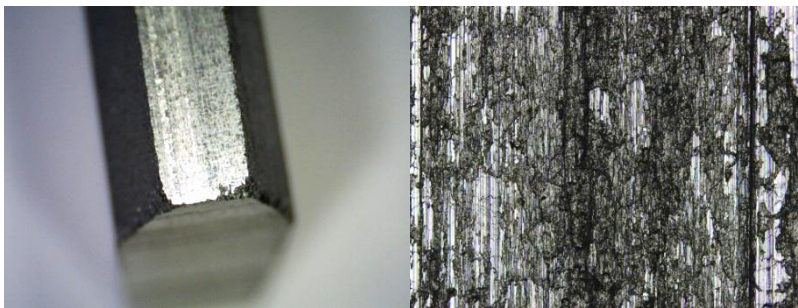
Nach dem Pressen und Einschichten der SMC-Magnetkreisteile in die GFK- bzw. CFK-Formen müssen die Zahnflächen durch Fräsen oder Flachsleifen geplant werden. Diese mechanische Bearbeitung verändert an den behandelten Oberflächen das Materialgefüge und damit die magnetischen Eigenschaften. Insbesondere an den Zahnkopfflächen kommt es zur Überbrückung der Isolierung zwischen den Eisenteilchen.

Messungen an SMC-Statorsegmenten, die unbehandelt, geschliffen bzw. gefräst waren, ergaben keine voneinander abweichenden Veränderungen in der Permeabilität im Frequenzbereich von 50 Hz bis 10 kHz.

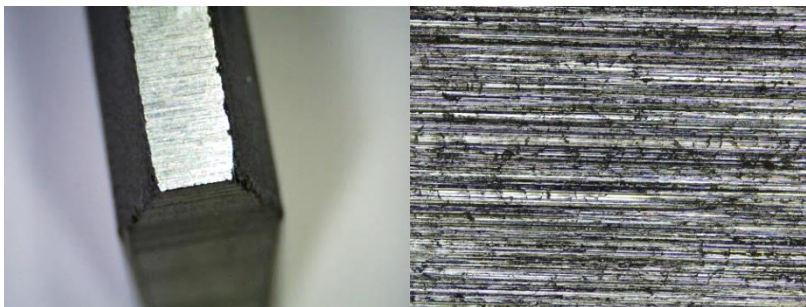
Metallografische Untersuchungen (Abbildung 10) zeigen eine bis zu einen Millimeter große Tiefenwirkung dieser elektrischen Brücken. Durch Feinschleifen und Ätzen mit Salpetersäure lässt sich zunächst visuell eine Trennung der Eisenteilchen wiederherstellen.

An den unbearbeiteten Segmenten zeigen die Zahnflächen ebenfalls keine klare Kornstruktur, so dass zu vermuten ist, dass während des Pressprozesses die Eisenteilchen dieser Zone durch Reibung an den Wänden der Pressform ihre Isolierung verloren haben.

Bei der Einstellung des Luftspalts kann eine solche Software-Kalibrierung wie unter 1.3 für die Toleranzen der Segmente nicht durchgeführt werden, hier ist eine aufwendige mechanische Justage mittels Distanzscheiben notwendig, die vom Partner SAMAG bei der Fertigung angewendet wird.



a) Gefräste Zahnstirnfläche



b) Geschliffene Zahnstirnfläche

Abbildung 10: Makroskopische und mikroskopische Aufnahmen der Zahnstirnflächen

1.8 AP 1.12.5 Integration in das LEANTEC-Antriebssystem elektrische Aktivbauteile

Die großen Erfahrungen der Partner aus dem mechanischen Bereich insbesondere bei der Vermessung von Bauteil- und Fertigungstoleranzen lieferten immer neue Vorgaben für die Nachrechnung des elektrischen und magnetischen Einflusses auf die Zielparameter. Dieses iterative Vorgehen prägte den gesamten geplanten Zeitbereich der Integration der elektrischen Aktivteile in das LEANTEC-Antriebssystem. Leider konnte aufgrund der Entwicklung bei den Demonstratoren dieses AP nicht zu Ende geführt werden. Somit erfolgte die Fertigstellung in die Phase der Aufstockung (siehe Kapitel 2).

1.9 AP 1.13.5 Prüfstandentwicklung elektrische Aktivbauteile

Für die Prüfung von Stator, Rotor und Wicklung wurden Versuche bzw. Prüfstände erarbeitet. Das ETI hat einen speziellen Linearprüfstand für die Messung der Kräfte auf die Statorzahn-Rotorzahn-Paarung in Abhängigkeit von der Zahnstellung, der Bestromung und dem Luftspalt projiziert (siehe Abbildung 11).

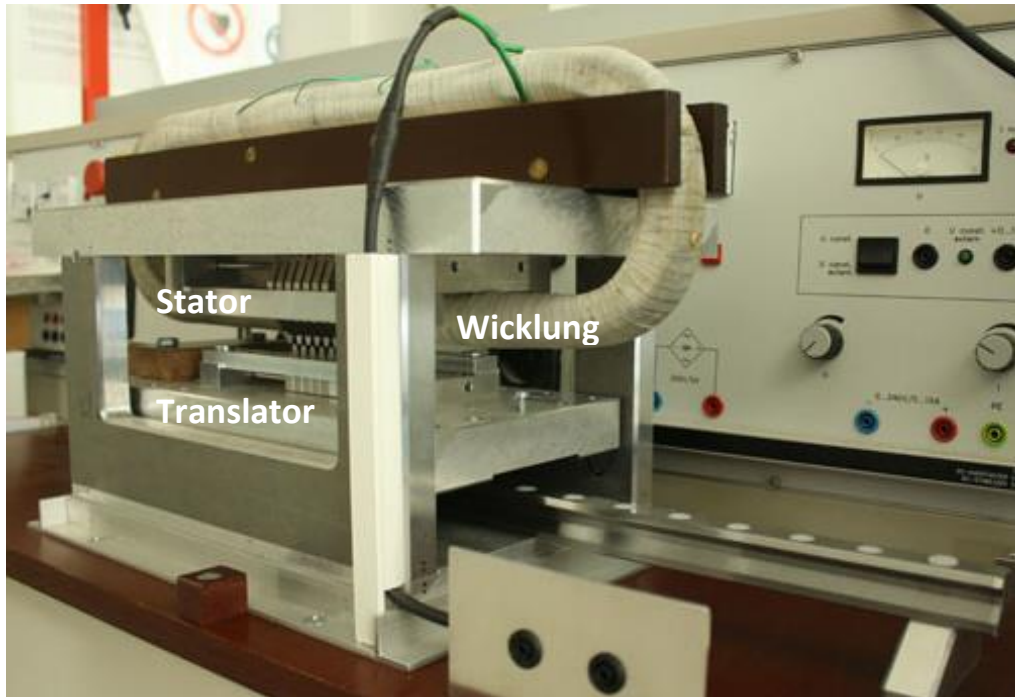


Abbildung 11: Linearprüfstand

Aus den Untersuchungen sollten gleichzeitig auch Rückschlüsse auf die Streubreite (Toleranzen) der in den Simulationen und analytischen Berechnungen verwendeten Parameter gezogen werden, die zu einer Verifizierung der Simulations- und analytischen Berechnungsmodelle von Stator und Rotor beitragen. Der Prüfstand wurde dabei so konstruiert, dass eine modulare bzw. sequenzielle Prüfung der Bauteile möglich ist. D.h., dass einzelne Baugruppen des Prüflings unter verschiedenen Bedingungen, wie z.B. der Speisung sowohl mit sinusförmigen als auch mit von Umrichtern erzeugten Spannungen, und danach in Erweiterung mit anderen Baugruppen getestet werden können. Der Linearprüfstand benötigt zur erweiterten Speisung mit höheren Frequenzen den in der Aufstockungsphase beschafften Verstärker. Bis dahin wurde in Amtshilfe Speisequellen des Nachbarinstituts für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) verwendet.

Es erfolgten außerdem die Entwicklung, die Konstruktion und der Aufbau eines Prüfstands, der geeignet ist, die elektrischen, magnetischen und thermischen Eigenschaften der verwendeten Aktivteile unter einsatznahen Bedingungen zu simulieren (siehe Abbildung 12 und 13).

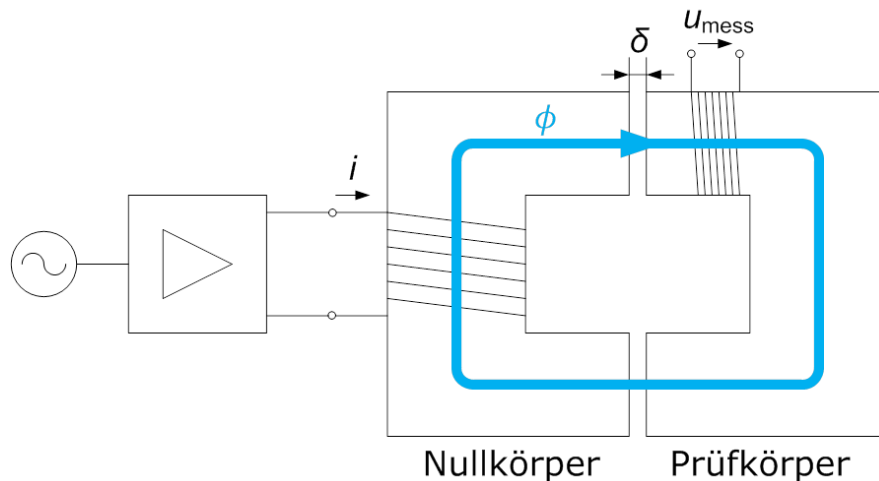


Abbildung 12: Prinzipschaltbild zur Messung des Bearbeitungseinflusses auf die magnetischen Eigenschaften von SMC-Segmenten

Die Anordnung besteht aus einer Speisequelle variabler Frequenz und Spannung, einem Leistungsverstärker, einem Referenz-/Nullkörper und dem Prüflingssegment, welches im Abstand δ , entspricht dem Luftspalt in der realen Maschine, dazu angeordnet wird, sowie einer Magnetisierungsspule und einer Messspule. Die Messungen erfolgten von 0 ... 5 kHz in einem Aussteuerbereich von 0 ... 2 T. Abbildung 13 zeigt ein Foto der Prüfeinrichtung.

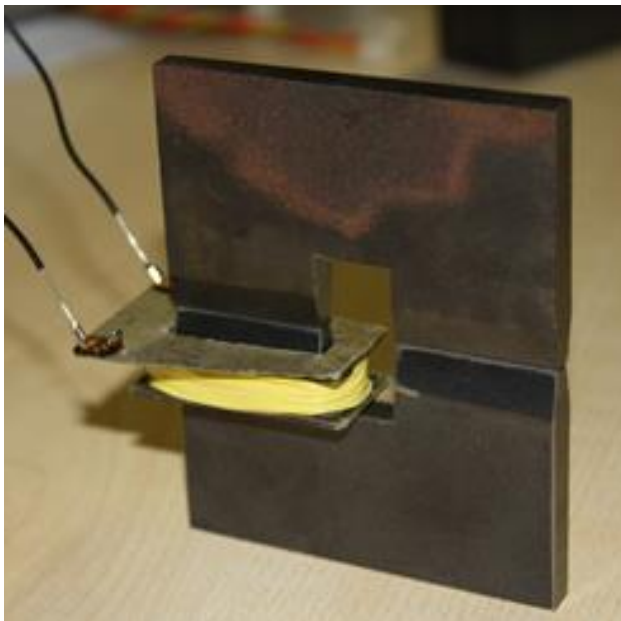


Abbildung 13: Prüfeinrichtung mit Magnetisierungsspule (ohne Spanneinrichtung)

Ein weiterer Schwerpunkt, waren die Konzeption und der Aufbau einer Prüfeinrichtung für die Durchführung von Hochspannungsprüfungen für die Isolierung der elektrischen Wicklungen. Dazu wurden als Unterauftrag verschiedene Proben von möglichen Isolierungsausführungen der Statorwicklung gefertigt und an der TU Dresden auf Durchschlagfestigkeit und Teilentladungseinsetzspannung geprüft. Abbildung 14 zeigt exemplarisch den Aufbau eines solchen Prüflings mit Windungs- und Nutisolierung sowie der Vergussmasse. Eingebettet ist die Wicklung in entsprechende SMC-Statorsegmenten.

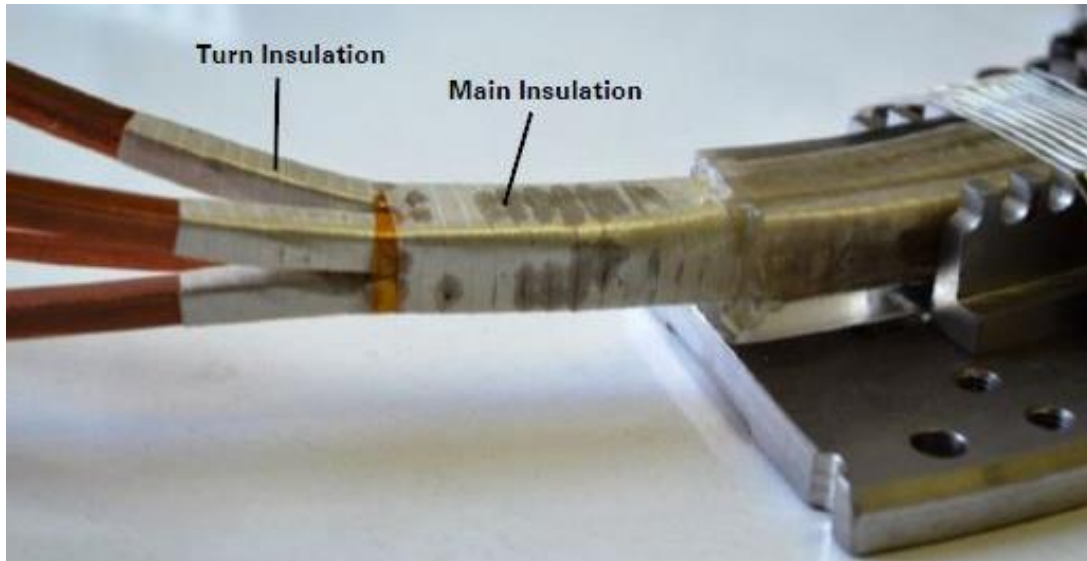


Abbildung 14: Isolierungsprüfling für Durchschlag- und Teilentladungsprüfung
(Quelle: Dr. Speck, TU Dresden, IEEH)

1.10 AP 1.14.5 Vorstandstätigkeit, Regionalmanagement

Der Projektleiter des TP 1.5 war gleichzeitig als Mitglied des Vorstands des Wachstumskerns LEANTEC deren Wissenschaftlicher Sprecher. Er organisierte und leitete regelmäßige Treffen der zu diesem Verbund- und Teilprojekt gehörenden Partner. Außerdem informierte er über die neuesten Erkenntnisse, benannte die ihm zugearbeiteten Probleme und wirkte fördernd für deren Lösung. Am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe wurden regelmäßig Forschungsvorträge zu aktuellen Teilprojektthemen des Wachstumskern innerhalb der Lehrstuhlkolloquien durchgeführt. Unter Leitung des Wissenschaftlichen Sprechers wurde innerhalb der ersten Förderperiode ein Wissenschaftliches Kolloquium am 16.02.2012 mit Gästen aus und über die Region hinaus sowie mehrere Strategieworkshops in Dresden, Zwickau und Saalfeld durchgeführt. Darüber hinaus fanden regelmäßig Arbeitstreffen der beteiligten Partner in Dresden, Zwickau, Meißen und Saalfeld statt.

2 Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Aufstockungsphase)

2.1 AP 1.5.15.1 Inbetriebnahme und Tests

Folgende Prüfstände wurden aufgebaut bzw. in Betrieb genommen:

- a) Linearprüfstand zur Messung von Ummagnetisierungsverlusten sowie statischen Kräften zwischen den Zahnpaarungen von Stator und Rotor bei unterschiedlichen Positionen und Bestromungen, Durch die Aufstockung war die Beschaffung eines unter Kapitel 1 erwähnten Verstärkers möglich, sodass mit dem Linearversuchsstand einerseits höhere Aussteuerung an den SMC-Bauteilen bezüglich Frequenz und Induktion als auch Untersuchungen zum Kraft-Bestromungsverhalten bei unterschiedlichen Zahnstellungen von Stator und Rotor vorgenommen werden konnten. Somit war auch eine erweiterte Bestimmung der Ummagnetisierungsverluste für SMC-Bauteile möglich.
- b) Statischer Prüfstand zur Bestimmung des Reduktionsgrades der Verluste in den Rotorscheiben bei Anwendung verschiedener Maßnahmen (z. B. Schlitzung der Trägerscheiben zwischen den Rotorzähnen zur Unterbrechung von Wirbelstrombahnen) zur Verlustsenkung (siehe Abbildung 15),

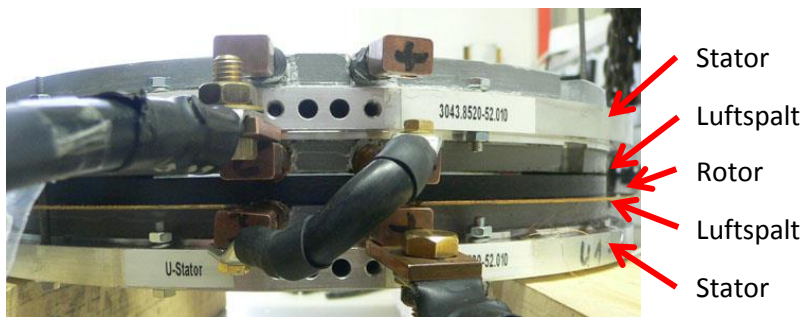


Abbildung 15: Statischer Prüfstand der Referenzmaschine

Die Untersuchungen bestätigten die theoretischen Überlegungen, dass eine Schlitzung der Rotorscheiben deren Wirbelstromverluste deutlich reduziert.

- c) Prüfaufbau zur Messung der axialen Verlagerung der Rotorscheiben im Betrieb des Motors mittels laseroptischer Positionserfassung – Erfassung der Veränderung der Luftspaltweite durch thermische und/oder mechanische Dehnung bzw. magnetisch oder mechanisch angeregte Axialkräfte. Dazu wurde im Prüffeld des ETI ein gemeinsamer Maschinenprüfstand auf Basis vorhandener Grundelemente (Belastungsmaschine, Maschinenbett, Rückspeiseeinheit, Steuerung) aufgebaut und vom Partner IVMA mit Sensoren zur Lagemessung der Rotorscheiben bei verschiedenen Betriebspunkten am Demonstrator „Fahrtrieb“ aufgebaut und kalibriert. Das Prinzip der Lagemessung besteht darin, dass auf die Rotorscheiben Referenzlinien am äußeren Umfang aufgebracht werden, deren Lageänderung mit einem Laserstrahl gemessen wird. Aufgrund von speziell angebrachten Öffnungen im Gehäuse war die Zugänglichkeit der Rotorscheibenaußenseiten möglich. Der vom Partner BITSz entwickelte Umrichter für die Speisung des Fahrtriebs erzeugte jedoch so viele elektromagnetische Störungen, dass keine aussagefähigen Messwerte gewonnen werden konnten.

- d) Messung der Schwingungen am Motorgehäuse mittels Dehnmessstreifen: Der auf dem unter c) erwähnten Versuchsstand fixierte Fahrtrieb wurde mit Dehnmessstreifen bestückt, um Schwingungen während des Betriebs aufnehmen und auswerten zu können. Auch diese Messungen wurden durch die hohen Störpegel des Umrichters unbrauchbar.
- e) Prüfaufbau zur Messung der Erwärmung der Rotorscheiben im Betrieb des Motors mit einer Wärmebildkamera: Der Versuchsstand aus c) wurde mit einer Thermografiekamera ausgerüstet, die auf den Außenrand einer Rotorscheibe fokussiert wurde. Die so zuverlässig auch bei anderen Messungen innerhalb des WK LEANTEC erhaltenen Messdaten, werden in den entsprechenden Abschnitten dieses Berichtes und in den anderen Abschlussberichten zu TP 2.3 und 3.5 entsprechend aus- bzw. bewertet. Abbildung 16 zeigt beispielhaft das Thermogramm einer Rotorscheibe. Der durch das Rechteck eingegrenzte Bereich liegt auf dem Außenrand einer Rotorscheibe.

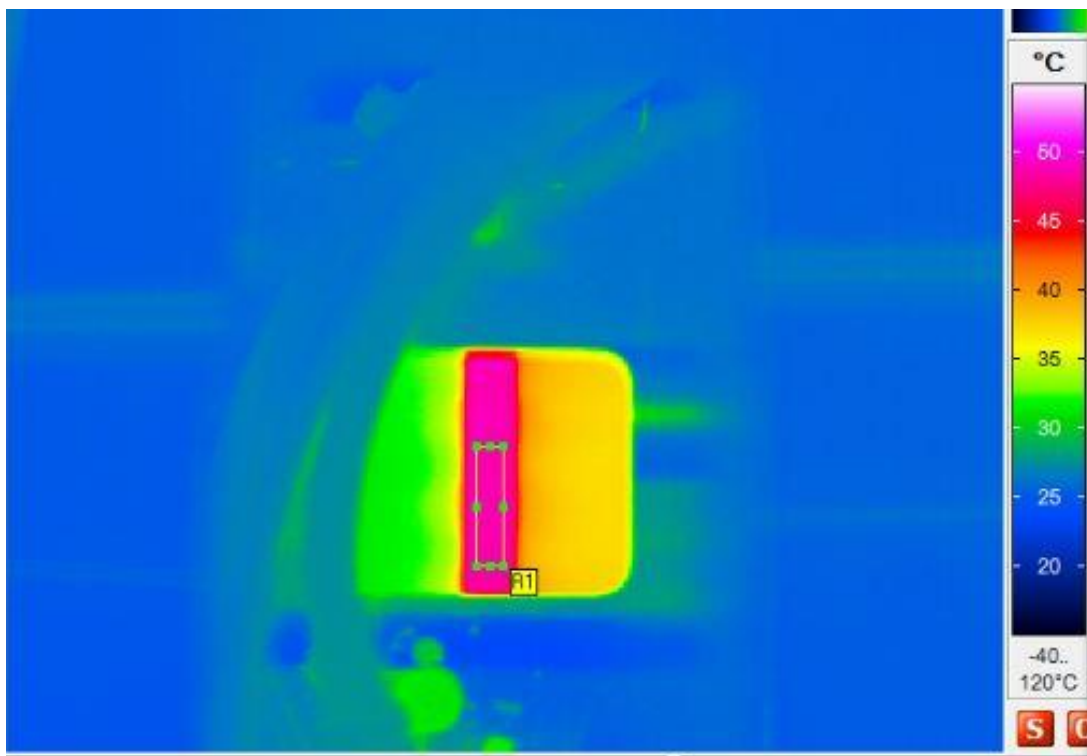


Abbildung 16: Thermogramm einer Rotorscheibe

- f) Aufbau eines Prüfstands zur Erwärmung der Statorn für die Referenzmaschine zur Überprüfung der Wicklungsbewegung in der Nut aufgrund von thermomechanischen und Eigenspannungen in der Anordnung: Eine komplette Statorhälfte mit eingegossener Wicklung wurde unter Beilage einer isolierenden Folie auf den originalen Luftspaltabstand über eine ferromagnetische Platte gelegt und fixiert. Im Weiteren erfolgte die Bestromung der Wicklung mit dem Originalumrichter und die Kontrolle der Wicklungstemperatur über den Widerstand der Wicklung bzw. ein Kontaktthermometer. Nach Erreichen des thermischen Beharrungszustands wurde die Bestromung abgebrochen und die Verlagerung der Wicklung in der Nut mit einem Haarlineal im warmen und im kalten Zustand gemessen.

2.2 AP 1.5.15.2 Erprobung

Für den unter 2.1 c) beschriebenen Versuchsstand wurde ein Messplan erstellt und abgearbeitet. Im Folgenden sollen kurz die durchgeführten Messungen erläutert werden.

Schleppmessungen

Der LEANTEC-Motor wird von der Lastmaschine angetrieben, ist selbst aber vom Netz getrennt. Über die zwischen den Motoren liegende Drehmomentmesswelle kann das Reibmoment aufgezeichnet und daraus die Reibverlustleistung des Prüflings bestimmt werden. Der Versuch wird für verschiedene Drehzahlen durchgeführt. Zusätzlich können so eventuell auftretende Anomalien im Drehzahlband detektiert werden.

Leerlaufmessungen

Der LEANTEC-Motor läuft selbst, wird aber nicht mechanisch durch die Lastmaschine belastet. Aufgezeichnet werden die elektrische Leistung aller Phasen sowie die zugehörigen Phasenströme jeweils für verschiedene Drehzahlen. Es können daraus die Leerlaufverluste bzw. die lastunabhängigen Verlustanteile bestimmt werden. Diese umfassen vor allem Kupferverluste sowie die Eisen- und Zusatzverluste. Parallel wird mögliches ungewöhnliches Motorverhalten über dem Drehzahlband beobachtet.

Belastungsmessungen

Der LEANTEC-Motor wird mechanisch durch die Lastmaschine belastet. Es können dabei, in den durch den Versuchsstand vorgegebenen Grenzen, Drehzahl und Belastungsdrehmoment variiert werden. Ziel ist wieder die Bestimmung der Verluste im Motor, aus denen ein Wirkungsgradkennfeld generiert werden kann. Zudem kann nur bei Belastung eine nennenswerte Erwärmung des Motors beobachtet werden, sodass hier zusätzlich auch die Einhaltung der Grenztemperaturen geprüft und die vorangegangenen thermischen Rechnungen validiert werden. Der Versuch mit konstanter Belastung bis zum Erreichen der thermischen Beharrung ermöglicht zudem das Bestimmen der thermischen Zeitkonstanten. Sollten bei Belastung zusätzliche Anomalien im Motorverhalten auftreten, können diese hier beobachtet werden.

Sondermessungen

Neben den oben genannten Messungen wurden noch weitere Versuche durchgeführt. Es wurde nur eine Phase des Motors bestromt um bei Stillstand die Auslenkung des Rotors dieser Phase aufgrund axialer magnetischer Kräfte bei verschiedenen Rotorpositionen zu beobachten. Dazu dient die unter c) beschriebene optische Messeinrichtung.

Da die Wasservorlaufemperatur deutlich geringer war als die Temperatur der Umgebungsluft, wurde ein Abkühlungsversuch durchgeführt, um ohne mechanische oder elektrische Beanspruchung die thermischen Zeitkonstanten zu bestimmen.

Teil der Sondermessungen waren Untersuchungen hinsichtlich des EMV-Verhaltens von Motor und Umrichter und die Einkopplung von Störungen in das Messsystem. Dazu wurden die Signale der Messgeräte aufgezeichnet, wenn nur der Umrichter in Betrieb war, der Motor selbst aber nicht lief. Zur Bestimmung der Effektivität der Kühlung wurden Versuche am drehenden Motor sowohl mit als auch ohne Leiterinnenkühlung durchgeführt.

2.3 AP 1.5.15.3

AP 1.5.15.3.1 Integration Aktivbauteile

Die letztlich gefertigten Aktivbauteile wurden gemäß Projektfestlegung durch die herstellenden Partner endgültig geometrisch vermessen und deren Ergebnisse als Eingabe für die Simulationsrechnungen des gesamten Antriebssystems verwendet. Die so entstandenen Ergebnisse zeigen im Vergleich mit den ursprünglich festgelegten und vorausgelegten Eigenschaften teilweise eine gute Übereinstimmung. Probleme traten insbesondere bei der Berechnung der Ummagnetisierungsverluste in den SMC-Statorsegmenten und dem Rotorträgermaterial auf. Eine Lösung dieser Probleme hing stark von der Möglichkeit und Genauigkeit der an dem Linearversuchstand ermittelten Ummagnetisierungsverluste bei den applikationsrelevanten Messpunkten ab. Diese sind wiederum mit dem, in der Aufstockungsphase erworbenen Leistungsverstärker aussteuerbar, so dass die somit erzielten Ergebnisse unmittelbar in die Simulation und Berechnung des der Aktivbauteile einfließen konnten.

AP 1.5.15.3.2 Abgleich Prüfergebnisse mit Modellierung

Am Prüfstand des ETI für die Demonstratoren und den Referenzmotor wurden verschiedene, zusätzlich zu den bestehenden Normen und Standards notwendige Testverfahren erprobt und miteinander verglichen sowie Kalibrierungsmessfahrten für die Bestimmung einzelner Verlustanteile innerhalb des Prüfaufbaus (Reibungsverluste von Lastmaschine und Prüfling) durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Partner BITSZ erfolgte ein umfangreicher Test des Umrichters insbesondere hinsichtlich der Kommunikation zwischen Steuerrechner und Umrichter über verschiedene Bussysteme.

Da auch nach intensiven Bemühungen seitens aller Partner der Referenzmotor nicht stabil lauffähig war, wurden die Untersuchungen am Demonstrator „Fahrantrieb“ durchgeführt. Diese erfolgten sowohl mit dem ursprünglich ungeschlitzten Rotor als auch mit dem wirbelstromoptimierten geschlitzten Rotor. Beispielhaft sind im Folgenden Messergebnisse für beide Varianten und zusätzliche Messungen aufgeführt:

Flussmessungen

Bei indirekten Messungen der magnetischen Flussverkettung mit Hilfe eines Spannungssprungs wurde festgestellt, dass die gemessenen Flüsse 10 % bis 30 % unterhalb der simulierten Flüsse lagen. Hierfür gibt es zwei mögliche Ursachen: Erstens könnte ein um wenige Mikrometer zu groß eingestellter Luftspalt verantwortlich sein und zweitens könnte die Pressdichte des verwendeten SMC-Materials geringer als angenommen gewesen sein. Bei der Auslegung weiterer Motoren wurde daher ein Sicherheitsfaktor von 1,3 berücksichtigt.

Schleppmessungen

Die Schleppmessungen dienen der Bestimmung der Reibungsverluste, die anschließend von den Gesamtverlusten abgezogen werden um die rein elektrischen Verluste zu erhalten. Zudem konnte bei der Motorvariante mit geschlitztem Rotor durch die erhöhte Reibleistung hier bereits eine mechanische Resonanz bei ca. 400 min⁻¹ festgestellt werden. Dieser Effekt äußerte sich als Schleifen des Rotors.

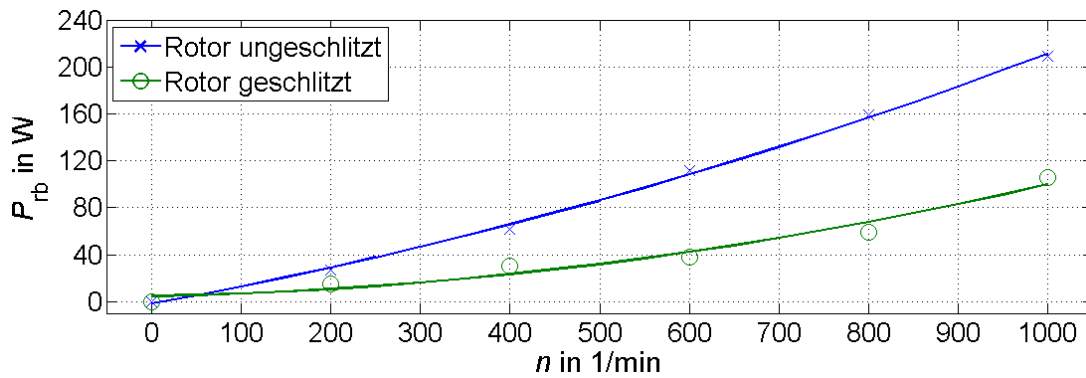


Abbildung 17: Gemessene Reibverluste des Demonstrators Radlader

Leerlaufmessungen

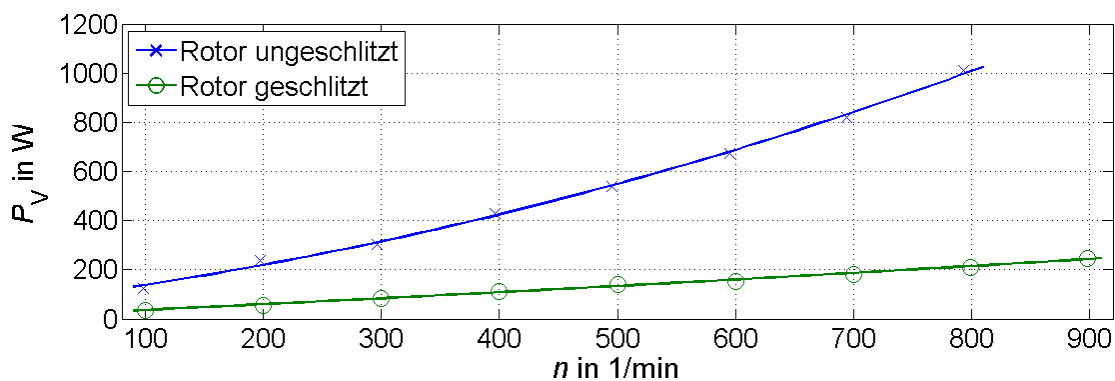


Abbildung 18: Gemessene Leerlaufverluste des Demonstrators Radlader

Bei den im Leerlauf ermittelten Gesamtverlusten (Abbildung 18) zeigt sich deutlich der positive Einfluss der Rotorschlitzung, da die Gesamtverluste auf ca. 20 % gesenkt werden können. Für alle zukünftigen Motoren ist deshalb eine geschlitzte Rotorscheibe vorgesehen.

Thermische Messungen

Der Motor wird mit einer konstanten Last betrieben, bis er eine konstante Endtemperatur erreicht hat. In diesem Fall dient der Test nicht nur dem Nachweis unkritischer Motortemperaturen, sondern vor allem auch der Überprüfung thermischer Einflüsse auf die Motormechnik. Insbesondere für die Maßhaltigkeit des Luftspaltes konnten bei höheren Temperaturen Probleme beobachtet werden, die bei zukünftigen Motorgenerationen beispielsweise durch eine zusätzliche Rotorkühlung behandelt werden. Die Temperaturverläufe sind in Abbildung 19 für ausgewählte Punkte dargestellt.

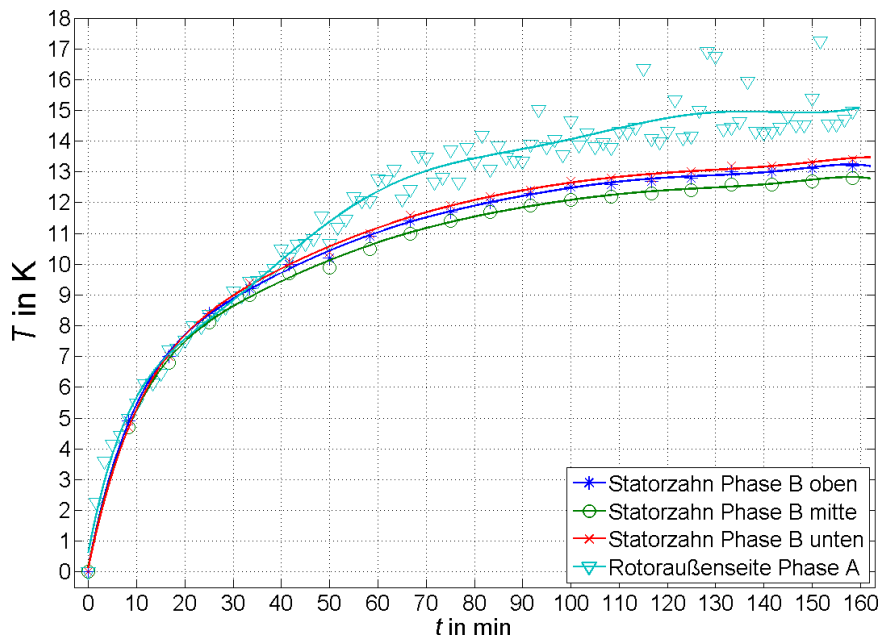


Abbildung 19: Übertemperaturverlauf an ausgewählten Punkten bei $M = 20 \text{ Nm}$ und $n = 700 \text{ min}^{-1}$; geschlitzter Rotor

Zur Überprüfung des thermischen Modelles ohne Belastung des Motors wurde eine Messung der Abkühlung durchgeführt. Das ist möglich, da die Wasservorlauftemperatur deutlich unter Raumtemperatur lag. Abbildung 20 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf und die Rechnung unter denselben Bedingungen. Die Übereinstimmung ist gut.

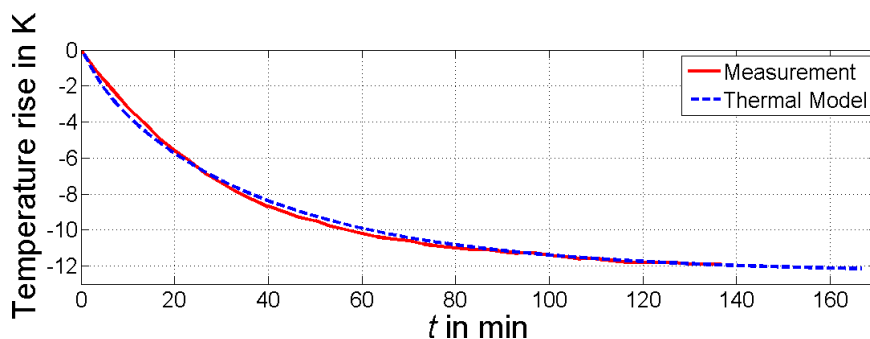


Abbildung 20: Abkühlungsverlauf und Vergleich mit thermischer Rechnung

Der Motor wurde zudem an einer konstanten Last sowohl mit als auch ohne die Leiterinnenkühlung betrieben. Es wurde dabei festgestellt, dass es ohne die Leiterinnenkühlung zu einer schnellen Erwärmung des Nutbereiches kommt und Schäden an der Isolierung nicht ausgeschlossen werden können. Ein Betrieb ohne Kühlung ist so nur als Notbetrieb für kurze Zeit möglich. Es konnte damit auch gezeigt werden, dass die Wasserkühlung eine effektive Variante der Motorkühlung darstellt.

Weitere Messungen

Durch den Einfluss des Umrichters konnten teils deutliche Störungen auf den Messsignalen festgestellt werden. Nachfolgende Abbildungen (Abbildung 21 und Abbildung 22) zeigen den Zeitverlauf des gemessenen Störsignals am Ausgang eines Stromwandlers sowie dessen aufgelöstes Frequenzspektrum.

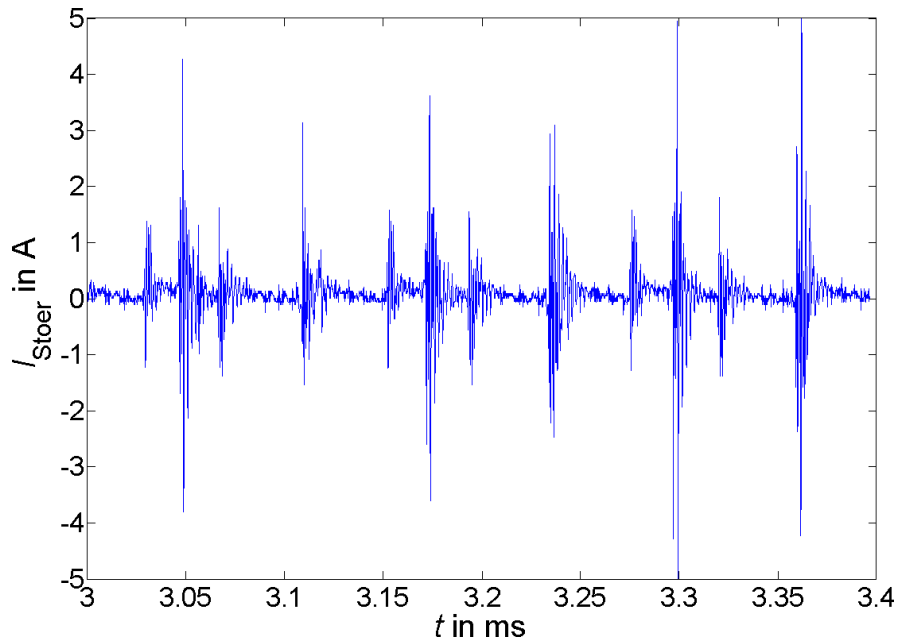


Abbildung 21: Zeitverlauf des Störsignals

Zu beobachten ist ein periodischer Verlauf des Störsignales, der vermutlich vom Zwischenkreis des Frequenzumrichters verursacht wird.

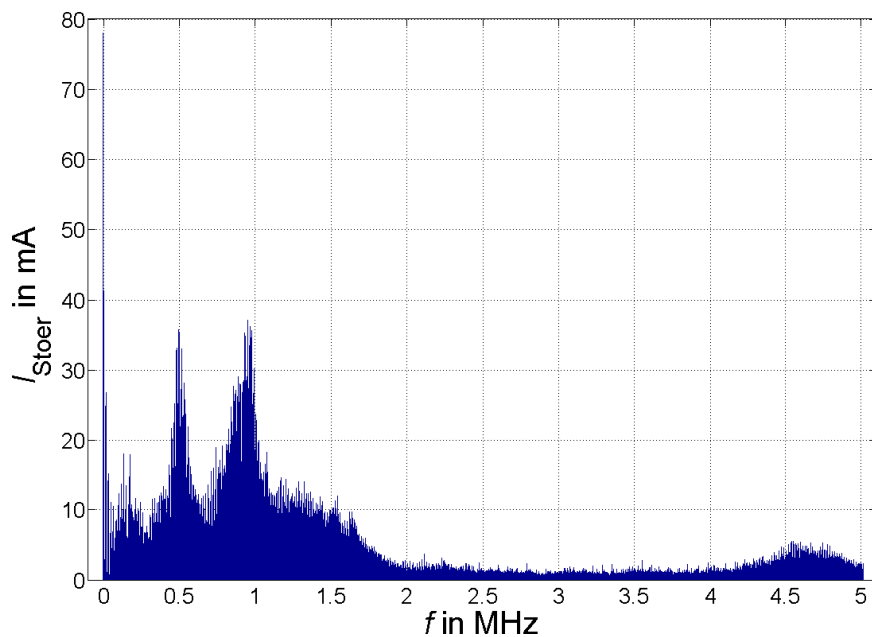


Abbildung 22: Frequenzspektrum des Störsignals

Insbesondere bei kleinen Signalamplituden oder empfindlichen Sensoren ist hier eine deutliche Beeinträchtigung der Messungen zu beobachten. Zukünftige Antriebsgenerationen werden deshalb mit einem besseren Schutz vor elektromagnetischen Störungen versehen. Um die Messungen selbst möglichst ungestört durchführen zu können, werden vor alle Messsignale Tiefpassfilter mit einer Eckfrequenz von 50 kHz vorgeschaltet.

AP 1.5.15.3.3 Vereinfachungen

Die Magnetkreisauslegung erfolgte in einem ersten Schritt durch analytische Zusammenhänge und bereits bekannte FEM-Ergebnisse. Dabei wurden Sättigung und Streuung vernachlässigt. In einem zweiten Schritt erfolgte eine 2D-FEM, welche eine radiale Mittelung der „Tortenstückform“ verwendete und damit den stark gesättigten inneren Zahn und den schwächer gesättigten äußeren Zahn nicht einzeln berücksichtigte. In einem letzten Schritt erfolgte eine zeitaufwendige statische 3D-FEM. Diese vernachlässigt die Feldrückwirkung durch Wirbelströme. Ein Vergleich mit einer transienten 3D-FEM bestätigte die Zulässigkeit dieser Vereinfachung. Lediglich zur Untersuchung der Wirbelstromverluste in den Trägermaterialien war eine vollständige transiente 3D-FEM notwendig. Parallel wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Lei13] und Beschäftigung einer WHK ein magnetisches Ersatznetzwerk aufgebaut, welches eine sehr schnelle Berechnung des Magnetkreises unter Berücksichtigung von Sättigung, Streuung und der „Tortenstückform“ ermöglichen sollte. Allerdings ist dieses nur für die ersten Motorentwürfe relativ genau, da es daran angepasst wurde. Für stark davon abweichende Entwürfe ist die auftretende Abweichung von der 3D-FEM nicht mehr tolerierbar [Doe15b].

Die Berechnung der Eisenverluste im SMC-Material basiert auf Messungen mit sinusförmiger Aussteuerung. Die dabei verwendeten Parameter führen bereits bei geringen Feldern zu relativ großen Fehlern der Eisenverluste [Doe15a]. Die relativ hohen Ungenauigkeiten der Eisenverlustberechnung in elektrischen Maschinen sind jedoch allgemein bekannt. So werden bei klassischen Maschinen Zuschlagfaktoren von 1,5 bis 2,5 verwendet.

Für die Berechnung der Wicklungsverluste unter Einfluss der Stromverdrängung wurde ein auf die Geometrie angepasstes, analytisches Modell entwickelt. Es basiert auf den klassischen Formeln für Stromverdrängung in unendlich langen Nuten, die im Elektromaschinenbau Standard sind. Um den Rechenaufwand zu beschränken, wurde auf die Entwicklung einer aufwändigen transienten FEM-Analyse verzichtet. Eine Bewertung der Genauigkeit des analytischen Modells kann nicht erfolgen, da die Kupferverluste in Messungen nicht eindeutig von den anderen Verlusten getrennt werden können. Dies ist gegenwärtig Gegenstand weiterer Untersuchungen am Lehrstuhl.

Im thermischen Modell wird nur die Hälfte eines Polpaares einer Phase mit einem Teil des Gehäuses und einer Stirnseite mit Lager simuliert. Die Temperaturen in den anderen Phasen ergeben sich über Symmetriebedingungen. Die Erwärmung der Wicklung entlang des Umfangs wird hier nur indirekt über die Kühlwasservorlauftemperatur berücksichtigt, indem bereits eine gewisse Erwärmung des Kühlwassers aus den Verlusten berechnet wird. Wärmeaustausch mit am Umfang benachbarten Polpaaren findet im Modell nicht statt, auch weil der Wärmewiderstand des Statorträgerfüllmaterials deutlich über dem der SMC-Elemente liegt. Unter diesen Randbedingungen kann ein verhältnismäßig kleiner Motorausschnitt im quasizweidimensionalen Modell untersucht werden.

3 Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten im Teilprojekt 1.5 waren die Personalkosten für den wissenschaftlichen Mitarbeiter nach der Gehaltsgruppe TV-L-Ost E13 und für die wissenschaftlichen/studentischen Hilfskräfte (Summe 399.502,00 €). Der Posten der Aufträge stellte den zweitgrößten Anteil an den Kosten (12.420,00€). Mit Hilfe der Aufträge wurden hauptsächlich Materialproben hergestellt und Messungen zur Materialkennwertermittlung der magnetischen Aktivteile durchgeführt. Für Messgeräte wurde eine Summe von 59.990,00 € ausgegeben. Schwerpunkt darin bildete der Leistungsverstärker zur Speisung des Linearversuchsstands zur Kennwertermittlung von SMC-Stator- und -rotorsegmenten.

Die sonstigen Aufwendungen fielen unter die Posten der Geräte unter 410 € und Dienstreisen (Summe 4.811,00€).

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im TP 1.5 geleistete Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag innerhalb des Wachstumskerns LEANTEC. Gemeinsam mit dem Verbundpartner IVMA/BFT der TU Dresden wurden Kernkompetenzen zur Entwicklung eines LEANTEC-Antriebs aufgebaut. Innerhalb des TP 1.5 stellen dabei die elektromagnetische und thermische Auslegung den Hauptteil dar, wobei kritische Einflussparameter identifiziert werden konnten. Eine Optimierung der Motorgeometrie und der Kühlung konnte direkt folgen.

Auf Basis der Berechnungsmodelle wurden Werkzeuge erschaffen, die eine elektromagnetische und thermische Auslegung unter Berücksichtigung der vorgegebenen Betriebsparameter ermöglichen.

5 Voraussichtlicher Nutzen

Der entscheidende Nutzen liegt in der Verwertung der Ergebnisse innerhalb des LEANTEC-Bündnisses. Weiterhin können die gewonnenen Erkenntnisse der weiteren Forschung zur Verfügung gestellt werden. Die Ergebnisse und Erfahrungen des Projektes fließen ein in:

- Erweiterung des Lehrangebots im Fach Direktantriebe und Magnetlagertechnik
- Erweiterung des Lehrangebots im Fach Elektrische Maschinen 2/Entwurf und Berechnung elektrischer Maschinen
- Publikation von wiss.-technischen Lösungen in Fachzeitschriften
- Ableitung weiterführender Forschungsarbeiten
- Neuartige Aufgabenstellungen für Diplomanden und Studienarbeiter zu simulationsgestützten Maschinenentwürfen unter konstruktions- und fertigungsnahen Bedingungen

Die GWT GmbH, Tochter der TU Dresden, bemüht sich fortlaufend um eine Vermarktung der eingereichten Patentidee [Pat13].

6 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Während des Forschungsvorhabens sind keine relevanten F&E-Ergebnisse bekannt geworden.

In der Forschungslandschaft Deutschland existieren seit Anfang 2013 das Projekt „PitchER“ Magnetloser Pitch-Antrieb in Windenergieanlagen durch Einsatz elektrischer Transversalfluss-Reluktanzmaschinen [033R106] vom BMBF und seit 1. Juli 2013 das Projekt „Fehlertolerante Antriebe mit Transversalflussmotoren“ vom BMWi (IGF-17648), die dem LEANTEC-Antrieb vom Aufbau und in

einigen Zielen sehr nahe kommen. Beide Projekte setzen ebenfalls auf eine Transversalfluss-Reluktanzmaschine (TFRM), versuchen den Kupferbedarf zu senken und auf seltene Erden zu verzichten. Als Unterschiede können der Fokus auf ein fehlertolerantes Antriebssystem und die Beschränkung auf ein konkretes Anwendungsgebiet genannt werden.

7 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit gab es drei Veröffentlichungen [Bar13], [Doe13], [Doe15a] sowie zwei weitere Veröffentlichungen, die sich zurzeit noch im Veröffentlichungsprozess befinden [Doe15b], [Doe15c] und eine Patentanmeldung, die sich zurzeit (Stand Juni 2015) noch in der Prüfungsphase befindet [Pat13]. Außerdem entstanden eine Diplomarbeit [Lei13] und zwei Studienarbeiten.

Literaturverzeichnis

- [Bar13] H. Barth, F. Bahr, N. Hildebrand, W. Hofmann: Einsatz weichmagnetischer Pulververbundwerkstoffe in energieeffizienten Transversalflussmaschinen. Int. ETG-Kongress 2013, ETG-Fachbericht 04-01-02, Berlin 2013, 9 Seiten
- [Car07] Carstensen, C.: Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines. Dissertation 2007, RWTH Aachen
- [Doe13] J. Doering, G. Steinborn, W. Hofmann: Torque, Power, Losses and Heat Calculation of a Transverse Flux Reluctance Machine with Soft Magnetic Composite Materials and Disc-shaped Rotor, IEEE ECCE 2013, pp. 4326-4333, 2013
- [Doe15a] J. Doering, G. Steinborn, W. Hofmann: Torque, power, losses and heat calculation of a transverse flux reluctance machine with soft magnetic composite materials and disc-shaped rotor, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 2, pp. 1494–1504, 2015.
- [Doe15b] J. Doering, W. Hofmann: Comparison of magnetic circuit design methods of transverse flux reluctance machines, IEMDC, Coeur d’Alène (Idaho,USA), Mai 2015.
- [Doe15c] J. Doering, W. Hofmann: Design of a Transverse Flux Reluctance Machine with Mutual Flux Paths and Disc Rotors, EPE, Genf, September 2015
- [Lei13] J. Leipold: Entwurf und Implementierung eines Werkzeuges zur Auslegung einer Transversalfluss-Reluktanzmaschine, Diplomarbeit, TU Dresden, 2013
- [Mül06] G. Müller, P. Ponick: Grundlagen Elektrischer Maschinen. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2006
- [Pat13] Patentanmeldung (in der Prüfphase); Anordnung zur Kühlung einer elektrischen Maschine. AT.: 24.04.13; Erfinder: Hofmann, W.; Hildebrand, N.; Steinborn, G.; Döring, J.; Jenßen, E.; Stentzel, Chr.; Eberhardt, H.-D.; Anmelder: TU Dresden
- [Rei65] K. Reichert: Über einseitige Stromverdrängung in rechteckförmigen Hohlleitern. Archiv für Elektrotechnik, 1965.

III Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage

IV Kurzfassung - Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Nicht geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Abschlussbericht VP1 „Rotor und Stator“ Teilprojekt 1.5 – Grundlagenuntersuchungen zu Stator und Rotor		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Steinborn, Gunar	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2014	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation -	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dresden Fakultät Elektrotechnik Elektrotechnisches Institut Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe Görges-Bau, Helmholtzstr. 9, 01069 Dresden	
9. Ber. Nr. Durchführende Institution TB 03/2015		10. Förderkennzeichen 03WKBY01E
11. Seitenzahl 46		12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn
13. Literaturangaben 57		14. Tabellen 4
15. Abbildungen 22		16. Zusätzliche Angaben -
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		

18. Kurzfassung

Als Ausgangsbasis dienten Labormuster, an denen erste Untersuchungen an Transversalfluss-Reluktanzmaschinen durchgeführt wurden.

Wesentliches Ziel des Teilprojekts 1.5 ist die elektromagnetische und thermische Auslegung einer Transversalfluss-Reluktanzmaschine. Das umfasst die Entwicklung einer konkreten Ausführung des magnetischen Kreises, die Optimierung der Hohlleiterwicklung nach elektrischen, magnetischen und thermischen Gesichtspunkten, die Maximierung des Motordrehmoments und das Finden einer optimalen Zahn-Nut-Struktur von Stator und Rotor, die einfach auf verschiedene Leistungen, Drehmomente, Drehzahlen und Anwendungen angepasst werden kann.

Innerhalb der interdisziplinären Teamarbeit des Wachstumskerns LEANTEC wurden Berechnungsmodelle entwickelt, die das elektromagnetische, elektrische, thermische und mechanische Systemverhalten eines LEANTEC-Antriebs methodisch analysieren sollten. Im Ergebnis bestehen Berechnungsmodelle zu den genannten Disziplinen, die die speziellen Randbedingungen eines LEANTEC-Antriebs abbilden. Innerhalb des TP 1.5 wurden numerische und analytische Berechnungsmethoden entwickelt, die das elektromagnetische sowie das thermische Verhalten eines Motors abbilden. Schwerpunkt war dabei die Berechnung der Motorverluste und des Drehmoments. Auf dieser Basis ist die Möglichkeit geschaffen worden, neue LEANTEC-Antriebe zu entwickeln und deren Leistungsfähigkeit nach den genannten Zielen bereits im Vorfeld zu beurteilen.

Zusammenfassend steht der deutschen Wirtschaft ein Elektromotor mit spezifischen Vorteilen zur Verfügung und die Wirtschaft der neuen Länder wurde gestärkt. Der LEANTEC-Antrieb verzichtet auf seltene Erden, weist einen geringen Kupferbedarf auf und besitzt einen kurzen axialen Aufbau sowie eine geringere Masse im Vergleich zu Konkurrenzprodukten. Als Anwendungsmöglichkeiten sind sowohl stationäre und als auch mobile Antriebslösungen denkbar. Der LEANTEC-Antrieb ist zudem als Direktantrieb einsetzbar und erhöht die geopolitische Unabhängigkeit von Ressourcen.

19. Schlagwörter

LEANTEC, Antrieb, Elektromotor, Elektrische Maschine, geringer Kupferbedarf, keine seltenen Erden, Transversalfluss, Reluktanz, Reluktanzkraft, Transversalfluss-Reluktanzmaschine, TFRM, Soft Magnetic Composite, SMC, Wachstumskern, Unternehmen Region, Direktantrieb, Stromverdrängung, Kühlung, Eisenverluste, Ummagnetisierungsverluste

20. Verlag

-

21. Preis

-

V Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Not planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Final report joint project 1 – “Rotor and stator” Sub-project 1.5 – Baseline investigations stator and rotor		
4. author(s) (family name, first name(s)) Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Steinborn, Gunar	5. end of project 31.12.2014	
	6. publication date -	
	7. form of publication -	
8. performing organization(s) (name, address) Dresden University of Technology Faculty of Electrical and Computer Engineering Department of Electrical Machines and Drives Helmholtzstr. 9, 01069 Dresden	9. originator's report no. TB 03/2015	
	10. reference no. 03WBKY01E	
	11. no. of pages 46	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 57	
	14. no. of tables 4	
	15. no. of figures 22	
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date) -		

18. abstract

Basis was a laboratory sample on which preliminary examinations on transverse flux reluctance machines could be conducted.

Major goal of sub-project 1.5 was the electromagnetic and thermal design of a transverse flux reluctance machine. That includes the development of a specific implementation of the magnetic circuit, optimization of the copper pipe winding towards electric, magnetic and thermal aspects, maximization of motor torque and last but not least the finding of an optimal tooth-slot-structure of stator and rotor, which is easily adaptable towards a different power, torque, rotational speeds and applications.

Within the interdisciplinary teamwork of the LEANTEC-project, computational models were developed which analyze the electromagnetic, electric, thermal and mechanic behavior of a LEANTEC-drive methodically. Within sub-project 1.5 numerical and analytical calculation methods were developed, which depict the electromagnetic and thermal behavior of a motor. In focus were the calculation of motor losses and motor torque. On this basis a way for the development of new LEANTEC drives and preliminary evaluation of their capability was created.

In conclusion an electric motor with specific advantages is available for the German economy and the economy of the New Laender has been strengthened. The LEANTEC-drive does not need rare earths, has low copper requirements and has a short axial length as well as a low mass compared to competing products. Possible applications include stationary and mobile drive solutions. The LEANTEC-drive can be used as a direct drive and strengthens the geopolitical independence of foreign resources.

19. keywords

LEANTEC, drive, electric motor, electric machine, low copper requirement, no rare-earths, transverse flux, reluctance, reluctance force, transverse flux reluctance machine, TFRM, Soft Magnetic Composite, SMC, direct drive, current displacement, cooling, iron losses, hysteresis losses

20. publisher

-

21. price

-