

Abschlussbericht VP2 – Teilprojekt 2.3
Technische Universität Dresden
Elektrotechnisches Institut
Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Förderkennzeichen: 03WKBY02C
Förderzeitraum: 01.03.2011 bis 31.12.2014

Inhalt

I	Allgemeine Angaben.....	2
1	Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens.....	2
2	Voraussetzungen	3
3	Planung und Ablauf	4
4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	5
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II	Eingehende Darstellung	8
1	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)	8
1.1	AP 2.1 Antriebssystem.....	8
1.2	AP 2.3 Technologieprüfungen	14
1.3	AP 2.4 Fertigungs- und Prüftechnologie.....	15
1.4	AP 2.5 Auslegungstools für LEANTEC-Antriebe	18
1.5	AP 2.6 Vorstandstätigkeit und Regionalmanagement	22
2	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Aufstockungsphase).....	23
2.1	AP 2.5.3 Demonstrator Extruder Version 2	23
3	Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises.....	39
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	39
5	Voraussichtlicher Nutzen	39
6	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	39
7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	40
	Literaturverzeichnis	41
III	Erfolgskontrollbericht.....	42
IV	Kurzfassung – Berichtsblatt	43
V	Document Control Sheet	45

I Allgemeine Angaben

1 Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens

Die Ausführung einer Transversalflussmaschine nach dem Reluktanzprinzip macht eine enge Abstimmung der Dimensionierungsgrößen von Motor, Stromrichter und Steuerung erforderlich, um die postulierten Vorzüge des Antriebssystems gegenüber bisher in der Praxis eingeführten Antriebsvarianten zur Wirkung zu bringen. So erfordert einerseits die hochpolige Motorauslegung bzw. die relativ niedrige Motorinduktivität eine hohe Grundfrequenz bzw. Schaltfrequenz vom Stellglied. Andererseits steigen mit der Grundfrequenz bzw. der Schaltfrequenz die Verluste im Motor bzw. im Stellglied signifikant an. D.h., die Optimierung der Aktivteile Stator und Rotor allein führt noch zu keinem optimalen Gesamtantrieb. Der Strombedarf hängt wiederum von der Polgeometrie und Polpaarzahl ab. Aufgrund dieser und weiterer komplexer Abhängigkeiten ist die Entwicklung einer vernetzten Modellierung und Simulation von LEANTEC-Antriebssystemen notwendig, die es gestatten sollen Optimierungslinien aufzudecken und pareto-optimale Varianten zur Auswahl zu stellen und damit die Übertragung der Ergebnisse in die Entwicklungsprozesse des Referenzantriebssystems zu erleichtern. Daraus lassen sich folgende Ziele ableiten:

- Bestätigung der Entwurfsparameter des vorhandenen Labormusters durch die Basisfassung eines Entwurfsprogrammes,
- Erkennung von Differenzen bzgl. der Entwurfsparameter zwischen Entwurfsprogramm und vorhandenem Labormuster zur Qualifizierung des Entwurfsprozesses,
- Vorlage theoretisch wie durch Simulation untermauerter Entwürfe für den LEANTEC- Antrieb,
- Vorlage geprüfter und erprobter entwurfsbegleitender Optimierungstools,
- Absicherung der Transparenz zwischen parallelen numerischen und analytischen Programmteilen,
- Absicherung der Schnittstellen und Parameterkonsistenz zwischen seriellen numerischen und analytischen Programmteilen,
- Nachweis der Entwicklungsparameter am Gesamtantrieb,
- Theoretischer und praktischer Nachweis der Eignung der LEANTEC-Technologie für die Anwendungen in den Zielmärkten am Beispiel eines Demonstrators,
- Nachweis der Zertifizierbarkeit der LEANTEC-Technologie nach den Standards in den Zielmärkten,
- Maßnahmenkataloge für die Entwicklung von Fertigungstechnologien und für die Produktüberleitungsphase,
- bedarfsabhängige Vorlage von evaluierten Mess- und Prüfverfahren durch fertigungsschrittbegleitende Simulation und labortechnische Überprüfung,
- Aufsetzen eines Entwurfsprogramms für eine Motorenreihe und
- anwendernahe Verallgemeinerung und Vereinfachung der Programmtools zur Erhöhung der Handhabbarkeit des Entwurfsprozesses.

In der sich an die reguläre Projektlaufzeit anschließenden Aufstockungsphase wurde vom LEANTEC-Bündnis beschlossen, den Referenzantrieb durch eine neue Version des Demonstrators Extruder zu ersetzen. Ziel ist dabei eine Anpassung der Anforderungen an das Lastprofil und eine vollständige Motorauslegung.

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 stehen dabei im Mittelpunkt.

Arbeiten auf dem Gebiet geschalteter Reluktanzmaschinen

Die Arbeiten konzentrierten sich in einem DFG-Projekt auf lagerlose geschaltete Reluktanzmaschinen (Laufzeit: 2001-2005) mit neuartiger Einschichtwicklung zur gleichzeitigen Trag- und Drehkrafterzeugung [Gap03]. Die Arbeiten befassten sich mit der Berechnung wesentlicher Betriebsparameter [Che06] und Betriebseigenschaften [Che07] und dem Einfluss von Exzentrizitäten auf die Kraftbildung [Che10a] und den Entwurfsprozess [Che10b].

Entwicklung eines hochkompakten luftgekühlten Fahrmotors eines Serienhybrid-Busses

Der Komplex Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen stellt einen Schwerpunkt der Forschungsarbeit am **Lehrstuhl 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 wurden von 2009-2012 PM-Synchronfahrmotoren entwickelt, untersucht und optimiert. Erste Ergebnisse sind publiziert in [Fes09], [Fes10], die motorseitigen Arbeiten werden ergänzt durch Untersuchungen zu einer energieoptimalen Steuerung, die die Besonderheiten der Feldschwächung bei Synchronmaschinen unter Beteiligung eines reluktanten Drehmoments [Win10] beinhaltet.

Literatur

- [Che06] Chen, L.; Hofmann, W.: „Analytically Computing Winding Currents to Generate Torque and Levitation Force of a New Bearingless Switched Reluctance Motor.“ European Power Electronics and Drives Conference EPE-PEMC 2006, Portorocz, Proceedings pp.1058-1063
- [Che07] Chen, L.; Hofmann, W.: „Performance Characteristics of One Novel Switched Reluctance Bearingless Motor Drive“. Power Conversion Conferences PCC2007, Nagoya Proceedings pp. 608-613
- [Che10a] Chen, L.; Hofmann, W.: „Analysis of radial forces based on rotor eccentricity of bearingless switched reluctance motors“. Int. Conf. on Electrical Machines ICEM2010
- [Che10b] Chen, L.; Hofmann, W.: „Design Procedure of Bearingless High-speed Switched Reluctance Motors“. SPEEDAM 2010
- [Fes09] Festa, M.; Eberhardt, H.-D.; Hofmann, W.: „Design Aspects of Circumferentially Cooled Frameless Machines“, ICEMS 2009, Proceedings, Tokyo 2009
- [Fes10] Festa, M.; Eberhardt, H.-D.; Hofmann, W.: Advances in Power Density and Efficiency — Circumferentially vs. Conventionally Cooled Electric Motors, Int. Conf. on Electrical Machines and Systems ICEMS 2010

[Gap03] Gaptschenko, A.; Hofmann, W.: „Untersuchungen zur Auslegung eines lagerlosen geschalteten Reluktanzmotors“. 6. Workshop Magnetlagertechnik / Mechatronik, Kassel 2003

[Win10] Windisch, T.; Hofmann, W.: Verlustminimierung einer geregelten PMSM mit Reluktanzeffekt als Fahrmotor für einen Serienhybrid. ETG-Fachtagung und Elektromobilausstellung EMA 2010

3 Planung und Ablauf

Die Planung des TP 2.3 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 27 Personenmonate WM und 6 Personenmonate für WHK bewilligt. Das Teilprojekt gliederte sich in fünf Arbeitspakete aus dem ursprünglichen Antrag und einem Arbeitspaket 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 511.567,00 € inklusive Projektpauschale. In den Tabellen 1 und 2 sind die Arbeitspakete des TP 2.3 und deren Aufwand (PM) innerhalb des Verbundprojektes 2 aufgelistet.

Tabelle 1: Arbeitspaketeplan des TP 2.5 aus dem Erstantrag

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
2.1	Antriebssystem	WM WHK SHK	22 13 10
2.3	Technologieprüfungen	WM WHK SHK	8 6 7
2.4	Fertigungs- und Prüftechnologie	WM WHK SHK	6 2 2
2.5	Auslegungstool für Antriebe	WM WHK SHK	36 15 17
2.6	Vorstandstätigkeit, Regionalmanagement	WM	3
Summe		WM WHK SHK	75 36 36

Tabelle 2: Arbeitspaketeplan des TP 2.3 aus der Aufstockungsphase

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
2.5.3	Demonstrator Extruder Version 2	WM WHK	27 6
Summe		WM WHK	27 6

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Seit etwa einem Jahrzehnt wird die Entwicklung von Torquemotoren als langsamlaufende Direktantriebe in der Antriebstechnik forciert. Sie finden zunehmend Einsatz in Produktionsmaschinen und sonstigen Industrieanwendungen [Geo04], [Fra03].

Direktantriebe haben Vorteile gegenüber Getriebemotoren durch den Wegfall mechanischer Komponenten wie Kupplungen, Wellen und Getriebe und die damit verbundene Verringerung von Reibung und Verschleiß sowie Spiel. Zudem versteift sich der mechanische Antriebsstrang, es reduzieren sich die Trägheitsmomente und mechanische Schwingungen werden gedämpft. Ein verbessertes Beschleunigungsvermögen ist die Folge. Zu Baugröße, Masse und Wirkungsgrad gibt es unterschiedliche Bewertungen. Während in [Gre07] der Torquemotor sehr positiv bewertet wird, gibt [Dop08] eine differenziertere Einschätzung. Mittlerweile befinden sich Torquemotoren asynchroner und synchroner Bauart im Angebot vieler Motorenhersteller.

Mit den Zielkenngrößen für ein Drehmomentgewicht von 10 Nm/kg und ein Leistungsgewicht von 1kW/kg liegt der LEANTEC-Motor über den Vergleichswerten des Stands der Technik.

In [Can95] wird eine vergleichende Studie über unterschiedliche Ausführungen sogenannter 'High Torque' Antriebe durchgeführt. Hierunter werden umrichter gespeiste, hoch überlastbare Direktantriebe mit typischen Drehzahlen von wenigen hundert bis einige tausend Umdrehungen pro Minute verstanden. Es wurden für die Untersuchungen als typische Daten solch eines Antriebes eine Leistung von 50 kW, eine Bemessungsdrehzahl von 300 min^{-1} und eine Überlastbarkeit von 3 vereinbart. Unter der Vielzahl möglicher elektrischer Maschinen wurde eine Vorauswahl von 10 aussichtsreichen Antriebskonzepten getroffen, die im Laufe der Studie in Form von Grobentwürfen ausgelegt und hinsichtlich ihrer wesentlichen Eigenschaften, wie Ausnutzungsziffern, Umrichteraufwand, Drehzahleinbruch unter Überlast, Bauvolumen und Gewicht charakterisiert wurden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse konnte eine Zuordnung der verschiedenen Antriebe zu den drei wesentlichen Anwendungsfeldern 'Stellantriebe', 'Beschleunigungsantriebe' und 'dynamisch steife Antriebe' erfolgen. Darüber hinaus wurde ein Vorschlag für einen kompakten, flexibel anwendbaren 'High Torque' Antrieb erarbeitet, der in einem weiteren Vorhaben genauer untersucht werden soll.

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.

Weitere Arbeiten konzentrieren sich auf die Regelung zur Verbesserung der Betriebseigenschaften. Z.B. wird in [Rei98] ein Simulationsprogramm entwickelt, welches die Berechnung der Regelungsparameter vornimmt. Eine genaue Ermittlung der in der Maschine und dem Stromrichter anfallenden Verluste bildet die Basis des Programms. Als Anwendungsbeispiel der hier vorgeschlagenen Optimierungsstrategie ist ein Antrieb für ein Elektrofahrzeug entwickelt worden. Das Prinzip der Direkten Drehmomentregelung wird in [Ind02] auf die geschaltete Reluktanzmaschinen angewandt und erweitert. Es wird in eine Mittelwert- und Momentanwertregelung unterschieden, wobei durch letztere eine weitgehende Elimination der Pendelmomente erreicht wird. Weitere Schwerpunkte der Forschungsarbeiten lagen auf dem Gebiet der Steuerung und Regelung, der Lärmreduzierung (4-Jahresförderung über DFG) sowie der Umrichtertechnologie [Ris02], [Ind02].

In [Ori05] werden Untersuchungen zum Einsatz von Transversalflussmaschinen in der Servo-Direktantriebstechnik vorgestellt. Dem Vorteil des geringeren Gewichtes im Verhältnis zum erzeugtem Moment bzw. zur erzeugten Leistung steht die Schwierigkeit gegenüber, die bei Transversalflussmaschinen normalerweise auftretenden großen Drehmoment- und

Normalkraftschwankungen hinreichend zu begrenzen und eine hohe Gleichlaufgüte sowie eine hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen. Auf der Basis analytischer und FEM-Modelle entstand ein globales Regelungskonzept für Transversalflussmaschinen. Bei der systematischen Untersuchung der beiden Versuchsmaschinen, permanentmagneterregte und geschaltete reluktante TFM, wurden alle signifikanten Maschinengrößen und Maschinenparameter ermittelt und es wurden Parameteridentifikationen auf Basis von selbstlernenden Störgrößenaufschaltungen entwickelt und in die Regelung implementiert. Bei der zweisträngigen permanentenerregten Transversalflussmaschine bzw. bei der viersträngigen Reluktanzmaschine kleinerer Leistung lassen sich die Schwankungsanteile des Drehmoments und diejenigen der Normalkräfte bis auf kleine Restwerte unterdrücken und bezüglich der Schallabstrahlung konditionieren, womit sich die Transversalflusstechnologie industriell nutzen lässt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass sich Servo-Direktantriebe auf Basis der Transversalflusstechnologie in einem weiten Bereich der Direktantriebstechnik im Maschinen- und Anlagenbau als Alternative zu herkömmlichen Lösungen einsetzen lassen.

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. Vorrangig untersucht werden Methoden zur genauen Rotorpositionserfassung bei hochpoligen Maschinen. Am Lehrstuhl für Antriebstechnik (Prof. Gerling) werden neben Arbeiten zu elektromaschinenbaulichen Aspekten in [Hil08] neue Methoden zur direkten Drehmomentsteuerung auf der Basis eines energetischen Modells der geschalteten Reluktanzmaschine vorgestellt.

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

Literatur

- [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, Vol. 3, p. 1457-1460.
- [Can99] Canders, W.R.; Laube, F.; Mosebach, H.: Technologien und Grenzen von "High Torque" Antrieben. Forschungsheft. Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) * Band 586 (1999) S. 1-86.
- [Dop08] Doppelbauer, M.: Direktantrieb oder doch besser Getriebemotor? – Systematische Analyse der Vor- und Nachteile beider Konzepte. Antriebstechnik 4/2008, S. 66-73.
- [Fie07] Fiedler, J.: Entwurf von geräuscharmen geschalteten Reluktanzmaschinen. Dissertation 2007, RWTH Aachen.
- [Fra03] Fraj, A. H.; Storath, A.: Torquemotoren. Aufbau und Wirkungsweise. SPS/IPC Drives Kongress 2003, S. 833-840.
- [Geo04] Georg, K.: Torquemotoren erobern Produktionsmaschinen. Etz. Elektrotechnische Zeitschrift (2004), H. 2, S.18-21.

- [Gre07] Greubel, K.; Storath, A.: Torquemotoren versus Getriebmotoren – ein technischer Vergleich hinsichtlich Beschleunigung und Effizienz. Internationaler ETG-Kongress - Fachtagung Hybridantriebstechnik und Energieeffiziente elektrische Antriebe, ETG-Fachbericht 107, 11 Seiten, Karlsruhe, 2007.
- [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.
- [Ind02] Inderka, R.: Direkte Drehmomentregelung geschalteter Reluktanzantriebe. Dissertation 2002, RWTH Aachen.
- [Orl05] Orlik, B.; Weh, H.; Werner, U.; Niemann, W.; Vikogradski, M. : Transversalfluss-Direktantriebe für Servo-Applikationen. AiF Forschungsvorhaben (2005) S. 1-126, Förderkennzeichen: AIF 87-ZN.
- [Rei98] Reinert, J.: Optimierung der Betriebseigenschaften von Antrieben mit geschalteter Reluktanzmaschine. Dissertation 1998, RWTH AachenVP2 – Teilprojekt TP2.3 – TUD-ET 10.
- [Ris02] Risse, St.: Entwicklung einer geschalteten Reluktanzmaschine als Elektrofahrzeugantrieb, Dissertation 2002, RWTH Aachen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Forschungsvorhaben erfolgte eine konsequente Zusammenarbeit mit allen Verbundpartnern innerhalb des Wachstumskerns LEANTEC. Intensivere Zusammenarbeiten erfolgten mit folgenden Partnern, die inhaltlich im Verbundprojekt 2 zu finden sind:

- SAMAG Saalfelder Werkzeugmaschinen GmbH,
- BITSz engineering GmbH,
- Schmuhl FVT GmbH & Co. KG,
- TU Dresden, Lehrstuhl für Baumaschinen und Fördertechnik (BFT) und
- TU Ilmenau, Fachgebiet Kunststofftechnik (KTI).

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

- die MIMNET GmbH ,
- Magnettechnik Kleine,
- RITZ Instrument Transformers GmbH und
- die EPSa GmbH.

II Eingehende Darstellung

1 Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)

1.1 AP 2.1 Antriebssystem

AP 2.1.1.4 Erstellung von Konzept und Systemarchitektur für die Modellierung von LEANTEC-Antriebssystemen

Eine fundamentale Grundlage für Untersuchungen aller LEANTEC-Antriebe (Testmotor, Labormuster, Referenzmotor, Demonstratoren) war die Erstellung eines Motormodells zur Abbildung der statischen und dynamischen Betriebseigenschaften. Die zur Verfügung stehende Datenbasis basierte auf den Phasenflussverkettungen in Abhängigkeit von a) der Winkelposition zwischen Rotorzahn und Statorzahn und b) des elektrischen Stroms der Motorphase (Ψ - i -Kennlinien). Diese Beziehung wurde einerseits aus FEM-Simulationen gewonnen und andererseits aus Messungen der Phasenströme und Klemmenspannungen jeweils einer Phase bei deren Aufmagnetisierung und bei einer definierten und festgebremsten Lage (Winkel) der Rotoren der realen Maschine. Die Beziehung zur Berechnung der Phasenflussverkettung Ψ aus den Messgrößen Strom i und Spannung u unter Kenntnis des Ohmschen Widerstands R der Motorphase ist:

$$\Psi = \int_0^{i_{max}} (u - Ri) dt$$

Eine beispielhafte Messung von Strom und Spannung für eine Winkelposition zeigt Abbildung 1:

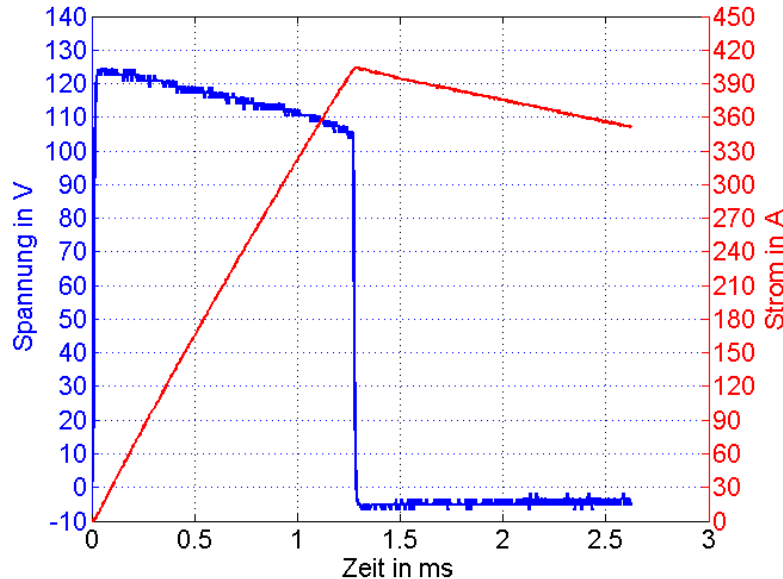
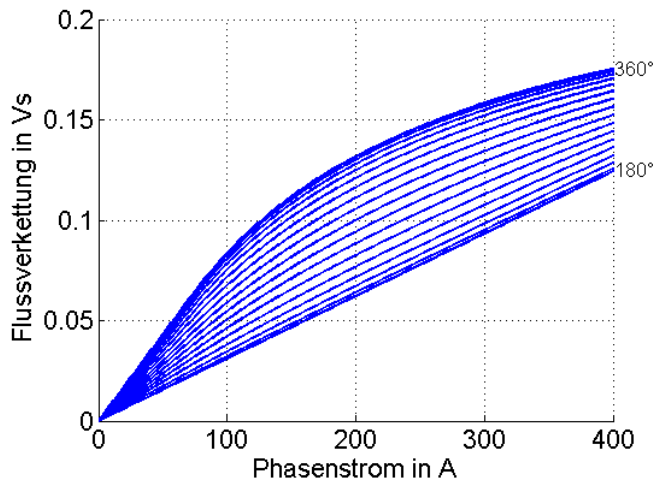


Abbildung 1: Messung von Strom und Spannung zur Bestimmung der Ψ - i -Kennlinie

Ein Matlab-Skript zur Auswertung dieser Messungen und Erstellung der Ψ - i -Kennlinien ist erstellt worden. In Abbildung 2 ist wiederum ein Beispiel eines Ψ - i -Kennlinienfeldes dargestellt:

Abbildung 2: Ψ - i -Kennlinienfeld des Referenzmotors

Ausgehend von den Ψ - i -Kennlinien erfolgte eine Berechnung der statischen Motorkenngrößen und -felder. Im Einzelnen sind dies die Beziehungen zwischen Flussverkeftung, Strom, Winkelposition und Drehmoment, so dass eine dieser vier Größen aus jeweils zwei der anderen drei Größen bestimmt werden kann. Daraus abgeleitet, ergeben sich weiterhin die Verläufe der statischen und differentiellen Induktivitäten in Abhängigkeit von Winkelposition und Phasenstrom. Von besonderem Interesse ist dabei das Drehmoment als Funktion von Winkel und Strom, da hierüber Aussagen gewonnen werden, ob mit dem vom Umrichter begrenzten Strom das geforderte Drehmoment erzeugt werden kann, und ob das über die gesamte elektrische Periode erfolgen kann. Abbildung 3 zeigt solche Drehmomentverläufe. Die Theorie der mathematischen Modellbildung kann in [Hil08] nachgelesen werden.

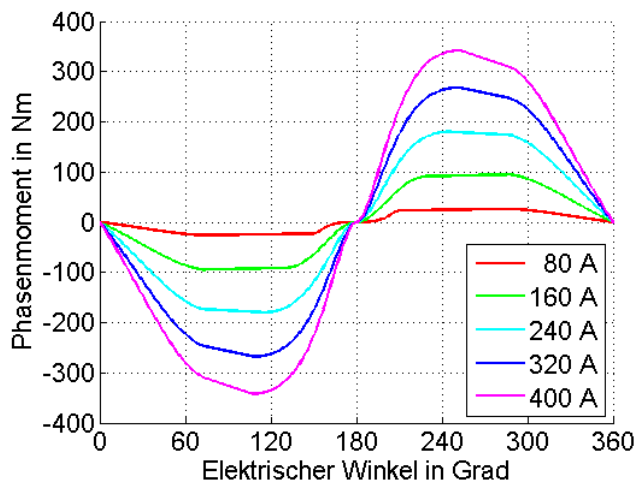


Abbildung 3: Phasendrehmoment des Referenzmotors über dem Winkel für verschiedene Ströme

Diese aus den Ψ - i -Kennlinien berechneten Motorgrößen und -kennfelder bilden nun die Grundlage für ein Simulationsmodell, das das gesamte Antriebssystem bestehend aus Motor, Stromrichter, Regelung und eines einfachen Modells einer mechanischen Last abbildet. Dieses Simulationsmodell wurde in Matlab/Simulink aufgebaut.

AP 2.1.1.4.1 Systematisierung verschiedener Motorkonstruktionen und Konzeptstudien zur Erreichung der Zielparame-ter

Im Laufe des Entwicklungsprozesses sind folgende Varianten in der grundsätzlichen Motorkonstruktion konzeptionell untersucht worden:

- Umstellung von U- auf H-förmige Stator-Pole:

Durch die gemeinsame Nutzung des Jochs im Magnetkreis zweier Stator-Pole aus benachbarten Phasen konnte eine deutliche Reduzierung der axialen Baulänge des Motors erreicht werden (-33 % beim Demonstrator Fahrtrieb). Weiterhin wird dadurch auch der Materialeinsatz an SMC erheblich gesenkt (-23 % beim Demonstrator Fahrtrieb). In den Abbildungen 4 und 5 ist diese Maßnahme dargestellt. Eine starke Sättigung im Statorjoch ist selbst bei gleichzeitiger Bestromung der beiden angrenzenden Phasen nicht zu befürchten, da die Feldverläufe gegensinnig orientiert sind und sich damit teilweise aufheben.

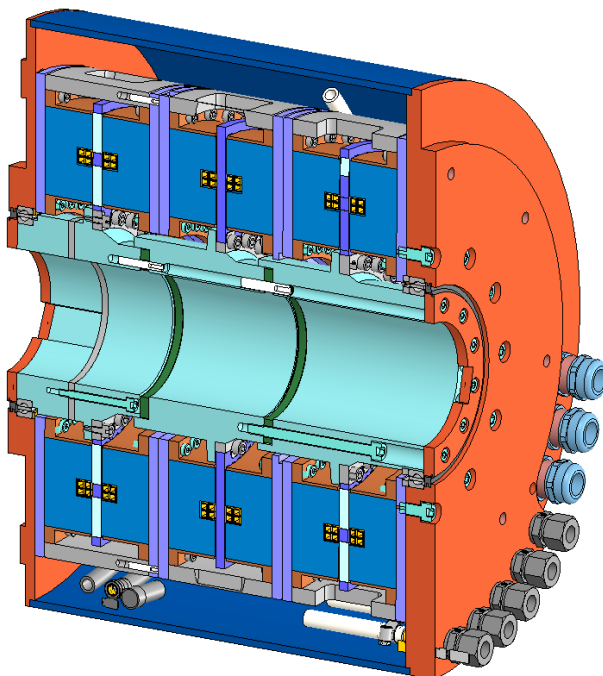


Abbildung 4: U-Statoren

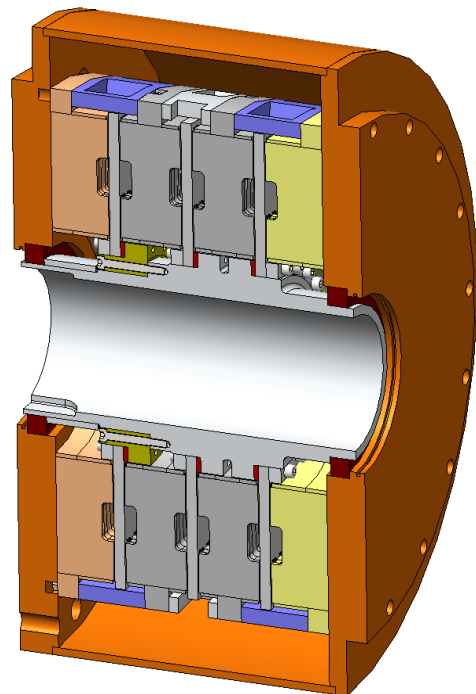


Abbildung 5: H-Statoren

- Erhöhung der Phasenanzahl:

Es wurde untersucht, wie sich eine mögliche Erhöhung der Phasenanzahl (Anzahl der Rotorscheiben und Statoren) hinsichtlich des Drehmomentes auswirkt. Abbildung 6 zeigt die Phasendrehmomente bei konstanter blockförmiger Bestromung der Amplitude von 300 A jeweils für einen 3-, 4- und 5-phasigen Aufbau. Weiterhin sind das erreichbare Gesamtmoment als Summe der einzelnen Phasendrehmomente, dessen Mittelwert sowie das Minimum des Summendrehmomentes, welches gleichzeitig das Maximum des Drehmomentes ist, das bei Strömen bis 300 A über den vollen Umfang ideal glatt regelbar ist, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass zwar das mittlere Drehmoment proportional zu Phasenanzahl zunimmt (von 243 Nm auf 324 Nm bzw. 406 Nm), aber das maximal glatt regelbare Drehmoment erst bei einem 5-phasigen

Aufbau signifikant steigt (von 205 Nm auf 238 Nm bzw. auf 368 Nm). Ähnliches wurde in [Jaj93] gezeigt.

Allerdings ergeben sich aus der Erhöhung der Phasenanzahl einige grundsätzliche Probleme vor allem bzgl. der mechanischen Maßhaltigkeit: Da dabei auch die axiale Länge steigt und da eine Sandwichbauweise vorliegt, bei der in axialer Richtung mehrere Bauteile übereinander geschichtet montiert sind, addieren sich fertigungstechnisch bedingte Toleranzen sowie Wärmedehnungseffekte. Das ist hinsichtlich der Einhaltung des Luftspaltes schon bei 3-phasigen Aufbauten als kritisch einzustufen. Zudem steigt mit zunehmender Phasenanzahl auch der leistungselektronische Bauteilaufwand, da pro Phase jeweils eine eigene Brückenschaltung benötigt wird.

Aus diesen Gründen erschienen weitere Überlegungen zu höherphasigen Motorkonstruktionen nicht sinnvoll und wurden deshalb nicht weiter verfolgt.

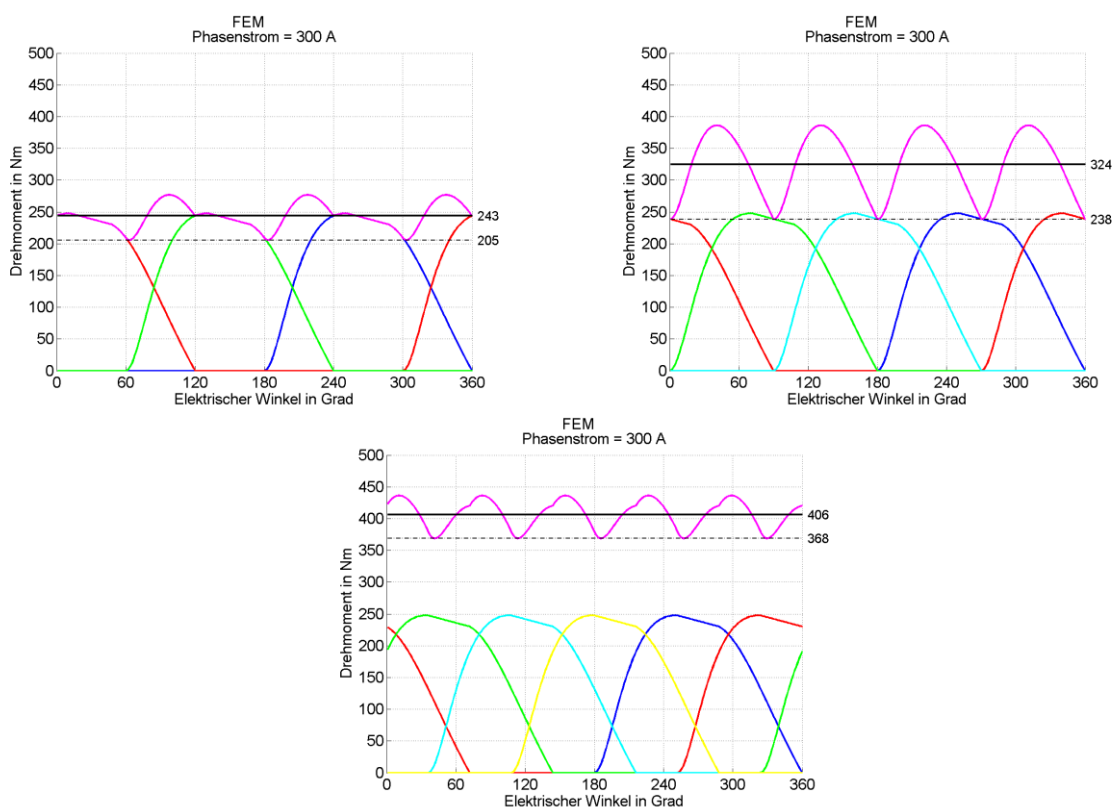


Abbildung 6: Drehmomentsummierung bei 3-phasiger (oben links), 4-phasiger (oben rechts) und 5-phasiger (unten Mitte) Ausführung

AP 2.1.1.4.2 Entwürfe und Optimierung des Referenzantriebs

Als Eckdaten wurde für den Referenzantrieb eine Leistung von 40 kW bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} festgelegt. Das ist insofern bemerkenswert, als dass beim LEANTEC-Konzept hohe elektrische Grundschwingungsfrequenzen f_{el} auftreten. Der Zusammenhang ergibt sich über die Polzahl p und die mechanische Drehzahl n_{mech} nach $f_{el} = p \cdot n_{mech}$.

Legt man beispielsweise die Konfiguration des Labormusters mit 146 Polen zugrunde, ergäbe sich für 2000 min^{-1} eine Grundschwingungsfrequenz von 4867 Hz. Eine solch hohe Frequenz bringt eine Vielzahl von Problemen mit sich. Zum einen steigen mit der Frequenz die Eisenverluste (v.a. Wirbelstromverluste) als auch die Kupferverluste (v. a. durch Stromverdrängung), zum anderen stoßen die Möglichkeiten der Leistungselektronik, Stromformen einzuprägen, an ihre Grenzen. Aus

vorangegangenen Untersuchungen hat sich ca. 1 kHz sowohl von den Verlusten, als auch hinsichtlich der Leistungselektronik als annehmbarer Kompromiss bezüglich der Maximalfrequenz gezeigt. Deshalb wurden für Polzahlen um $p = 30$ weitere Untersuchungen angestellt und letztlich die Polzahl $p = 32$ festgelegt. Des Weiteren wurde von der bisher im Labormuster verwendeten Hohlleiterwicklung abgewichen und eine Litzenwicklung entwickelt, bei der gleichzeitig separate Kühlrohre mit in die Nut eingelegt werden. Gründe für diese Maßnahme waren einerseits die Reduzierung der Stromverdrängungseffekte und andererseits die Erhöhung der Windungszahl, welche bei gleicher Durchflutung kleinere Ströme benötigt und somit den Aufwand aus leistungselektronischer Sicht verringert.

AP 2.1.1.4.3 Entwürfe und Optimierung der Demonstratoren

Da der Bau der Demonstratoren Spannmittel, Drehtisch, Extruder und Radlader bereits früh in der Projektlaufzeit vollzogen wurde, konnten dort keine Untersuchungsergebnisse eingebracht werden. Für den Demonstrator Extruder V2 wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, die in den Entwurfsprozess einfließen. So wurden die Erfahrungen aus den Untersuchungen an den Demonstratoren der ersten Generation genutzt, um Bearbeitungsfaktoren und Toleranzen einzuarbeiten, mit denen sichergestellt werden konnte, dass die Zielparameter erreicht werden. Hier sind Luftspalt- und Phasenverschiebungen ebenso wie Bearbeitungseinflüsse an den SMC-Bauteilen zu nennen. Weiterhin wurden die fertigmöglichen Abmessungen der SMC-Bauteile berücksichtigt. Da beim Extruder die maximal mögliche Windungszahl $w = 8$, die ausreichend steile Stromanstiege für ein glattes Drehmoment erlaubt, wurde nicht wie im Referenzantrieb eine Litzenwicklung gewählt, sondern zurück zur Hohlleiterwicklung gegangen. Dabei wurden verschiedene Windungszahlen und unterschiedliche Anordnungen der Windungen in der Nut untersucht. Als wichtigste Neuerung ist die aus Edelstahl gefertigte Rotorscheibe zu nennen, die die mechanischen Eigenschaften (Begrenzung der Durchbiegung) gewährleisten soll. Die Rotorscheibe ist mit einer Beschichtung gegenüber den SMC-Teilen isoliert, um die Ausprägung von Wirbelströmen zu unterbinden.

Weitere Untersuchungen betrafen die Kaskadierung der Maschine (mehrere 3-phasige Baugruppen auf einer Welle). Diese Option wurde aber aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und zusätzlicher Komplexität verworfen.

Der Abschluss der Entwicklung von Optimierungs-Tools war neben der Berücksichtigung von fertigungsbedingten Toleranzen auch geprägt von großen Abweichungen (bis 30 %) der auf den Materialuntersuchungen in TP 1.5 basierenden Drehmomentberechnungen und den tatsächlich gemessenen statischen Drehmomenten am Labormuster. Eine Ursache für die Unterschiede in den Drehmomenten war die Tatsache, dass die Materialuntersuchungen an genormten Ringkernproben durchgeführt wurden, die Maschinen aber einen Magnetkreis mit mehreren unterschiedlichem Querschnitten je SMC-Statorsegment besitzt. Diese unterschiedlichen Querschnitte in den Presslingen führen beim Pressvorgang zu einer ungleichmäßigen Dichte innerhalb der Statorsegmente und damit zu einem insgesamt anderen Verlustverhalten bei sonst gleicher Magnetisierung.

Um die Treffsicherheit der Optimierung zu erhöhen, war eine von der klassischen Norm abweichende Leerlaufmessung innerhalb der Prüfung notwendig. Vorgeschlagen wurde die Bestromung nur einer Phase der Referenz-/Demonstratormaschine mit einem sinusförmigen Strom geringer Größe (z. B. 20 % des Bemessungsstroms), um die Maschine in dieser Phase in die magnetisch mittlere ausgerichtete Position zu bewegen.

In der so eingestellten Rotorposition bestromt man diese Phase mit einem von null ansteigenden sinusförmigen Strom und misst die an den Phasenklammern sich einstellende Spannung. Aus den somit vorliegenden Wertepaaren von Strom und Spannung lässt sich die Charakteristik des tatsächlichen Magnetkreises mit allen Toleranzen und Sekundäreffekten bestimmen und als Grundlage für die Magnetkreisberechnung in den Berechnungs-, Entwurfs- und Simulations-Tools implementieren. Die Messungen werden bei Bedarf für unterschiedliche Frequenzen wiederholt.

Bei einer hinreichenden Anzahl dieser Messungen kann in der späteren Serienfertigung eine statistisch gesicherte Kennlinie für jeden Maschinentyp einmalig hinterlegt und wiederholt verwendet werden.

AP 2.1.2.6 Entwicklung der Motor-Aktivteilgeometrie

Ausgehend von der Konzeption und dem Entwurf der Architektur des Modells für das Gesamtantriebssystem unter AP 2.1.1.4 wurden Varianten einer Motor-Aktivteilgeometrie untersucht. Dabei wurden die elektromechanischen Feldsimulationen aus den FEM-Simulationen (Ψ - i -Kennlinien) in das Antriebsmodell eingespeist und der dynamische Betrieb simuliert. Mit den so gewonnenen Ergebnissen konnte ein Erreichen der Zielparameter geprüft werden. Als weiteres Ergebnis erfolgte die Nutzung der berechneten Stromverläufe, um die Maschinenverluste (Kupfer- und Eisenverluste) zu bestimmen. Diese Verluste gingen dann in die Erwärmungsberechnungen (und die thermische Auslegung) ein und hatten mit deren Ergebnissen zusammen wiederum Einfluss auf die iterative Auslegung der magnetischen Aktivteilgeometrie.

Die Entwicklung der Motor-Aktivteilgeometrie wurde mit der Festlegung der äußeren Parameter abgeschlossen. Daraus ergeben sich für den Referenzmotor somit die in Tabelle 3 genannten Daten.

Tabelle 3: Daten des Referenzmotors

Magnetkreis:	Somaloy 3P700, H- und U-Magnetkreissegmente im Stator
Polzahl p :	32
Wicklung:	verdrillte Kupferlitze aus 0,8 mm starkem Lackdraht im Glasseidenschlauch, 8 Windungen je Statorhälfte
Mittlerer Durchmesser:	235 mm
Äußerer Durchmesser:	330 mm (ohne Gehäuse)
Länge:	148,9 mm (ohne Gehäuse)

Daraus ergeben sich folgende Bemessungs- und Überlastwerte:

Tabelle 4: Bemessungspunkt und Überlast des Referenzmotors

	Bemessung	$M_{max}; P_{konst}$	P_{max}
I_{max} in A	250	400	320
f_1 in Hz	1273	653	1189
n in min^{-1}	2387	1224	2230
M in Nm	200	390	300
P_{mech} in kW	50	50	70

1.2 AP 2.3 Technologieprüfungen

AP 2.3.3 Technologieprüfung auf Modellierungsebene und Abgleich der Prüfungsergebnisse mit Modellierung

Die für den Referenzmotor verwendete Litze wurde für ein erstes Wicklungsmuster vom ETI selbst aus 22 einzelnen Kupferlackdrähten mit je 0,8 mm Durchmesser hergestellt, um mindestens 360 ° verdrillt und in einen Glasseidenschlauch eingezogen.

Der Partner IVMA hat nach den Vorgaben des ETI eine Form gefertigt, in welche die Litze von ETI und IVMA eingelegt und über den Partner SAMAG von einem Unterauftragnehmer unter Vakuum mit Harz vergossen wurde. Danach erfolgte die Prüfung der Durchschlagfestigkeit.

Die o. g. technologischen Verfahrensschritte wurden dokumentiert, optimiert und durch Tests mit den berechneten Vorgaben verglichen, so dass einerseits die Voraussetzungen für eine zuverlässige Wicklung der Referenzmaschine bestehen und andererseits das Arbeitspaket „Technologieprüfung auf Modellierungsebene“ erfolgreich abgeschlossen werden konnte..

Die statischen Phasendrehmomente der gebauten Demonstratoren wurden indirekt aus den gemessenen Spannungs-Strom-Zeitverläufen konstruiert und mit den statischen FEM-Ergebnissen verglichen. Ein Beispiel zeigen Abbildung 7 und Abbildung 8. Es zeigt sich, dass die gemessenen Phasendrehmomente (rot, grün, blau) unterschiedlich hoch sind. Ursache dafür könnten um wenige Mikrometer unterschiedlich eingestellte Luftspalte oder unterschiedliche Eigenschaften des Magnetkreismaterials in den verschiedenen Phasen sein. Der Mittelwert (schwarz) des überlagerten Gesamtdrehmomentes (Magenta) und dessen Minimum (schwarz gestrichelt) stimmen jedoch relativ gut mit den Vorbetrachtungen überein.

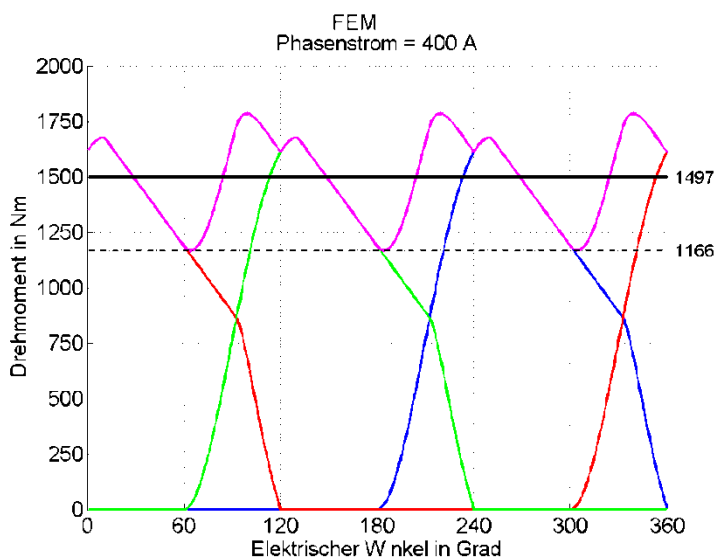


Abbildung 7: Statische Drehmomente – FEM

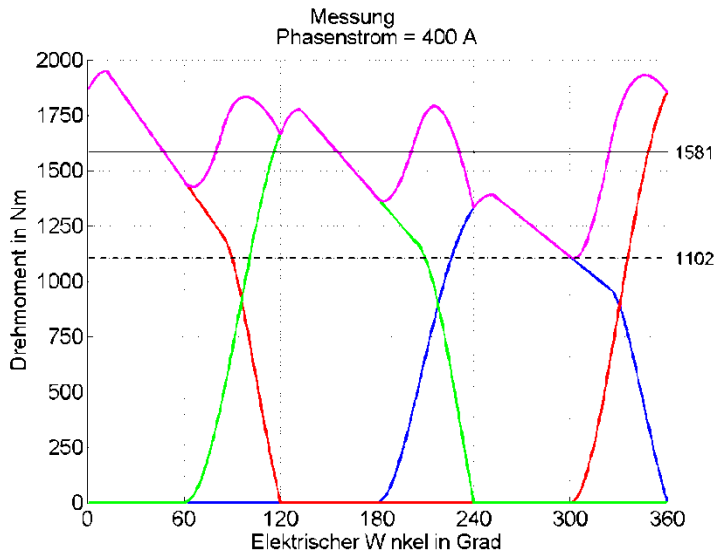


Abbildung 8: Statische Drehmomente - Messung

1.3 AP 2.4 Fertigungs- und Prüftechnologie

AP 2.4.2.12 Modellierung und labortechnische Evaluierung von Mess- und Prüfverfahren für LEANTEC-Antriebe

Das ETI verfügt über einen Maschinenprüfstand, an dem zu prüfende Elektromotoren bis $M = 200 \text{ Nm}$ und $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ belastet werden können. Durch die bewilligte Förderung umfasst die Messtechnik zusätzlich eine Drehmomentmesswelle bis 1000 Nm mit integriertem Drehzahlsensor, 3 Stck. LEM-Stromwandler und einen mehrphasigen Power Analyzer, der auch insbesondere für überschwingungsbehaftete Größen geeignet ist. Weiterhin verfügt das ETI über einen Transientenrecorder zum Aufzeichnen von zeitlich veränderlichen Größen mit hoher Auflösung und Elektronik zum Messen von thermischen und durch die Förderung auch für strömungstechnische Größen.

Das Prinzipschaltbild des universellen Prüfstands für die Durchführung insbesondere der über die einschlägige Norm (IEC 60034-2) hinausgehenden Versuche ist in Abbildung 9 dargestellt.

Mit dieser Ausstattung können Schlep- und Leerlaufversuche sowie verschiedene Belastungsversuche am drehenden Objekt durchgeführt werden. Weiterhin können Versuche an einzelnen Teilen und Bauteilen des Prüflings durchgeführt werden. Aus den gemessenen elektrischen Größen können Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Modelle oder auf mögliche Fehler und Probleme im Prüfling gezogen werden. Die Effizienz des Kühlsystems kann dabei über die Erwärmung des Motors und die Erwärmung des Kühlmediums direkt beurteilt werden.

Prinzipschaltbild für die Prüfung der LEANTEC-Demonstratoren, Stand 02/13

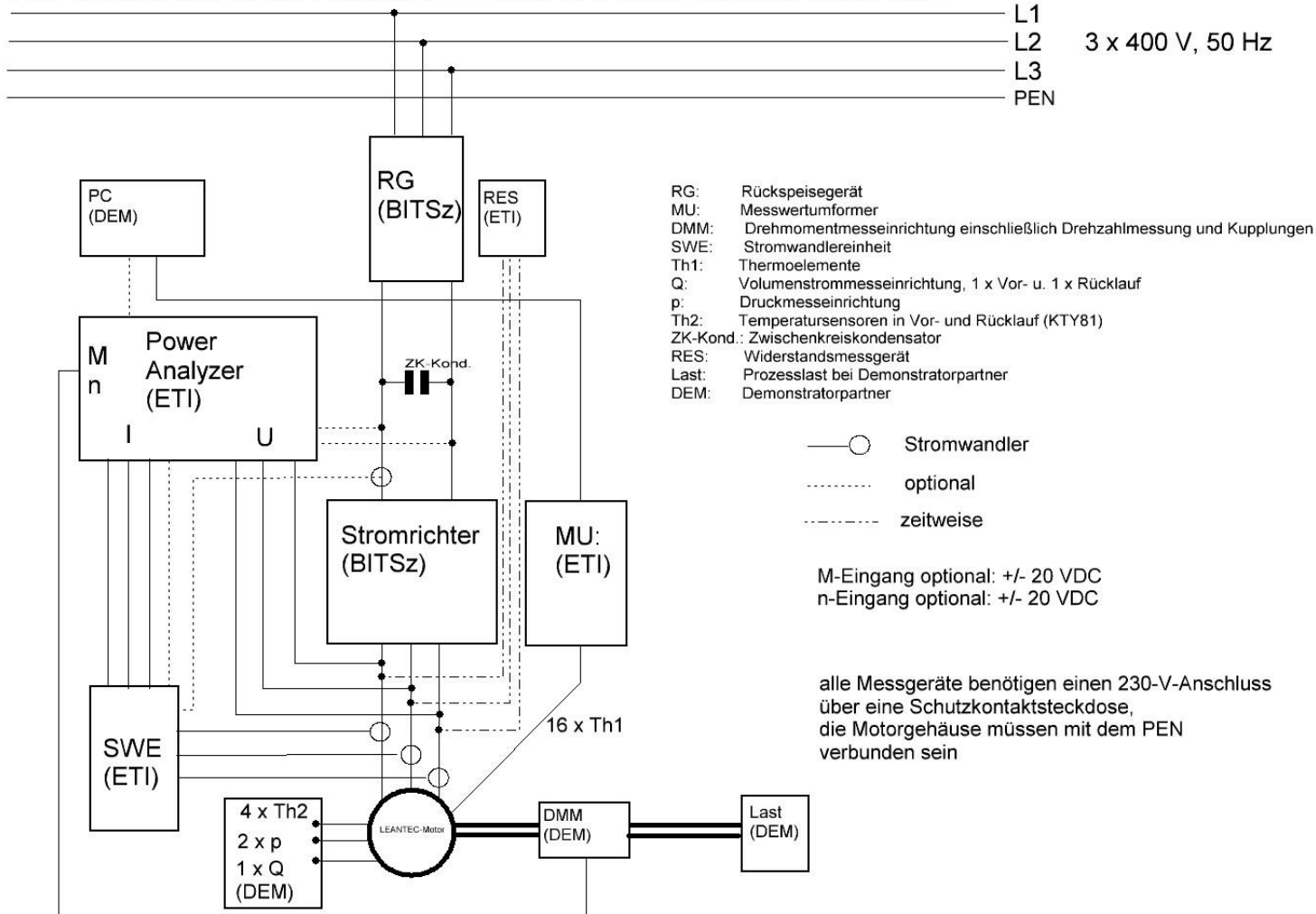


Abbildung 9: Prinzipschaltbild des LEANTEC-Antriebsprüfstands am ETI

Für diesen Versuchsstand wurde ein Messplan erstellt und abgearbeitet. Die einzelnen durchgeführten Messungen sollen im Folgenden kurz 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 kann ungewöhnliches Motorverhalten über dem Drehzahlband beobachtet werden, soweit zutreffend.

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.

Da die Wasservorlauftemperatur deutlich geringer war als die Temperatur der Umgebungsluft wurde ein Abkühlungsversuch durchgeführt, um ohne mechanische oder elektrische Beanspruchung die thermischen Zeitkonstanten zu bestimmen. Parallel kann über die Auswertung von Druck- und Volumenstrommessung die hydraulische Vorauslegung des Kühlsystems überprüft werden.

Teil der Sondermessungen waren Untersuchungen hinsichtlich des EMV-Verhaltens von Motor und Umrichter und die Einkopplung von Störungen in das Messsystem.

1.4 AP 2.5 Auslegungstools für LEANTEC-Antriebe

AP 2.5.1.1 Erarbeitung eines analytischen Entwurfsprogramms

Die Auslegung eines neuen LEANTEC-Motors erfolgt nach dem in Abb. 10 dargestellten Schema als Kombination mehrerer Berechnungstools, die während der einzelnen AP auch innerhalb des TP 1.5 erarbeitet wurden.

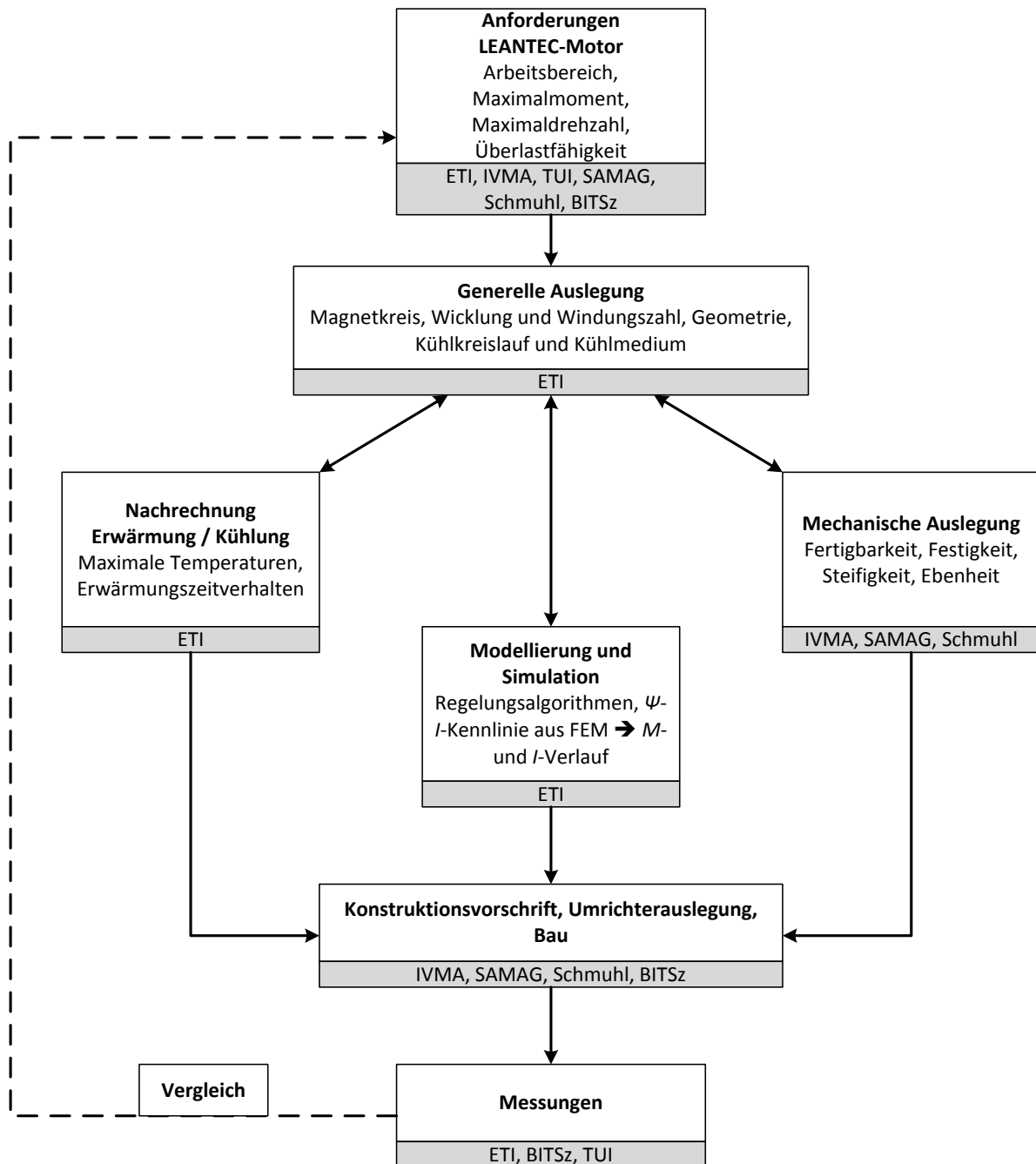


Abbildung 10: Ablaufplan einer Motorauslegung

Im Auslegungsprozess werden zuerst die Anforderungen an den auszulegenden Motor gemeinsam mit dem Anwender definiert. Davon ausgehend erfolgt eine Grobauslegung hinsichtlich der Magnetkreisgeometrie. In einer Kombination aus analytischer Rechnung und FEM werden die elektromagnetischen Parameter und die Verluste bestimmt. Im nächsten Schritt werden dann

Kühlung, Wicklung, Regelung und die mechanische Auslegung angepasst und überprüft. Sollten hier Probleme auftreten, muss in einem iterativen Prozess die Grobauslegung erneut erfolgen, bis alle Anforderungen erfüllt werden. Anschließend kann der Motor gebaut und der passende Umrichter ausgelegt werden. In einem letzten Schritt wird durch Messungen nachgewiesen, dass die ursprünglichen Anforderungen erfüllt werden.

Details zu den einzelnen Schritten im Auslegungsprozess befinden sich in den Teilberichten aus VP 1.

AP 2.5.1.2 Auswahl, Schnittstellendefinition und Einbindung von FEM-Programmen

Es wurden unter diesem Arbeitspaket Schnittstellen in Form von Dateiformaten definiert, anhand derer die Ergebnisse der FEM-Feldberechnungen in die Gesamtantriebssimulation übertragen wurden. Die Ergebnisse dieser Antriebssimulationen flossen in Form der Stromkurven einerseits in die thermische Auslegung ein und zusammen mit deren Ergebnissen iterativ wieder in die elektromagnetische Auslegung mittels FEM zurück. Für die elektromagnetischen Simulationen wurden die Programme Maxwell und Ansys der Firma Ansoft verwendet.

Zusätzliche Strömungssimulationen wurden mit der Software Ansys Fluent der Firma Ansoft durchgeführt.

AP 2.5.1.3 Berechnungsprogramme für Parameter und Kenngrößen

Die Eisenverluste wurden aus den simulierten zeitlichen Verläufen der magnetischen Flussdichte mit einem Algorithmus nach [Tel98] berechnet. Dieser benötigt gemessene Hystereseschleifen des verwendeten Magnetkreismaterials und berechnet abhängig vom vorherigen Magnetisierungszustand die magnetische Permeabilität mit

$$\begin{aligned} \frac{db}{dh} &= \mu_0 + \frac{b_{h-}(h) - b}{b_{h-}(h) - b_{h+}(h)} \cdot \left[\frac{db_{h+}(h)}{dh} - \mu_0 \right], dh > 0 \\ \frac{db}{dh} &= \mu_0 + \frac{b - b_{h+}(h)}{b_{h-}(h) - b_{h+}(h)} \cdot \left[\frac{db_{h-}(h)}{dh} - \mu_0 \right], dh < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Zusätzlich wurde die Geometrieabhängigkeit der Verluste berücksichtigt. Detailliertere Informationen finden sich in [Doe15a].

Im Rahmen einer Diplomarbeit [Lei13] wurde versucht das elektromagnetische Verhalten durch ein magnetisches Ersatznetzwerk abzubilden. Dabei werden Sättigung, Streuung und die dreidimensionale Struktur berücksichtigt. Dieses hat mit wenigen Millisekunden eine mehr als 100-fach geringere Rechenzeit als eine 2D-FEM, aber ist nicht für stark voneinander abweichende Geometrien verwendbar. Die magnetischen Flüsse lassen sich relativ gut berechnen. Die aus deren Ableitungen resultierenden Drehmomente sind leider meist unzureichend genau. Weitere Informationen enthält [Doe15b].

Der Versuch eines analytischen Entwurfsprogramms wurde eingestellt, da sich die hohe Anzahl geometrischer Parameter und die nichtlinearen Einflüsse (Sättigung und Streuung) nicht hinreichend genau berücksichtigen ließen. Stattdessen eigneten sich die gewonnenen analytischen Zusammenhänge, um vorhandene FEM-Ergebnisse in einem gewissen Rahmen auf verschiedene Geometrien umzurechnen. Zum Beispiel ist das Drehmoment linear von der radialen

Zahnkantenlänge abhängig, solange die Querschnittsfläche des inneren Zahns sich nicht erheblich von der des äußeren Zahns unterscheidet.

Für die Berechnung des Stromverdrängungsfaktors muss zunächst das Stromsignal mittels Fourier-Analyse in die Summe sinusförmiger Schwingungen zerlegt werden. Für jede dieser Schwingungen können dann der Stromverdrängungsfaktor und die Kupferverluste mit dem eigentlichen Verlustmodell berechnet werden. Die gesamten Kupferverluste ergeben sich aus der Summe der Einzelverluste. Die Berechnung erfolgt aus Zeitgründen nur für die ganzzahligen Harmonischen. Im Signal sind aber durch die stark verzerrte Stromform noch Signalanteile geringer Amplitude enthalten, deren Frequenz zwischen den Harmonischen liegt. Um diese sogenannten Zwischenharmonischen auch zu berücksichtigen, werden sie nach Norm DIN EN 61000-4-7 quadratisch auf die Harmonischen addiert. Im Ergebnis liegt eine Matrix vor, in der Frequenz und Amplitude jeder Harmonischen enthalten sind und mit der das Verlustmodell gespeist wird.

Ein wichtiger Parameter für die thermischen Rechnungen ist der sogenannte Wärmeübergangskoeffizient in den Hohlleitern, der das Wärmeübertragungsvermögen aus den Wicklungen an das Kühlmedium beschreibt. Um diesen zu bestimmen, muss der Volumenstrom in den Kühlleitern bekannt sein. Es wurde ein Strömungsnetzwerk erstellt, das aus dem vorgegebenen Druckverlust des Kühlsystems iterativ den Volumenstrom in jeder Wicklung und in jedem Kühlleiter berechnet. Es wird dabei gleichzeitig untersucht, wie sich die Kühlströme auf die verschiedenen Rohrleiter aufteilen, um sicherzugehen, dass es nirgendwo zu einer Unterversorgung mit Kühlflüssigkeit kommt. Für jeden Kühlleiter kann dann der Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden, mit dem das thermische Netzwerkmodell gespeist wird.

Es gibt darüber hinaus noch Berechnungsmodelle für die Wärmeübergangskoeffizienten im Luftspalt der Maschine, wobei hier zwischen dem Luftspalt am scheibenförmigen Rotor und dem zylindrischen Luftspalt der Welle unterschieden wird. Alle Berechnungsalgorithmen berücksichtigen den Einfluss der Temperatur und sind für verschiedene Geometrien und Arbeitspunkte des Motors einfach anpassbar.

AP 2.5.1.4 Entwicklung von Optimierungstools

Durch die Gesamtsystemsimulation bei der Entwicklung der Aktivteilgeometrie und die Modellierung der Spezifika verschiedener Materialpaarungen konnte das Antriebssystem in seiner Konstruktion den Anforderungen (leistungsdichte- bzw. drehmomentdichteoptimiert) entsprechend modifiziert werden.

Beispiele für die Wirksamkeit der durchgeführten Simulationen sind der Einsatz von H-Segmenten im Stator und eine veränderte Kühlung durch separate Edelstahlkühlrohre in der Nut und in den Zwischenträgern der einzelnen elektrischen Phasen am Rücken der SMC-Segmente, sowie der Einsatz von flexiblen, nicht direkt gekühlten Kupferleitern.

Eine Berücksichtigung von Toleranzen und Spaltmaßen aus der Fertigung und den Werkstoffen selbst ist dabei zwar möglich, stößt aber aufgrund des hohen Rechenzeitaufwands schnell an Grenzen. So sollte im Vorfeld vom fachkundigen Anwender bereits abgeschätzt werden, ob der Aufwand in wirtschaftlicher und vernünftiger Relation zum Aufwand steht. Zum Beispiel ist die Berücksichtigung von Graten an den Zahnkanten in der Größenordnung von einem Zehntelmillimeter mit einem FEM-Modell nicht sinnvoll, da sich diese Grate bei der vorgesehenen Aussteuerung ohnehin in der Sättigung befinden und damit wirkungslos sind.

AP 2.5.1.5 Entwurfsprogramm für Motorenreihe

Die Arbeiten an einem Entwurfsprogramm sind abgeschlossen. Für verschiedene, vorgegebene Zielparameter können entsprechende LEANTEC-Motorvarianten hinsichtlich Zahnzahl, Windungszahl, Zahnkantenlänge und Aktivteildurchmesser entworfen werden.

Für das Entwurfsprogramm wurden entsprechende Schnittstellen für eine Einbindung der unter TP1.5 entwickelten FEM-Modelle definiert und umgesetzt. Wie bereits unter Punkt 2.5.1.1 erläutert, können so in einem iterativen Prozess Motoren ausgelegt werden.

Schwerpunkt des Entwurfsprogrammes ist die Zusammenführung der teilweise sehr unterschiedlichen Bemessungsparameter wie Drehzahl und Drehmoment für verschiedene Anwendungen in eine gemeinsame Typenreihe.

Gegenüber der ursprünglichen Software Mathcad wird jetzt Matlab verwendet. Der wesentliche Entwurfsgang basiert auf den wichtigsten analytischen Zusammenhängen für diesen Maschinentyp. An kritischen Stellen ist über entsprechende Schnittstellen die Einbindung von FEM-Rechnungen möglich und notwendig.

Für den Entwurf sind außerdem 2D-FEM-Rechnungen vorgesehen, auf die durch die analytischen Algorithmen zugegriffen werden kann. 3D-Rechnungen werden nur dann und separat durchgeführt, wenn es sich um völlig neue Geometrien und Materialien handelt, da diese Simulationen sehr zeitaufwendig sind. Wesentlicher Inhalt der FEM-Rechnungen ist die Bestimmung der Eisenverluste in Rotor und Stator. Zusätzlich können auch Ergebnisse sowohl zu den Materialeigenschaften als auch aus den Prüfstandsmessungen eingebunden werden.

Teil des Entwurfsprogrammes ist zudem die Berechnung der Wicklungsverluste unter Berücksichtigung der Stromverdrängung. Damit können für verschiedene Wicklungsarten (Hohlleiter oder Litze) und Windungszahlen schnell die Verluste berechnet werden.

Für die Auslegung der Kühlung sind entsprechende Berechnungsalgorithmen implementiert, die es gestatten, für eine Vielzahl von möglichen Strömungsverhältnissen entsprechende Rechnungen zu den Druckabfällen, Temperaturen, Querschnitten und Geschwindigkeiten unter Einbeziehung ebenfalls hinterlegter Kennwerte wie z. B. Rohrreibungskoeffizienten bzw. Oberflächenrauigkeiten vorzunehmen.

Die entsprechenden Parameter und Kenngrößen sind ebenfalls über Tabellen bzw. Nomogramme in das Entwurfsprogramm eingebunden. Mit dem Entwurfsprogramm ist letztlich auch die Wirksamkeit neu entwickelter Kühlkonzepte anhand des Grades der Verlustabführung verifizierbar. Ein thermisches Modell ermöglicht darüber hinaus die Berechnung der maximalen Motortemperaturen und der thermischen Zeitkonstanten.

AP 2.5.1.6 Anwendungsoptimierte Programmerprobung und Programmverfeinerung

Die Auslegungsprogramme wurden dahingehend weiterentwickelt, dass der Benutzer möglichst wenige Eingabeparameter vorgeben muss. Beispielsweise verkleinert sich die Iterationsschrittweite der Eisenverlustberechnung von selbst, wenn die Berechnungsergebnisse mehrere Prozent außerhalb der gemessenen Hystereseschleife liegen. Unregelmäßigkeiten in den Messwerten werden geglättet und zusätzlich wird eine Warnung ausgegeben. Der Benutzer muss sich somit nicht mehr um die Einstellung der Iterationsparameter kümmern. Außerdem werden die Eingabeparameter auf Fehleingaben überprüft.

Die bisherigen FEM-Simulationen haben gezeigt, dass eine Erfassung des Einflusses von Toleranzen im Bereich von wenigen Prozent bei den geringen Bauteilnennmaßen derzeit nicht möglich ist. Für die Maßhaltigkeit der SMC-Aktivteile wird eine Toleranz von (2 ... 3) % bei absoluten Abmessungen im Zahnbereich von kleiner 10 mm prognostiziert. Hier stößt die Vernetzung der Modelle an die gleichen Kapazitäts- und Zeitgrenzen wie im TP1.5 bei der Berücksichtigung der Luftspalte. Variantenrechnungen bezüglich Luftspaltveränderungen bzw. Herstellungstoleranzen wurden bereits im TP1.5 durchgeführt.

1.5 AP 2.6 Vorstandstätigkeit und Regionalmanagement

Der Projektleiter des TP 2.3 ist gleichzeitig als Mitglied des Vorstands des Wachstumskerns LEANTEC deren Wissenschaftlicher Sprecher. Er organisiert und leitet regelmäßige Treffen der zu diesem Verbund- und Teilprojekt gehörenden Partner. Außerdem informiert er über die neuesten Erkenntnisse, benennt die ihm zugearbeiteten Probleme und wirkt fördernd für deren Lösung. Am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe werden regelmäßig Forschungsvorträge zu aktuellen Teilprojektthemen des Wachstumskerns 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, und Saalfeld statt.

2 Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Aufstockungsphase)

2.1 AP 2.5.3 Demonstrator Extruder Version 2

AP 2.5.3.1.1 Anforderungen an eine anwendungsoptimierte Maschine

Der Anwender, die TU Ilmenau (KTI), fordert einen Motor, der die in Abb. 11 dargestellten Anforderungen erfüllt. Als Dauerdrehmoment sind dabei $M = 1000 \text{ Nm}$ bei einer Drehzahl von maximal $n = 400 \text{ min}^{-1}$ gefordert. Bis zu einer Drehzahl von $n = 40 \text{ min}^{-1}$ soll ein Überlastmoment von $M = 1500 \text{ Nm}$ abrufbar sein. Dieser Bereich dient dem Anfahren der Extruderschnecke und wird nur für ca. 1 min angefahren.

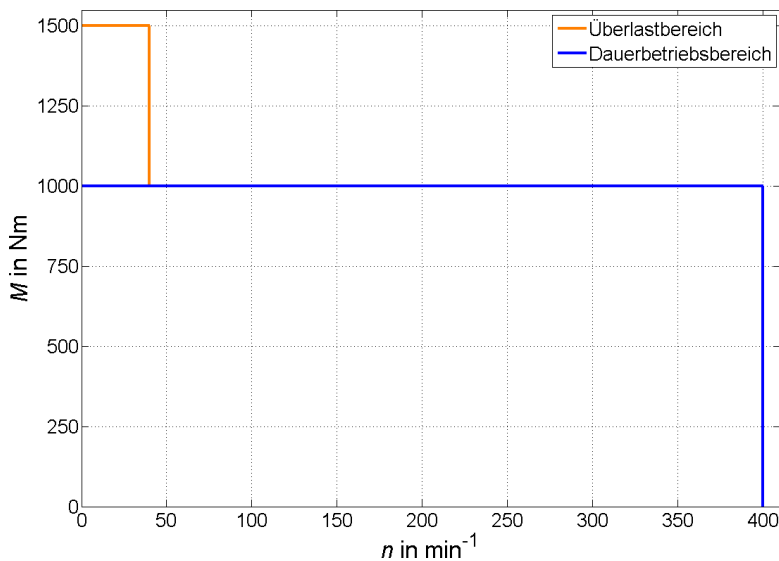


Abbildung 11: Arbeitsbereich des Extruder V2

AP 2.5.3.1.2 Elektromagnetische Parameter

Die elektromagnetischen Parameter ergaben sich zum einen aus den Anforderungen (Drehzahl, Drehmoment), aber auch aus den mechanischen Grenzen (Fertigungsgenauigkeit, max. Bauteilabmessungen). Dazu wurden mehrere Kompromisse zwischen den Bündnispartnern diskutiert. Die finale Version hatte u.a. die in Tabelle 5 dargestellten Parameter.

Tabelle 5: Parameter des Demonstrators Extruder Version 2

Polpaarzahl p	90
Radiale Zahnbreite b_z	65 mm
Mittlerer Wicklungsdurchmesser D_m	470 mm
Windungszahl je Phase w	8
Luftspalthöhe δ	250 μm

AP 2.5.3.1.3.1 Magnetkreismaterial

Das Bündnis einigte sich in der Frage des Magnetkreismaterials (SMC) auf das Prototyping Material der Firma Höganäs. Im Vergleich mit dem bisher verwendeten SMC-Material (SOMALLOY 3P700) lässt sich dieser Werkstoff mechanisch sehr gut bearbeiten, wobei der Einfluss der Bearbeitung auf die magnetischen Eigenschaften nur gering ist. Das Material hat dafür aber auch eine etwas geringere Permeabilität als Somaloy 3P 700.

Das Bündnis schätzt ein, dass für einen Prototypen die Vorteile die Nachteile des neuen Materials überwiegen und für die Berechnungen einen besseren messtechnischen Vergleich zulassen. Abbildung 12 zeigt den Vergleich der an Ringproben gemessenen magnetischen Flussdichte mit den Datenblattangaben.

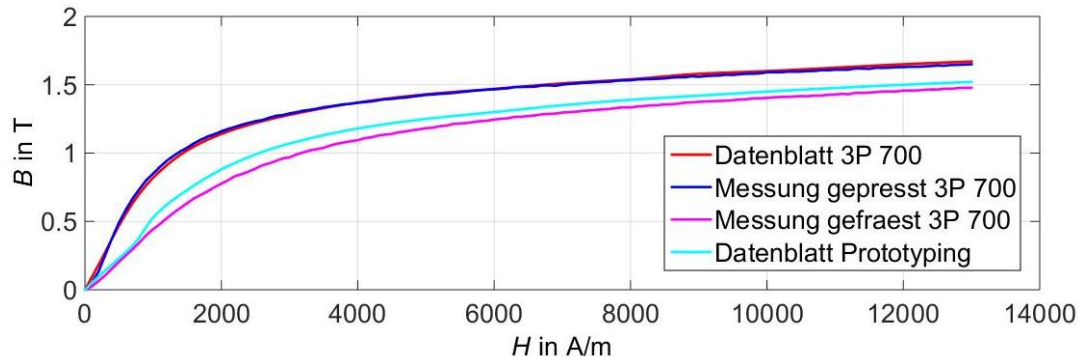


Abbildung 12: B-H-Kurven von Somaloy 3P 700 und Prototyping-Material

Eine verfeinerte analytische Auslegung der Maschine erfolgte auf der Grundlage der Vorgaben für Grundschwingungsfrequenz, Stromhöhe und geschätzten Nutraum.

AP 2.5.3.1.3.2 Wicklung

Die Grundschwingungsfrequenz des geplanten Extrudermotors beträgt unter den oben genannten Voraussetzungen hinsichtlich Polzahl und Drehzahl lediglich 600 Hz. In Verbindung mit hohen Stromstärken, die aus dem großen geforderten Drehmoment resultieren, wurde sich wieder für eine Kupferhohlleiterwicklung mit den Abmessungen 5 mm x 5 mm x 1 mm entschieden. Für den Bemessungsarbeitspunkt lässt sich dafür, unter Verwendung simulierter Stromkurven, ein Stromverdrängungsfaktor von $k_r = 1,6$ berechnen. Die Kupferverluste betragen für diesen Fall $P_{\text{Cu}} = 2,1$ kW bei einem Stromeffektivwert von $I = 206,5$ A. Die relativ großen Kupferverluste werden über die Hohlleiter effektiv abgeführt. Die Windungszahl beträgt 4 pro Statorhälfte bzw. 8 pro Phase. Beide Statorhälften sind elektrisch in Reihe geschaltet.

Zudem liegen durch die vier Demonstratoren bereits umfangreiche Erfahrungen und Werkzeuge zur Fertigung der Hohlleiterwicklung vor.

AP 2.5.3.1.3.3 Isolierung

Die Isolierung folgt der bereits erprobten Technologie der Demonstratoren. Die Kupferrohre werden dabei zunächst pulverbeschichtet. Der Wicklungsring wird anschließend unter Vakuum mit einem Kunstharz vergossen. Der Abstand zwischen Stator und Wicklung wurde im Vergleich zu den Demonstratoren auf 2 mm vergrößert, um die Teilentladungsfestigkeit bzw. das Isoliervermögen insgesamt zu verbessern. Aus den Abmessungen der Wicklung und der Isolierungsdicke ergibt sich das Innenmaß der Nut zu 15 mm x 15 mm. Die Statorzähne werden entsprechend auf Grundlage dieses Maßes konstruiert.

Wie bereits im TP 1.5 erläutert, wurde auch dieses Isoliersystem durch die Fa. EPSa ausgeführt und auf Durchschlagfestigkeit geprüft. Danach erfolgte durch die TU Dresden im Prüffeld der Fa. RITZ Instrument Transformers GmbH ein Nachweis der Teilentladungseinsetzspannung. Beide Prüfungen wurden ohne Beanstandungen von allen Wicklungen bestanden.

AP 2.5.3.1.3.4 Trägermaterial

Ähnlich wie beim Referenzmotor soll der Stator wieder in einen Trägerring aus Aluminium eingebettet werden. Dieser ermöglicht eine stabilere Konstruktion, die sich zudem exakter fertigen lässt.

Aus ähnlichen Gründen soll der bisher verwendete CFK-Rotor durch ein anderes Material ersetzt werden. Das CFK ist bei der angestrebten geringen Rotordicke nicht steif genug und begünstigt unzulässige Verformungen, welche den Luftspalt aufbrauchen. Zudem treten in CFK, aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstoff, Wirbelströme auf, die eine zusätzliche Erwärmung des Rotors hervorrufen. Es werden deshalb mehrere Alternativen aus elektrischer, magnetischer und mechanischer Sicht geprüft. Genauer untersucht wurden Rotoren mit einem Edelstahlträger, Rotoren mit einem reinen GFK-Träger und Hybridrotoren mit einer Mischung aus GFK und CFK. Diese Materialien wurden beim Partner IVMA bezüglich ihrer mechanischen Festigkeit gegenüber thermischer Dehnung und Biegung sowie auf Schwingungsfähigkeit geprüft. Es wurde daraufhin die Entscheidung für einen Edelstahlrotor getroffen, der aus zwei Scheiben besteht, deren Zwischenraum mit einem Kunststoff verfüllt ist.

AP 2.5.3.1.3.5 Kühlsystem

Neben den bereits erwähnten Kupferhohlleitern, die der direkten Leiterkühlung dienen, wird zusätzlich eine Statorkühlung vorgesehen. Erfahrungen mit den ursprünglichen Demonstratoren zeigen, dass eine reine Leiterinnenkühlung nicht als alleinige Wärmesenke ausreicht, da die Eisenverluste im Stator die Kupferverluste teils deutlich übersteigen. Dabei werden Edelstahlkapillarrohre in den Stator eingebracht. Nachfolgende Abbildung 13 zeigt das Kühlsystem.

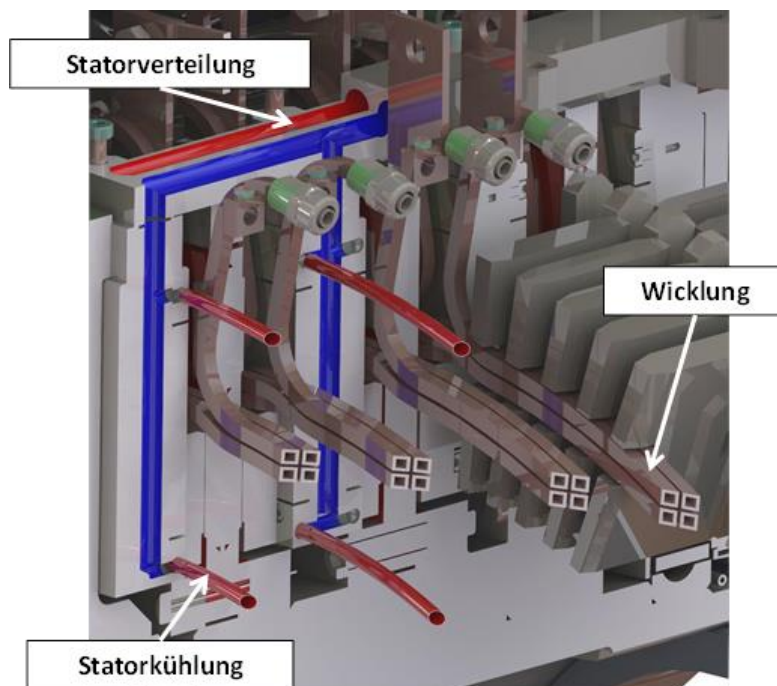


Abbildung 13: Schnitt durch den Demonstrator Extruder V2 mit Kühlsystem

Darüber hinaus sind Bohrungen im Rotor vorgesehen, sodass über die Hohlwelle Luft durch den Luftspalt in radialer Richtung gefördert werden kann. Damit wird eine effektive Zusatzkühlung des

Rotors erreicht. Das Kühlsystem wurde mittels eines Strömungsnetzwerks hydraulisch berechnet und seine Tauglichkeit nachgewiesen.

AP 2.5.3.1.4.1 Analytische Auslegung des magnetischen Kreises und der Wicklung

Da sich Teile des Magnetkreises aufgrund der hohen Ausnutzung relativ stark sättigen und außerdem je nach Rotorstellung nicht zu vernachlässigende Streuflüsse auftreten, weicht die analytische Lösung meist relativ stark von der FEM-Lösung ab. Analytische Abhängigkeiten können jedoch sehr gut verwendet werden, um vorhandene FEM-Lösungen umzurechnen. Beispielsweise bewirkt eine Verdoppelung der radialen Zahnbreite eine Verdoppelung des Drehmomentes.

AP 2.5.3.1.4.2 Numerische Berechnung der elektromagnetischen Eigenschaften

Ein guter Kompromiss aus Rechenzeit und Genauigkeit ist entweder eine statische 2D-FEM oder eine sehr grobe statische 3D-FEM. Diese wiesen im Vergleich zur fein vernetzten statischen 3D-FEM maximale Abweichungen von 10 % auf. Wesentlicher Zeitaufwand entstand dabei durch die Suche nach einer möglichst effizienten Vernetzung.

AP 2.5.3.1.4.3 Berücksichtigung der Wirbelstromrückwirkung

Die Rückwirkung der Wirbelströme auf das Magnetfeld kann aufgrund der Komplexität des Magnetkreises nur mit einer sehr zeitaufwendigen transienten 3D-FEM untersucht werden. Eine gute Abschätzung, ob der Einfluss wesentlich ist, kann mit der Formel zur Berechnung der Eindringtiefe erfolgen. Die Eindringtiefe δ ist abhängig von der elektrischen Frequenz f , der elektrischen Leitfähigkeit κ und der magnetischen Permeabilität μ .

$$\delta = \sqrt{\frac{1/\kappa}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2)$$

Die Eindringtiefe δ ist der Punkt, an dem die Amplitude einer elektromagnetischen Welle nur noch ein e-tel (37 %) der Ausgangsamplitude beträgt. Die halbe Dicke des Statorjochs in Umfangsrichtung beträgt in der Nutmitte 4,6 mm und liegt somit bis zu einer Frequenz von ca. 8 kHz unterhalb der minimalen Eindringtiefe von Somaloy Prototyping. Daher wurde auf eine transiente FEM der Aktivmaterialien verzichtet. Stattdessen wurde die neu erkannte Problematik der Wirbelstromrückwirkung im Rotor- und Statorträger intensiver betrachtet. Mittels transienter FEM wurden verschiedene Trägermaterialien und –geometrien untersucht. Durch eine Schlitzung der Rotorträger zwischen den Rotorzähnen und größere Statortaschen konnten die Verluste simulativ deutlich reduziert werden. Allerdings sind die Ergebnisse einer transienten FEM relativ unsicher. Daher erfolgte die Überprüfung der Überlegungen und Simulationen mit Messungen.

AP 2.5.3.1.4.4 Ermittlung der notwendigen Windungszahl

Die Windungszahl sollte so hoch wie möglich gewählt werden, da sich bei konstanter Durchflutung der Strom verringert, was das leistungselektronische Stellglied entlastet. Die Induktivität steigt allerdings quadratisch mit der Windungszahl und reduziert den maximal möglichen Stromanstieg über der Zeit, welcher die maximal erreichbare Drehzahl (bei glattem Drehmoment) bestimmt. Mit einer Windungszahl von acht (vier je Statorhälfte) ist ein glattes Drehmoment bis zur geforderten Maximaldrehzahl noch erreichbar. Abbildung 14 zeigt die dynamisch simulierten Strom- und Drehmomentverläufe bei Windungszahl $w = 8$.

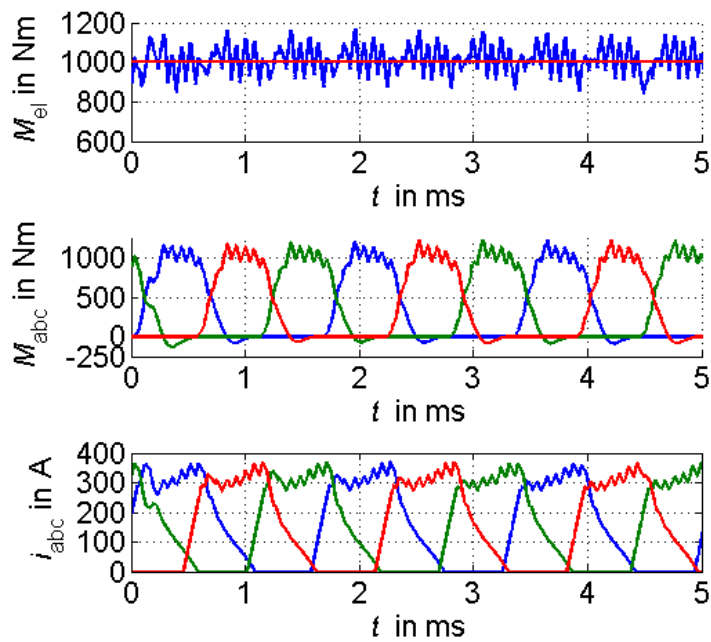


Abbildung 14: Simulierter Strom- und Drehmoment-Zeit-Verlauf

AP 2.5.3.1.4.5 Festlegung des Leitertyps der Windung

Der Leitertyp ergibt sich aus der elektrischen Frequenz und der Anzahl der Windungen. Hohlleiterwicklungen eignen sich aufgrund ihres Bauraums nur für geringe Windungszahlen und aufgrund ihrer massiven Kupferanteile nur für geringe oder mittlere Frequenzen. Da die notwendige Windungszahl acht betrug und die elektrischen Frequenzen unter 1 kHz liegen sollten, wurde die Hohlleiterwicklung gewählt. Die Hohlleiterwicklung ermöglicht durch die direkte Leiterkühlung zudem große Maximalströme, die bei dieser Anwendung durch das große geforderte Maximalmoment auftreten.

AP 2.5.3.1.4.6 Bauraum und Wicklung

Mit einem mittleren Wicklungsdurchmesser von 470 mm ist der Extruder V2 der größte im LEANTEC-Projekt gebaute Motor. Die axiale Länge der Aktivkomponenten beträgt dabei lediglich 210 mm, womit der Extrudermotor sogar noch ca. 60 mm kürzer ist, als die ursprünglichen Demonstratoren. Für die Wicklung ist ein Wickelfenster von 15 mm x 15 mm vorgesehen, da bei den ersten Demonstratoren die Erfahrung gemacht wurde, dass der Wicklungsbauraum wenig Platz für zusätzliche Isolierlagen bietet. Die Länge eines Wicklungsstranges mit vier Windungen beträgt ca. 6,20 m, sodass insgesamt lediglich 37,2 m Kupferhohlleiter verbaut werden müssen, was für einen Motor dieser Leistungsklasse sehr wenig ist. Zur Wicklungsausführung wurden zwei Polpaare je Phase ausgespart (siehe: Abbildung 199). Der Bauraum zwischen den Polpaaren wurde mit einer Vergussmasse ausgefüllt, um zusätzliche mechanische Stabilität zu gewährleisten.

AP 2.5.3.1.4.7 Simulation des Antriebsverhaltens

Schwerpunkt bei der Simulation des Antriebsverhaltens sind neben der Modellierung der Hauptkomponenten Motor, Umrichter und Last die Nachbildung und Implementierung einer geeigneten Steuerung und Regelung. Auf den letztgenannten Schwerpunkt wird im Weiteren eingegangen. Im Laufe der Voruntersuchungen wurde ein Regelverfahren nach [Ind02] für

geschaltete Reluktanzmaschinen als viel versprechend identifiziert. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine direkte Drehmomentregelung, die aus dem Sollwert und dem gemessenen Winkel einen Stromsollwert mittels einer Look-Up-Tabelle (LUT) bestimmt. Dieser Strom wird dann von einem Hystereseregler gestellt. Entworfen wurde diese Regelung für eine herkömmliche geschaltete Reluktanzmaschine mit vier Phasen und einer Polkonfiguration von 16/12 (Statorzähne zu Rotorzähne). Als Prozessor diente dabei ein C167-Mikrocontroller von Infineon mit einer CPU-Taktfrequenz von 20 MHz. Da die Zahnzahlen der LEANTEC-Antriebe deutlich höher liegen, verkürzt sich damit auch die elektrische Periodendauer, welche sich aus der Drehzahl n_{mech} und der Polzahl p ergibt:

$$T_{el} = \frac{1}{p \cdot n_{mech}} \quad (3)$$

So ergibt sich beispielsweise für die Maschinenkonfiguration der ersten Demonstratorgeneration mit $p = 146$ Zähnen bei der geforderten Bemessungsdrehzahl von $n_{mech} = 435 \text{ min}^{-1}$ eine elektrische Periodendauer von $T_{el} = 945 \text{ } \mu\text{s}$. Rechnet man jetzt noch hinzu, dass eine Phase nur über ein Drittel dieser Periode bestromt werden kann, um eine sinnvolle Ausbeute von Drehmoment zu Strom zu erhalten, verkürzen sich die Bestromungsintervalle auf $315 \text{ } \mu\text{s}$. Um in diesen kurzen Zeitabschnitten eine dezidierte Stromkurvenform einprägen zu können, mit der letztlich ein Drehmoment mit kleiner Welligkeit gestellt werden soll, ist es offensichtlich, dass die Signalverarbeitung der Messgrößen möglichst unverzögert arbeiten muss. Deshalb wurde zu Projektstart entschieden die Regelung auf Basis eines FPGAs aufzubauen. Auf dieser sollte dann die einfache Regelungsstruktur nach [Ind02] seitens der BITSz implementiert werden. Nachteilig hat sich dabei herausgestellt, dass auf einem FPGA zwar eine sehr schnelle Signalverarbeitung erfolgen kann, jedoch die Speicherkapazitäten recht gering sind. Praktisch hieß das, dass die für die Regelung benötigten Look-Up-Tabellen auf externem RAM-Speicher hinterlegt werden mussten, dessen verhältnismäßig langsames Auslesen diese Steuerungslösung ausbremst.

Daher sollte seitens des ETIs nach weiteren Regelverfahren gesucht werden, die die Anforderungen des LEANTEC-Antriebs besser bedienen. Wünschenswert erschien dabei ein pulsweitenmoduliertes Verfahren (PWM-Verfahren) anzustreben, da dieses durch seine feste Schaltfrequenz einige Vorteile gegenüber den variierenden Schaltfrequenzen der Hystereseregulation bietet. So lassen sich zum einen über die festen Schaltfrequenzen gezielt die Schaltverluste des Umrichters bestimmen, was eine bessere Auslegung der Schaltelemente bzw. deren Kühlleistung ermöglicht. Zum anderen liegt bei einer festen Schaltfrequenz ein definiertes Oberschwingungsspektrum vor, was für dahingehende Untersuchungen eine Grundlage schafft. Weiterhin sollte ein alternatives Regelverfahren der Problematik der Phasenkommutierung begegnen. Bei der Kommutierung wird das geforderte Drehmoment von einer Phase auf die nächste übergeben. Dabei müssen innerhalb kürzester Zeit (wenige μs) Ströme von bis zu 400 A in der einen Phase abgebaut werden und in der nächsten aufgebaut werden. Bei diesem Vorgang ändert sich die jeweilige Phaseninduktivität sowohl durch ihre Abhängigkeit von der Winkelposition (Geometrieänderung des Luftspalts) als auch durch ihre Abhängigkeit vom Strom (Sättigung) um bis zu 400 %. Dass bei diesen hochdynamischen Vorgängen das Gesamtdrehmoment als Summe der von den Phasenströmen eingepprägten Phasendrehmomente nur schwer auf einen exakten Wert geregelt werden kann, ist offensichtlich.

Das Regelungsverfahren wurde zusammen mit dem zuvor erarbeiteten Maschinenmodell nach [Hil08] als Simulationsmodell in Matlab/Simulink aufgebaut und am Demonstrator Fahrtrieb erfolgreich in Betrieb genommen.

AP 2.5.3.1.4.8 Berechnung der dynamischen Antriebsverluste und Untersuchung des thermischen Verhaltens

Aus den vorhergehenden AP konnten die Motorverluste ermittelt werden. Nachfolgende Tabelle 6 gibt eine Übersicht.

Tabelle 6: Berechnete Verluste des Demonstrators Extruder V2 bei $M = 1000 \text{ Nm}$ und $n = 400 \text{ min}^{-1}$

P_{VCu} in W	$P_{VFeStat}$ in W	P_{VFeRot} in W	$P_{VTrStat}$ in W	P_{VTrRot} in W	P_{Vges} in W
2095	3318	432	300	1823	7968

Mit diesen Werten kann das auf den neuen Motor angepasste Wärmenetz gespeist werden. In Abbildung 15 ist der ermittelte Erwärmungsverlauf für ausgewählte Motorpunkte dargestellt.

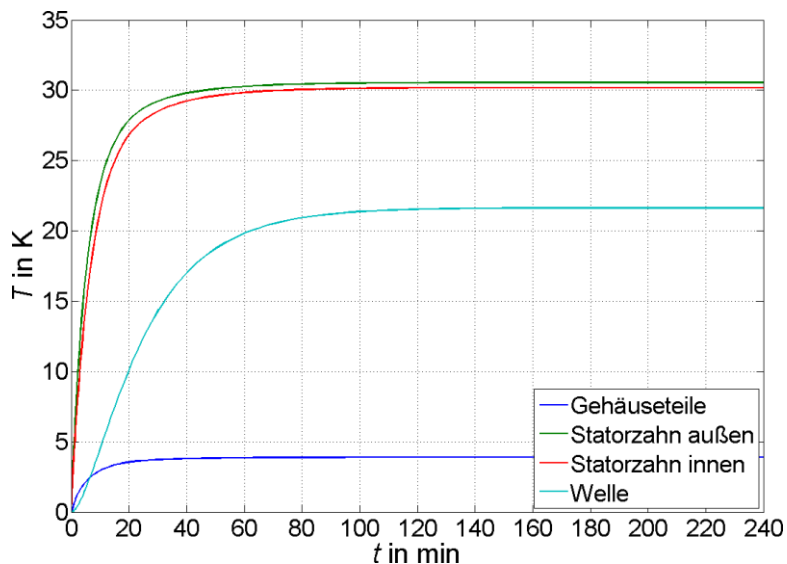


Abbildung 15: Simulierter Zeitverlauf der Erwärmung des Demonstrators Extruder V2 bei $M = 1000 \text{ Nm}$ und $n = 400 \text{ min}^{-1}$ bei Wasservorlauf­temperatur $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$ und paralleler Stator- und Wicklungskühlung

Mit dem projektierten Kühlsystem sind am Bemessungspunkt keine kritischen Temperaturen zu erwarten. Die Temperaturdifferenz zwischen Welle und Gehäuse verdient besondere Aufmerksamkeit, da es durch die daraus folgenden Dehnungsunterschiede zu Engpässen im Luftspalt kommen kann. Aus diesem Grund ist auch die Luftspaltkühlung vorgesehen, um die Temperatur der Welle niedrig zu halten.

AP 2.5.3.1.4.9 Auswertung und Überprüfung

Die Ergebnisse aus den AP 2.5.3.1.4.1 bis 2.5.3.1.4.8 wurden ausgewertet und mit den Vorgaben aus dem Lastenheft verglichen. Iterativ wurde eine erneute Anpassung der Geometrie, der Wicklung und der Kühlung notwendig. D.h., die o. g. AP mussten mehrfach durchlaufen werden, bis alle Ergebnisse eine funktionstüchtige und dem Lastenheft entsprechende Maschine ergaben. Dazu wurden gemeinsam mit den Partnern sinnvolle Abbruchkriterien definiert, z. B.: Begrenzung der Überlastdauer auf eine Minute (Anfahrprozess bei der Extrusion). Als Resultat erhält man eine Auslegung, die die Forderungen entsprechend dem Lastenheft theoretisch erbringt, aber noch keine

optimierte Maschine. Eine tatsächliche Überprüfung ist erst auf dem Prüfstand mit der tatsächlich gebauten Maschine möglich. Das war bis zum Abschluss des Projektes aber nicht mehr rechtzeitig möglich.

AP 2.5.3.1.4.10 Anpassung der Regelungsstrategie

Ein passendes Regelungsverfahren wurde mit einer prädiktiven, PWM-basierten Drehmomentregelung nach [Fue07] ausgemacht. Dieses Verfahren konzentriert sich nicht auf die Regelung der Phasenströme, sondern auf die Regelung der Phasenflussverkettungen Ψ . Denn aus der Spannungsgleichung

$$u = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (4)$$

ergibt sich nach Übergang vom Differentialquotienten zum Differenzenquotienten:

$$\Delta\Psi = (u - R \cdot i) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Das bedeutet, dass sich eine Änderung der Flussverkettung über den Mittelwert der Phasenspannung abzüglich des Ohmschen Spannungsabfalls stellen lässt. Damit lassen sich die Duty Cycles d_{ph} (mit $ph \in \{a,b,c\}$) der PWM unter Vernachlässigung der Ohmschen Verluste aus der Änderung der Phasenflussverkettung, der Zwischenkreisspannung U_{zk} und der Pulsperiodendauer T_{puls} berechnen:

$$d_{ph} = \frac{T_{on}}{T_{puls}} = \frac{\Delta\Psi}{U_{zk} \cdot T_{puls}} \quad (6)$$

Als prädiktives Verfahren berechnet [Fue07] die mit der zur Verfügung stehenden Zwischenkreisspannung während einer Pulsperiode erreichbare Phasenflussverkettung

$$\Psi(k+1) = \Psi(k) \pm \Delta\Psi \quad (7)$$

vorausgesetzt ($d_{ph}=1$ bzw. $d_{ph}=-1$), womit sich unter der Kenntnis des Drehmoments $M(\varphi, \Psi)$ als Funktion von Winkelposition φ und eben dieser Phasenflussverkettung die Grenzen des erreichbaren Drehmoments ergeben. Bei Kenntnis dieser Grenzen teilt [Fue07] das geforderte Sollmoment dann auf die einzelnen Phasen auf und erreicht so auch während der Phasenkommutierung zumindest für die Zeitpunkte Pulsperiodenstart/-ende ein „genau“ geregeltes Drehmoment.

Das für den LEANTEC-Antrieb abgeleitete Verfahren verzichtet aus Komplexitätsgründen auf die Prädiktion des Drehmomentes und schätzt lediglich für die Bestimmung des Sollwertes der Phasenflussverkettung die Werte für Winkelposition und Phasenstrom ab. Für die Abschätzung des Winkels wird die Drehzahl als konstant angenommen, so dass sich die Winkel aus

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega \cdot T_{puls} \quad \text{bzw.} \quad \varphi(k+2) = \varphi(k) + 2 \cdot \omega \cdot T_{puls} \quad (8)$$

ergeben. Dabei ist $\omega = 2 \cdot p \cdot \pi n_{\text{mech}}$. Die Abschätzung des Stroms erfolgt über:

$$i(k+1) = i(k) + d_{ph}(k) \cdot T_{puls} \cdot \frac{U_{zk}}{L_{\text{mittel}}} \quad (9)$$

Die Induktivität L_{mittel} ist dabei ein mittlerer Wert, der während der Phasenkommutierung gilt.

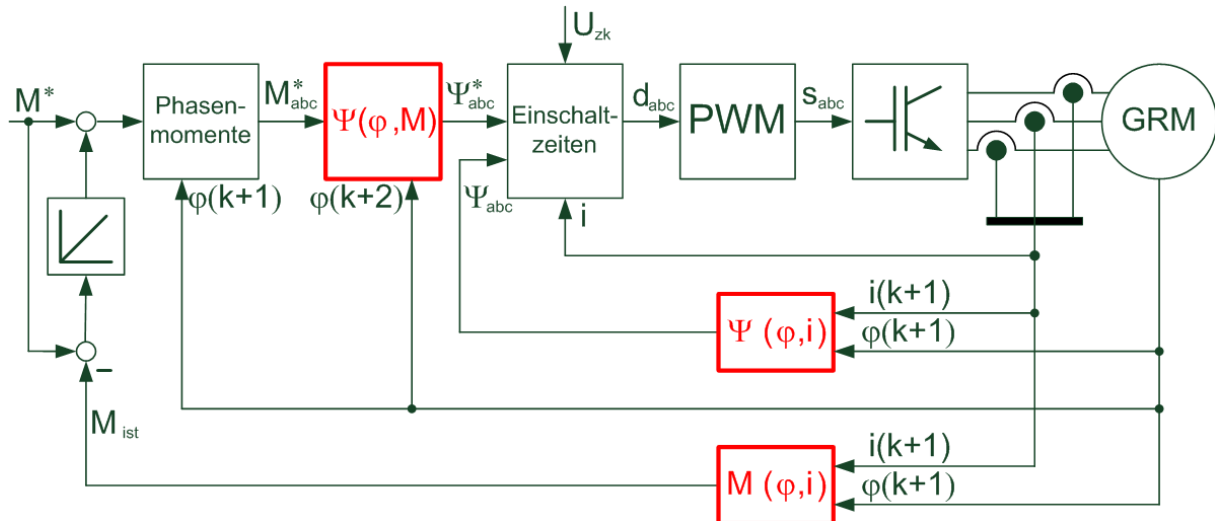


Abbildung 16: Signalflussplan der LEANTEC-Regelung

Abbildung 16 zeigt den Signalflussplan der Regelung. Die rot eingefärbten Blöcke im Signalflussplan stellen die LUTs dar, welche im externen RAM-Speicher abgelegt sind. Der Sollwert des Drehmomentes M^* wird zunächst mit dem im Rückwärtszweig aus einer LUT bestimmten Ist-Wert verglichen und die Differenz wird über einen Integrator wiederum dem Sollwert zugeschlagen. Das soll eine stationäre Genauigkeit des Drehmomentes gewährleisten. Das Ergebnis wird dann im Block „Phasenmomente“ entsprechend des Betriebsquadranten abhängig von Lagewinkel φ auf die drei Phasen A, B und C aufgeteilt. Aus den Sollwerten für die Phasenmomente M_{abc}^* werden über die LUTs die Sollwerte der Phasenflussverkettungen bestimmt und aus diesen die Duty Cycles für die PWM. Zur Veranschaulichung der zeitlichen Abfolge soll Abbildung 16 dienen. Die Messwerte werden zum Zeitpunkt k aufgenommen. In der Pulsperiode von k bis $k+1$ finden die Berechnungen der Duty Cycles für die Pulsperiode statt, die mit $k+1$ beginnt und mit $k+2$ endet. Daher sind als Sollwerte für die Phasenflussverkettung zum Zeitpunkt $k+2$ zu bestimmen. Da die zu berechnende Pulsperiode mit $k+1$ beginnt, werden als Istwerte für die Phasenflussverkettungen und Phasendrehmomente die Werte zum Zeitpunkt $k+1$ vorausberechnet.

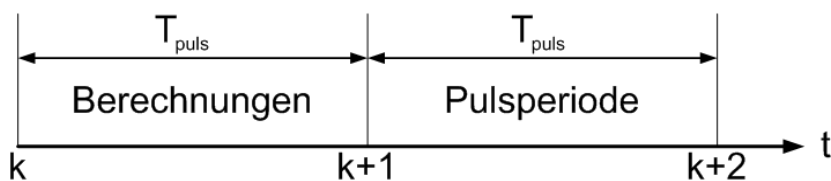


Abbildung 17: Zeitliche Abfolge der PWM

AP 2.5.3.1.4.11 Portierung der angepassten Regelungsalgorithmen auf den Antrieb

Nach der Simulation schloss sich die Aufgabe der Portierung der Regelung von der Simulation auf die Umrichterhardware an. Weil die Umrichtersteuerung FPGA-basiert ist, musste die Implementierung in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL erfolgen. Da diese Sprache in ihren zeitlichen Abläufen recht schwierig handzuhaben ist (Code-Abarbeitung erfolgt nicht sequentiell wie z.B. im C/C++ sondern parallel), wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Regelung mittels Code-Generator zu portieren. Als Lösung wurde die Matlab-Toolbox „HDL-Coder“ gefunden, die aus den Simulink-

Modellblöcken den VHDL-Code für das Zielsystem erzeugt. Dazu waren noch einige Vorarbeiten zu leisten: Da VHDL keine Gleitkommaarithmetik unterstützt, wie das Hochsprachen wie C/C++ tun, musste zunächst das gesamte Modell auf Festkommaarithmetik umgestellt werden. Dabei mussten sinnvolle Zahlenformate identifiziert werden (Bitbreiten der Signale, Wertebereiche dürfen nicht zu Zahlenüberläufen führen), wozu die Matlab-Toolbox „Fixed-Point Designer“ benötigt wurde. Weiterhin mussten in Abstimmung mit dem Partner BITSz Schnittstellensignale definiert werden, bei denen es ebenfalls galt, Signalformate einzuhalten, um die Einbettung in die Umrichter-Firmware zu ermöglichen. Schließlich wurden auch die einzelnen Reglungsböcke in VHDL mittels Software-in-the-Loop-Simulationen Funktionstests unterzogen. Benötigt wurde dafür eine weitere Toolbox: „HDL Verifier“. Hardware-in-the-Loop-Simulationen konnten leider nicht vollzogen werden, da die verwendete Hardware nicht unterstützt wird. Somit wurden die einzelnen Regelungsblöcke im Zielsystem zusammengeführt und direkt am Antrieb in Betrieb genommen. Dafür wurde am ETI auf einem Prüfstand der Demonstrator Fahrtrieb genutzt.

AP 2.5.3.1.5.1 Statische Kraftmessung verschiedener Geometrien und elektrischer Aktivteilmaterialien

Der Linearversuchsstand wurde u.a. entwickelt, um die statischen Kräfte mit der FEM vergleichen zu können. Aufgrund einer unerwartet hohen Reibung der Führungsschiene waren die durchgeführten Messungen leider nicht aussagekräftig. Die Ertüchtigung des Versuchsstandes zur Messung der Kraft ist gegenwärtig Aufgabe am Lehrstuhl.

AP 2.5.3.1.5.2 Dynamische Verlustmessung verschiedener Geometrien, Aktivteilmaterialien und Trägermaterialien

Der Linearversuchsstand eignete sich trotzdem für Verlustmessungen, da dafür der Rotor nicht bewegt werden muss. Außerdem wurden dynamische Verlustmessungen an einer statisch fixierten Phase mit verschiedenen Rotorstrukturen vorgenommen (vergl. TP1.5-Abschlussbericht).

AP 2.5.3.1.6 Montage

Die statischen Phasendrehmomente wurden am fertig montierten Motor aus den gemessenen Spannungs-Strom-Zeit-Verläufen berechnet (siehe Abbildung 8). Dabei zeigte sich eine deutliche Sensibilität des Drehmomentes auf die Fertigungstoleranzen und Materialschwankungen.

Nach der Montage des neuen Demonstrators Extruder Version 2 wurden bei der BITSz in Zwickau Messungen durchgeführt, die in den folgenden AP näher beschrieben werden. Da die Lastmaschine am dortigen Versuchsstand aber nur einen kleinen Teil des Leistungsspektrums des neuen Motors abdecken kann und es zudem zu mechanischen Problemen kam, konnten Messergebnisse nur in beschränktem Umfang gewonnen werden. Eine Validierung der erstellten Modelle und Tools ist somit zunächst nicht ohne weiteres bzw. nur in eingeschränktem Umfang möglich.

AP 2.5.3.1.7.1 Funktionstest des gefertigten Demonstrators Extruder Version 2

Der Motor wurde zunächst auf einem Maschinenprüfstand bei der BITSz in Zwickau aufgespannt. Der erste Funktionstest, bestehend aus Leerlauf- und Schleppmessungen, ergab keine Probleme. Der Prüfstand ist in der Abbildung 18 dargestellt.

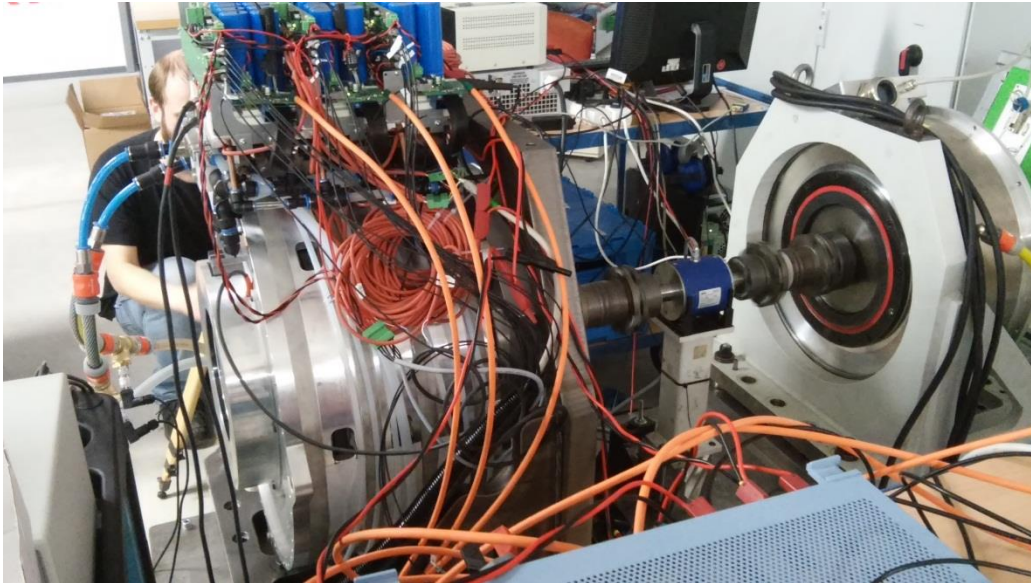


Abbildung 18: Inbetriebnahmeaufbau des Extruders V2; Der Prüfling befindet sich auf der linken Seite

AP 2.5.3.1.7.2 Inbetriebnahme des Demonstrators Extruder Version 2

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden zusätzlich zu den Leerlauf- und Schleppverlusten noch Belastungsmessungen bis zu einem Drehmoment von $M = 300 \text{ Nm}$ durchgeführt. Es kam dabei zum dauerhaften Schleifen des Rotors.

Bei einer Vor-Ort-Demontage des Motors wurde festgestellt, dass Teile des Pulververbundmaterials der Stator-SMC-Zähne ausgebrochen waren und sich im Luftspalt festgesetzt hatten. Dieser wurde dadurch mechanisch dauerhaft blockiert. Die dadurch entstandenen Schleifspuren zeigt Abbildung 19.

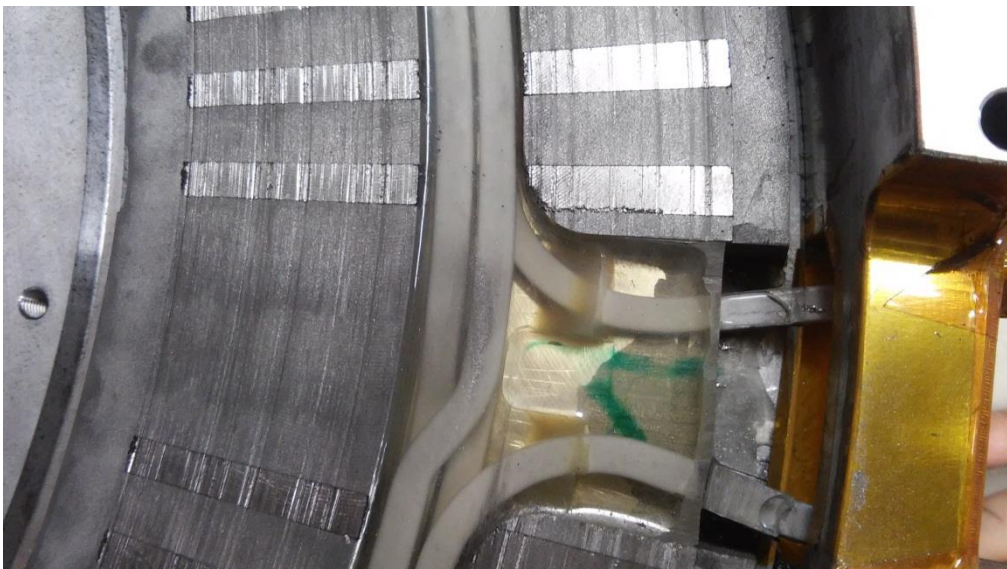


Abbildung 19: Schleifspuren auf den Statorzähnen, Blick auf die Wicklungsausleitung

Nach einer Reinigung wurde der Motor wieder montiert und läuft seitdem ohne Probleme. Der Effekt des Zahnausbrechens ist der Konstruktion des Motors mit überstehenden Zähnen geschuldet und konnte als solcher nicht vorausgesehen werden.

AP 2.5.3.1.8.1 Kennfeld- und Dauerbetriebsmessungen

Die eigentlichen Kennfeldmessungen fanden bei der BITSz in Zwickau statt. Eine Belastung war aufgrund der Limitierung des Versuchsstandes zunächst nur bis $M = 300 \text{ Nm}$ möglich. Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Schleppmessungen bei $n = (50, 100, \dots, 400) \text{ min}^{-1}$,
- Leerlaufmessungen bei $n = (50, 100, \dots, 400) \text{ min}^{-1}$,
- Lastmessungen bei $n = (50, 100, \dots, 400) \text{ min}^{-1}$ und $M = (50, 100, \dots, 300) \text{ Nm}$.

Schleppmessungen

Ziel der Schleppmessungen ist die Bestimmung der Reibverluste des LEANTEC-Motors. Die ermittelten Ergebnisse sind in Abb. 20 grafisch dargestellt.

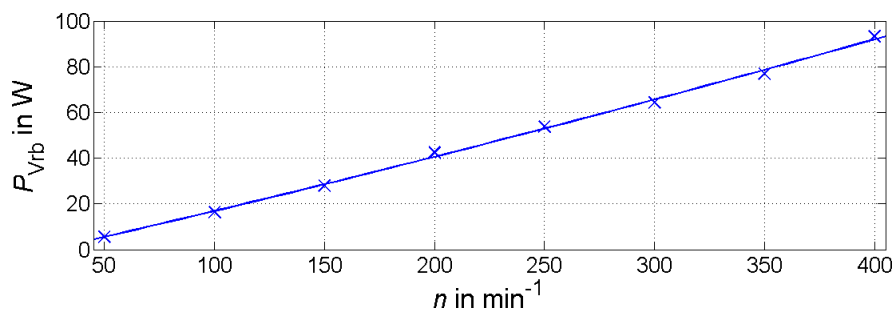


Abbildung 20: Reibverluste des Demonstrator Extruder V2

Leerlaufversuche

Bei Leerlaufmessungen läuft der Antrieb ohne mechanische Belastung. Es können dabei Rückschlüsse auf lastunabhängige Verlustanteile (z. B. Ummagnetisierungsverluste, Reibungsverluste und Zusatzverluste) gezogen werden. In Abb. 21 sind die gemessenen Gesamtverluste dargestellt. Da bei Leerlauf nur geringe Stromstärken in den Leitern auftreten, setzen sich diese Verluste vorrangig aus Eisen- und Zusatzverlusten sowie den oben ermittelten Reibungsverlusten zusammen.

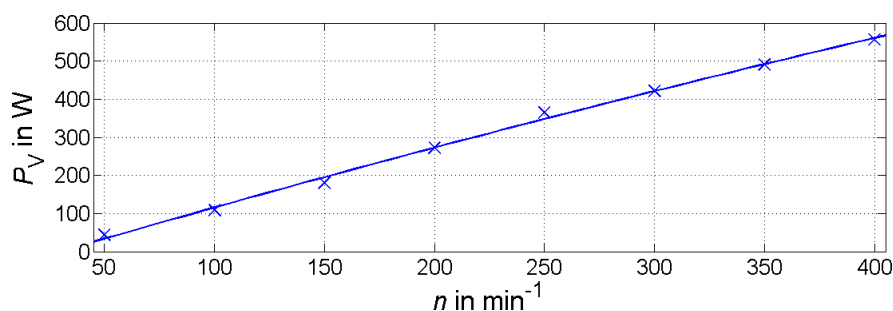


Abbildung 21: Gesamtverlustleistung des Demonstrator Extruder V2 bei Leerlauf

Belastungsmessungen

Der LEANTEC-Motor wird durch die Lastmaschine belastet. Für die verschiedenen gemessenen Arbeitspunkte lassen sich die in Abb. 22 dargestellten Gesamtverluste ermitteln.

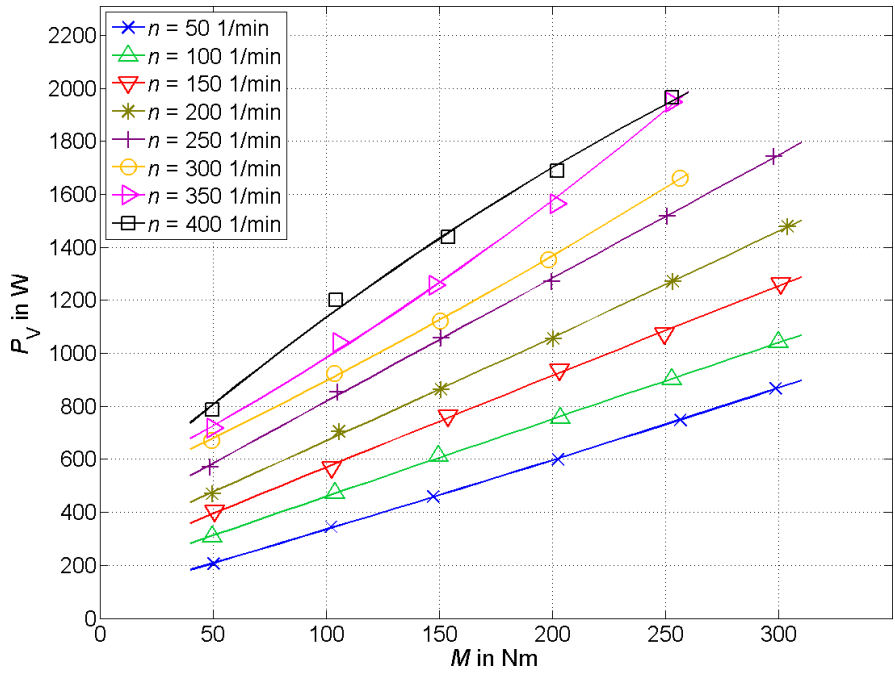


Abbildung 22: Gesamtverlustleistung des Demonstrator Extruder V2 bei Belastung

Der gemessene Verlauf entspricht den Erwartungen. Abbildung 23 zeigt den Verlauf der aus den gemessenen Stromkurven berechneten Kupferverluste. Diese sind nahezu drehzahlunabhängig und tragen zudem nur zu einem kleineren Teil zu den Gesamtverlusten bei.

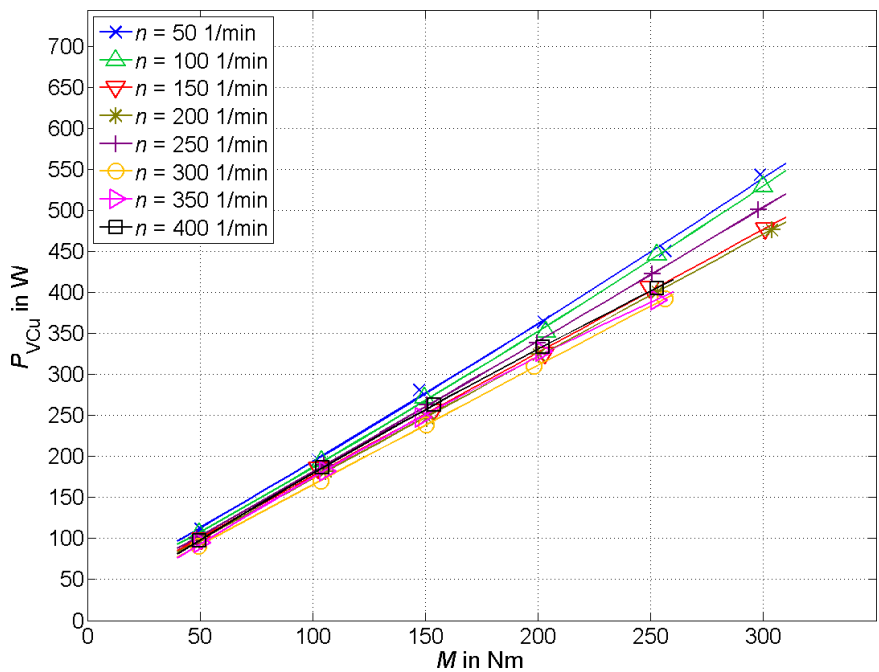


Abbildung 23: Berechnete Kupferverluste des Demonstrator Extruder V2 bei Belastung

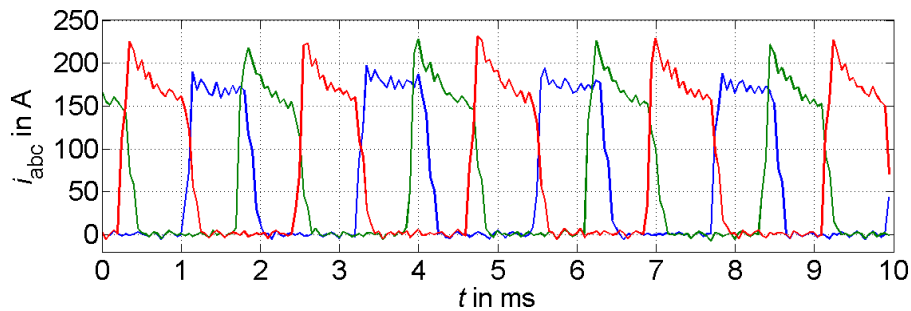


Abbildung 24: Stromverläufe bei Belastung mit $n = 300 \text{ min}^{-1}$ und $M = 300 \text{ Nm}$; blau: Phase A; grün: Phase B; rot: Phase C

Beispielhaft sind in Abbildung 24 die gemessenen Verläufe der Phasenströme für einen Belastungspunkt dargestellt. Die Differenz aus Gesamtverlustleistung und Kupfer-/Reibungsverlusten bilden die Eisen- und Zusatzverluste. Deren Verläufe sind in Abbildung 25 dargestellt.

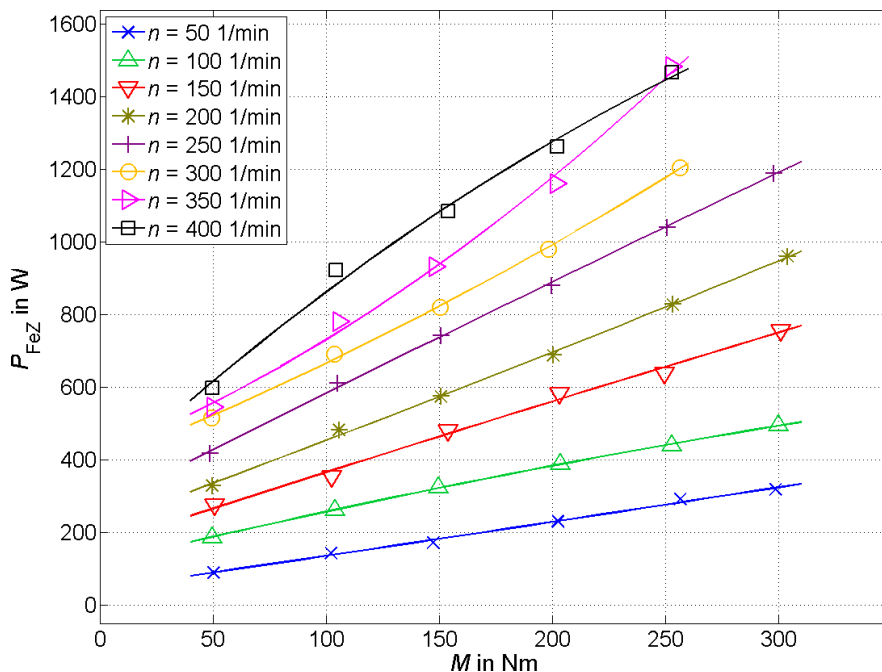


Abbildung 25: Eisen- und Zusatzverluste des Demonstrator Extruder V2 bei Belastung

Hier ist eine deutliche Lastabhängigkeit zu beobachten. Zusätzlich wurden stets die Temperaturen des Motors über eine Thermokamera aufgezeichnet. Es kam dabei nicht zu Auffälligkeiten.

Sonstige Messungen

Mit einem Durchflussmengenmesser wurde der Volumenstrom des Kühlmittels des gesamten Antriebs gemessen. Durch die Reihenschaltung aus Umrichter und Motor fließen insgesamt $Q = 13 \text{ l/min}$ bei einem Druckverlust von $\Delta p = 1,3 \text{ bar}$. Der Druck wurde dabei sowohl im Vor- als auch im Rücklauf so nah wie möglich an den Kühlan schlüssen des Antriebes gemessen. Die gemessenen Werte decken sich gut mit den über ein Strömungsnetzwerk vorausgerechneten Werten.

AP 2.5.3.1.8.2 Aus- und Bewertung der Messreihen

Wichtiges Kriterium zur Bewertung der Messergebnisse ist der ermittelte motorische Wirkungsgrad (Abbildung 26) aus dem Quotienten aus mechanisch abgegebener und elektrisch aufgenommener

Wirkleistung. Es zeigt sich hier deutlich, dass der Wirkungsgrad mit der Belastung steigt und bereits bei Teillast Werte von bis zu 84 % erreichen kann. Es ist zu erwarten, dass bei größeren Drehmomenten auch ein größerer Wirkungsgrad erzielt werden kann, mit einem Maximum in der Nähe des Bemessungspunktes von $M = 1000 \text{ Nm}$ und $n = 400 \text{ min}^{-1}$. Das deckt sich mit den ursprünglichen Erwartungen zum Betriebsverhalten des Motors.

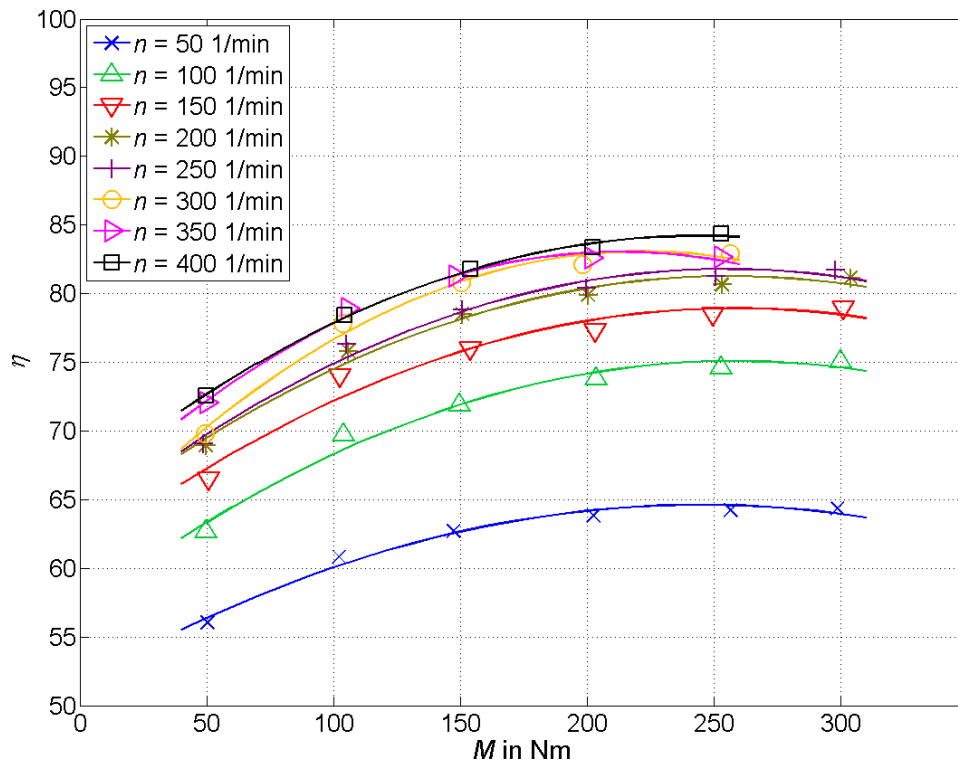


Abbildung 26: Wirkungsgrad des Demonstrator Extruder V2 bei Belastung

AP 2.5.3.1.8.3.1 Elektrische und magnetische Aktivbauteile

Die im AP 2.5.3.1.4 erstellten bzw. ertüchtigten Modelle und Tools wurden gemeinsam mit dem Partnern IVMA, SAMAG und Schmuhl zu einer simulationsunterstützten Gestaltungsrichtlinie zusammengeführt, erprobt und die Anforderungen an die Komponenten wurden ermittelt.

Beispielsweise wird aus mechanischen Gründen eine minimale Stegbreite zwischen benachbarten Statorsegmenten von 4,5 mm benötigt und das maximale Dickenverhältnis der Statorelemente darf 2:1 nicht übersteigen.

AP 2.5.3.1.8.3.2 Auslegung elektrischer und magnetischer Aktivbauteile

Durch die Anforderungsdefinitionen aus Lasten- und Pflichtenheft sowie den möglichen Randbedingungen aus der Fertigung (Toleranzen, Technologie) ergeben sich Vorgaben für Dimensionierung, Bemessung und Gestaltung der aktiven Komponenten. Diese Vorgaben müssen permanent mit den Anforderungen nach AP 2.5.3.1.8.3.1 verglichen und notfalls iterativ verbessert werden.

Beispielsweise können die benachbarten Rotorscheiben zweier Phasen mit einer minimalen Toleranz von $0,1^\circ$ mechanisch zueinander ausgerichtet werden. Wenn die elektrische Positionierung mit 10° el. genau sein muss (aus Gründen der Regelung), ergibt sich daraus, dass eine Polpaarzahl größer als $p = 100$ nicht realisiert werden kann.

AP 2.5.3.1.8.3.3 Herstellung elektrischer und magnetischer Aktivbauteile

Von den Herstellern wurde als wesentliche begrenzende Größe der Durchmesser der Maschine vorgegeben. Ein größerer Durchmesser wirkt sich zwar unmittelbar positiv auf das erreichbare maximale Drehmoment aus, die bereits vorhandenen Werkzeuge zur Fertigung des Rotors begrenzen aber den maximal herstellbaren Durchmesser auf ca. 0,6 m. Der Durchmesser wird ebenfalls durch die Länge der Wicklung begrenzt. Das dazu verwendete Kupferhohlprofil kann maximal in einer Länge von 7 m hergestellt und verarbeitet werden, was bei vier Windungen einen mittleren Windungsdurchmesser von ca. 0,5 m ergibt.

Die maximale Polzahl, von der das Drehmoment abhängt, ist ebenfalls begrenzt. Als limitierender Faktor ist hier die mechanische Stabilität des Stators zu nennen, die bei Aufbringen zu vieler, schmaler Pole leiden würde. Zudem hängt von der Polzahl die Grundschwingungsfrequenz des Stromes ab, die wesentlich die Verluste in der Maschine beeinflusst. Ein geringerer Wert ist hier zu bevorzugen.

Größere Radien am Nutgrund wären aus Sicht der Verluste und der mechanischen Stabilität und Herstellbarkeit vorteilhafter, aber die Geometrie der Leiter ermöglicht nur sehr kleine Radien.

Seitens des Umrichterherstellers wurde der maximale Phasenstrom (400 A) vorgegeben, der das mit dem Motor erreichbare maximale Drehmoment begrenzt. Dieser wird durch die verwendeten Halbleiterbauelemente und die bauliche Größe des Umrichters begrenzt.

3 Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten im Teilprojekt 2.3 waren die Personalkosten für den wissenschaftlichen Mitarbeiter nach der Gehaltsgruppe TV-L-Ost E13 und für die wissenschaftlichen/studentischen Hilfskräfte (Summe 464.005,84 €). Der Posten für Geräte über 410 € stellt mit 14.821,82 € den zweithöchsten Betrag dar, gefolgt von den Aufträgen mit (9.644,93 €). Mit Hilfe der Aufträge wurden hauptsächlich Materialproben hergestellt, Messungen zur Materialkennwertermittlung der magnetischen Aktivteile durchgeführt sowie ein Werkvertrag zur Erstellung eines Reluktanznetzwerks zur Berechnung von Transversalflussreluktanzmaschinen abgeschlossen. Die sonstigen Aufwendungen fielen unter die Posten für Geräte unter 410 € und Dienstreisen (Summe 2.996,31 €).

Die Erhöhung der lauffähigen LEANTEC-Antriebe in der Aufstockungsphase auf drei Stück erforderte auch einen erhöhten Aufwand an Sensoren zur Messung von Druck, Temperatur und Durchflussmenge in den einzelnen Kühlkreisläufen. Da die drei Antriebe parallel und an verschiedenen Orten (TU Dresden, TU Ilmenau und BITS Zwickau) betrieben wurden, war die Beschaffung von zwei Stück zusätzlichen Druckaufnehmern und Mantelthermoelementen im Wert von ca. 700 EUR notwendig. Durch die Ausrüstung der LEANTEC-Motoren mit den o. g. Sensoren waren eine Verifizierung der thermischen Berechnungsmodelle für die LEANTEC-Architektur und somit auch ein Beitrag zur Sicherung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit der LEANTEC-Technologie nach der Förderphase möglich. Die damit verbundene Überziehung der Position „Gegenstände bis 410 EUR“ um rund 44 % (!) ließ sich aus den anderen Positionen decken, so dass der Finanzplan insgesamt eingehalten werden konnte.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im TP 2.3 erbrachte Arbeit stellt einen wesentlichen Beitrag innerhalb des Wachstumskerns LEANTEC dar. Es wurden wichtige Modelle zur Auslegung von Motoren entwickelt, die die im Teilprojekt 1.5 erstellen Modelle und Simulationen inkorporieren. Zudem wurden durch umfangreiche Messungen an verschiedensten Prüflingen wichtige Erkenntnisse für zukünftige Motorgenerationen gewonnen.

In der Verlängerungsphase wurde mit der elektromagnetischen Auslegung des Demonstrators Extruder Version 2 ein wesentlicher Beitrag zu einem erfolgreichen Projektabschluss innerhalb des Wachstumskerns geleistet.

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.

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 (TRM), 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 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit gab es zwei Veröffentlichungen [Bar13], [Doe13] sowie eine Patentanmeldung, die sich zurzeit (Stand Juni 2015) noch in der Prüfungsphase befindet [Pat13].

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
- [Doe13] J. Döring, 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
- [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
- [Ind02] R. B. Inderka, „ Direkte Drehmomentregelung geschalteter Reluktanzantriebe“, Aachen: Shaker Verlag, 2002.
- [Fue07] N.H. Fuengwarodsakul: Dynamic Torque Control for Switched Reluctance Drives based on a new Online Machine Model, EPE, Dresden, 2005.
- [Hil08] M. Hiller: Dynamische Drehmomentregelung eines Geschalteten Reluktanzantriebs auf Basis eines Echtzeitmodells, Aachen: Shaker Verlag, 2008.
- [Tel98] J. Tellinen: A Simple Scalar Model Of Magnetic Hysteresis, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 4, pp. 2200–2206, July 1998.

III Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage

IV Kurzfassung - Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Nicht geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Abschlussbericht VP2 „Entwicklung Referenzantrieb“ Teilprojekt 2.3 – Auslegung, Optimierung und Prüftechnik		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Jenßen, Eike; 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	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution TB 04/2015	10. Förderkennzeichen 03WKBY02C
	11. Seitenzahl 46	
	13. Literaturangaben 32	
14. Tabellen 6		15. Abbildungen 26
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		

18. Kurzfassung

Wesentliches Ziel des Teilprojekts 2.3 war die Entwicklung eines theoretischen Modells zur Beschreibung des gesamten LEANTEC-Antriebes. Das umfasst sowohl die Modellierung des Motors als auch die Entwicklung einer Regelungsstrategie, die den besonderen Anforderungen und Schwierigkeiten des Transversalfluss-Reluktanzprinzips gerecht wird.

Die im Teilprojekt 1.5 entwickelten Werkzeuge werden für das TP 2.3 verallgemeinert, um zusätzliche Modelle zur Regelung ergänzt, und zu einem Auslegungsprogramm zusammengefasst. Mit diesem Programm ist die Auslegung beliebiger Antriebe in einem iterativen Prozess, bestehend aus analytischen und numerischen Berechnungen, möglich. Zusätzlich werden Optimierungsmöglichkeiten für die Motoren aufgezeigt und die theoretischen Erkenntnisse an einem Prüfling durch umfangreiche Messungen validiert.

Im Ergebnis der Messungen konnten Probleme am Motor, insbesondere die Maßhaltigkeit des Luftspaltes und die Erwärmung betreffend, identifiziert werden. Es wurden Vorschläge erarbeitet, diese Probleme zu lösen. Beispielhaft wurde die Rotorscheibe so verändert, dass tangentiale Wirbelstrombahnen unterbrochen werden, was zu einer deutlichen Verringerung der Erwärmung und zu einer Steigerung des Wirkungsgrades geführt hat.

Das Teilprojekt 2.3 hat damit zu einer weiteren Optimierung des LEANTEC-Antriebes beigetragen.

19. Schlagwörter

LEANTEC, Antrieb, Elektromotor, Elektrische Maschine, Transversalfluss, Reluktanz, Transversalfluss-Reluktanzmaschine, TFRM, Regelung, Messungen, Wachstumskern, Unternehmen Region, Direktantrieb, Torque-Motor, Extruderantrieb, Scheibenläufer, Rotorscheibe

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 2 – “Development reference drive” Sub-project 2.3 – Design, optimization and test engineering	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Jenßen, Eike; 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 04/2015
	10. reference no. 03WBKY02C
	11. no. of pages 46
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 32
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 26
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	

18. abstract

Major goal of sub-project 2.3 was the development of theoretical model that describes the LEANTEC-drive. This includes modelling of the motor itself as well as the development of a control strategy which can handle the special demands and difficulties coming with the transverse flux reluctance principle.

Tools developed with sub-project 1.5 were further generalized, complemented with additional control models, and summarized into a design program. With this program, it is possible to design arbitrary drives in an iterative process consisting of analytical and numerical calculations. Additionally, optimization potentials are shown and theoretical findings are validated by extensive measurements on a built motor.

As a result of the measurements motor problems, especially concerning air gap width and temperature rise, were identified. Various suggestions were made to solve those problems. Exemplary, the rotor disc was changed in a way that tangential eddy current paths were separated, which led to a distinct reduction of temperature rise in the machine and to an increase in motor efficiency. Sub-project 2.3 contributed to a further optimization of the LEANTEC-drive.

19. keywords

LEANTEC, drive, electric motor, electrical machine, transverse flux, reluctance, transverse flux reluctance machine, TFRM, control, measurements, direct drive, torque motor, extruder drive, disc type rotor

20. publisher

-

21. price

-