



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



LEANTEC ANTRIEB

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Elektrotechnisches Institut, Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Abschlussbericht VP3 – Teilprojekt 3.5
Technische Universität Dresden
Elektrotechnisches Institut
Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Förderkennzeichen: 03WKBY03E
Förderzeitraum: 01.03.2011 bis 31.12.2014

Inhalt

I	Allgemeine Angaben.....	3
1	Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens.....	3
2	Voraussetzungen	3
3	Planung und Ablauf	4
4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	5
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
II	Eingehende Darstellung	13
1	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)	13
1.1	AP 3.1 Antriebssystem für Rundtischantrieb	13
1.1.1	AP 3.1.1 Anwendungsspezifikation Rundtischantrieb.....	13
1.1.2	AP 3.1.2 Systementwicklung und Herstellung des Rundtischantriebs.....	13
1.1.3	AP 3.1.3 Erprobung und Optimierung des Rundtischantriebs	16
1.2	AP 3.2 Antriebssystem für magnetische Spannvorrichtung.....	17
1.2.1	AP 3.2.1 Anwendungsspezifikation magnetische Spannvorrichtung.....	17
1.2.2	AP 3.2.2 Systementwicklung und Herstellung des magnetische Spannvorrichtung.	17
1.2.3	AP 3.2.3 Erprobung und Optimierung der magnetische Spannvorrichtung	18
1.3	AP 3.3 Antriebssystem für Extruder	19
1.3.1	AP 3.3.1 Anwendungsspezifikation Extruder	19
1.3.2	AP 3.3.2 Systementwicklung und Herstellung des Extruders.....	19
1.3.3	AP 3.3.3 Erprobung und Optimierung des Extruders	20
1.4	AP 3.4 Antriebssystem für Radlader.....	21
1.4.1	AP 3.4.1 Anwendungsspezifikation Radlader	21
1.4.2	AP 3.4.2 Systementwicklung und Herstellung des Antriebssystems Radlader	21
1.4.3	AP 3.4.3 Erprobung und Optimierung des Antriebssystems Radlader.....	22
1.5	Zusammenfassung.....	27
1.6	AP 3.6 Vorstandstätigkeit und Regionalmanagement	29
2	Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (kostenneutrale Verlängerung).....	30
2.1	AP 3.5.6.1.1 Projektierungstools	30
2.2	AP 3.5.6.1.2 Normengerechte Erprobung und Dauerversuche.....	30
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	39

Literaturverzeichnis.....	40
III Erfolgskontrollbericht.....	41
IV Kurzfassung – Berichtsblatt.....	42
V Document Control Sheet.....	44

I Allgemeine Angaben

1 Aufgabenstellung / Ziele des Vorhabens

Ziel des VP3 ist die Auslegung, Fertigung und Erprobung von vier Demonstratorantrieben für konkrete industrielle Anwendungen. Geplant sind:

- der Fahrtrieb eines Radladers (Radnahantrieb),
- der Antrieb eines Rundtisches zur Werkstückbearbeitung,
- der Antrieb eines magnetischen Spannmittels und
- der Antrieb der Schnecke eines Extruders für die Kunststoffverarbeitung.

Das ETI übernimmt dabei die Aufgabe der Ermittlung von Anforderungen an den Antrieb und die entsprechende elektromagnetische Auslegung für die jeweiligen Anwendungen. Die fertigen Antriebe werden im Rahmen einer Erprobung messtechnisch untersucht. Zur Ermittlung der Anforderungen für die Demonstratoren und den LEANTEC-Motor für die Erfüllung der jeweiligen Applikationseigenschaften können folgende Ziele postuliert werden:

- Vorgabe der Betriebsbereiche und Grenzwerte in Kombination mit elektromagnetisch relevanten und konstruktiv notwendigen Parametern,
- Analyse sinnvoller Motorskalierungen und zugehöriger Spezifikationen der zulässigen Drehmomentwelligkeit,
- Spezifizierung der mechanischen, kühltechnischen und elektrischen Schnittstellen,
- Entwurf und Realisierung entsprechender Schutzkonzepte für Schmutz- und Stoßbelastung,
- Konzipierung der benötigten Sensoren für die Rotorlage und von Maßnahmen bei einem Motor- bzw. Umrichter-ausfall, Abschätzung der Auswirkungen und
- Zusammenführung aller Einzelparameter und Optimierung der Auslegungsvariante.

In der sich anschließenden kostenneutralen Verlängerung können die in der ersten Phase aufgetretenen Probleme mit den vier Demonstratoren behoben werden und es kann danach eine vollständige Inbetriebnahme und Erprobung erfolgen. Damit wird unmittelbar eine Fortsetzung der Teilprojektaufgaben aus dem Erstantrag erreicht.

Die Ertüchtigung der Demonstratoren erfolgt auf der Basis eines vergrößerten Luftspaltes, um Ungewissheiten bzgl. der Wirkungen elektromagnetischer, thermischer und mechanischer Vorgänge begegnen und Toleranzketten besser ausgleichen zu können.

2 Voraussetzungen

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

Optimierung von hochpoligen Dauermagnetmotoren [Abs01], [Boc01], [Boc07]

In Zusammenarbeit mit der Firma Beldrive GmbH entstand ein Direktantriebssystem, basierend auf einem hochpoligen Dauermagnetmotor und Einzelzahnwicklung. Die Antriebstechnik, dessen Kern

der Dauermagnetmotor ist, wird eingesetzt für führerlose Transportsysteme in Fertigungsstätten der Automobilindustrie (VW, Škoda). Die Fa. Beldrive hat mit dem entwickelten Antriebssystem in den Jahren 1999 und 2007 den Innovationspreis des Landes Sachsen erhalten.

Grundlagenentwicklungen zu Hybridantrieben [Pau00], [Pau08], [Per99]

Für den Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs wurden von 1998-2003 spezielle permanenterregte Synchronmaschinen entwickelt, die eine stufenlose Leistungsverzweigung in Fahrzeugen erlauben, um den Verbrennungsmotor auf einer verbrauchsm minimalen Kennlinie zu fahren. Die Synchronmaschinen wurden mit einer besonderen Anordnung der Permanentmagnete gebaut, um den Reluktanzeffekt und damit das Verhältnis Drehmoment / Betriebsstrom zu optimieren [6].

Literatur

- [Abs01] Abschlussbericht zum Förderprojekt Elektrisches Direktantriebssystem Projekt Nr. (PT): 2909, TU Chemnitz 2001.
- [Boc01] Bochnia, D.; Paul, M.: „Optimierung permanenterregter Synchronmaschinen unter Verwendung der FEM und Evolutionsstrategien“, 5. Magdeburger Maschinenbautage 2001, Magdeburg, S. 109-117.
- [Boc07] Bochnia, D.: „Optimierung hochpoliger Dauermagnetmotoren unter Verwendung der Finiten Elemente Methode und der Evolutionsstrategie“, Dissertation TU Chemnitz 2002, Shaker Verlag 2007.
- [Pau00] Paul, M.; Hofmann, W.; Bochnia, D.: „Design of Permanent Magnet Motors for a Hybrid Electric Vehicle“. International Conference on Electrical Machines ICEM 2000 Helsinki Proceedings pp. 1535-1539.
- [Pau08] Paul, M.: „Elektromagnetische Energiewandler in stufenlosen Fahrzeugantrieben.“ Dissertation TU Chemnitz, 2008.
- [Per99] Permanentmagnetanordnung, vorzugsweise für Rotoren permanenterregter Synchronmaschinen. DE 199 42 000.9 (H 02 K 1/27), AT. : 02.09.1999; Anm: Paul, Hofmann; Erf. Gleich Anm.

3 Planung und Ablauf

Die Planung des TP 3.5 umfasste im ursprünglichen Antrag 39 Personenmonate für wissenschaftliche Mitarbeiter (WM) und 36 Personenmonate für wissenschaftliche Hilfskräfte (WHK). In der kostenneutralen Verlängerung von 10 Monaten wurden nochmals 4,2 Personenmonate WM und 1,0 Personenmonat für WHK bewilligt. Das Teilprojekt gliederte sich in vier Arbeitspakete aus dem ursprünglichen Antrag und zwei Arbeitspaketen aus der Kostenneutralen Verlängerung. 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 kostenneutrale Verlängerung. Die bewilligten Bundesmittel beliefen sich auf 223.372,60 Euro inklusive Projektpauschale. In den Tabellen 1 und 2 sind die Arbeitspakete des TP 3.5 und deren Aufwand (PM) innerhalb des Verbundprojektes 3 aufgelistet.

Tabelle 1: Arbeitspaketeplan des TP 3.5 aus dem Erstantrag

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1	Anwendungsspezifikation	WHK WM	2 4
3.1.2 3.2.2 3.3.2 3.4.2	Systementwicklung und Herstellung	WHK WM	17 18
3.1.3 3.2.3 3.3.3 3.4.3	Erprobung und Optimierung	WHK WM	17 14
3.6	Vorstandstätigkeit, Regionalmanagement	WM	3
Summe		WHK WM	39
		WHK	36

Tabelle 2: Arbeitspaketeplan des TP 3.5 aus der kostenneutralen Verlängerung

Arbeitspaket	Titel	Qualifikation	Aufwand (PM)
3.5.6.1.1	Projektierungstools	WHK WM	0 0,4
3.5.6.1.2	Normengerechte Erprobung Dauerversuche	WHK WM	1 3,8
Summe		WHK WM	4,2
		WHK	1

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Seit etwa einem halben Jahrzehnt wird in der Industrie der Einsatz von Direktantrieben stetig vorangetrieben. Wurden zuerst hochpolige Drehstrom-Asynchronmotoren gebaut mit teilweise mäßigen Gütekenngößen bzgl. Energieeffizienz, Überlastbarkeit und Drehmomentdichte, so hat das zunehmende Angebot von permanentmagneterregten Synchronmaschinen zu einem steigenden Einsatz dieser effizienteren und höher überlastbaren Torquemotoren geführt. Die Vorzüge von Torquemotoren gegenüber Getriebemotoren werden durchaus kontrovers diskutiert. Nach [Gre07] wird dem Torquemotor ein deutlich besseres Beschleunigungsvermögen zugerechnet, was ihn besonders für Stellantriebsaufgaben prädestiniert. In punkto Energieeffizienz ist der Torquemotor etwas ungünstiger, da der Wirkungsgrad physikalisch bedingt für langsam laufende Motoren geringer ausfällt [Dop08]. Technische Treiber für die Direktantriebstechnik sind zum einen IGBT-Frequenzumrichter und zum anderen Permanentmagnete zur verlustlosen Erregung von hochpoligen Synchronantrieben. Nachfolgend wird der Entwicklungsstand für die vorgesehenen Demonstratoren charakterisiert.

Antriebe für Werkzeugmaschinen-Rundtische

Die zunächst anvisierte Hauptanwendung des LEANTEC-Motors wird im Bereich der Werkzeugmaschinen für Rundtische sein, da dort die geringe axiale Länge und der permanentmagnetfreie Energiewandler prinzipielle Vorteile versprechen. Zur Anwendung von

Torquemotoren in dem Segment existiert eine Reihe von Patenten, von denen zwei stellvertretend herausgegriffen werden. In [Bod06] wird eine Rundtischlagerungs- und Antriebsvorrichtung beschrieben. Die Antriebseinheit besteht aus einem klassischen Torquemotor in Radialflussausführung mit Innenläufer. Die axiale Länge ist im Verhältnis zur LEANTEC-Zieltechnologie, um ein Vielfaches größer, so dass sich eine relativ große Bauhöhe für den Rundtisch insgesamt ergibt. Der Hauptanspruch des Patents bezieht sich auf das starre Gesamtsystem Rundtischlagerungs- und Antriebsvorrichtung, bestehend aus klassischen Lagerungselementen, einer aktiven Magnetlagerung sowie einem elektrischen Direktantrieb. Dieser soll vorzugsweise aus einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine bestehen, in dessen Stator die Wicklung untergebracht sind und dessen Rotor mit Permanentmagneten hoher Energiedichte bestückt ist, die auf einem aus Sintermaterial bestehenden Ring befestigt werden. Anmelder des Patents ist die Schäffler KG.

In [Rod07] wird eine Anordnung aus 2 Direktantrieben vorgeschlagen, die jeweils ein Rotorbauteil antreiben, das beweglich zu einem axialen Zentralzylinder gelagert ist. Die beiden Statoren sind fest mit dem Zylinder verbunden. Zu der Ausführung der Direktantriebe wird angegeben, dass sie als Scheibenläufer entweder permanentmagnetisch erregt oder als Reluktanzmaschine ausgeführt werden können. Anmelder des Patents ist die INA GmbH.

Nachfolgend werden einige Konkurrenzprodukte angeführt und soweit wie möglich verglichen. Angeführt werden Konkurrenzausführungen mit Torquemotoren, die eine Ringform haben.

Von der Fa. Weiss Sondermaschinen GmbH in Buchen sind die Anschlussdaten und Abmessungen der Torquemotoren im Zusammenhang mit den Maßbildern bekannt, aus denen deutlich wird, dass die Abmessungen weit hinter dem Zielmotor LEANTEC zurückbleiben. Sowohl der Außendurchmesser von 800 mm als auch die aktive axiale Höhe von 135 mm entsprechen den 2-fachen Vergleichswerten des Zielmotors. Zum eingesetzten Motorprinzip ist aus den Unterlagen nichts Näheres zu entnehmen.

Die Rundtische der Fa. Fibro GmbH aus Weinsberg werden ebenfalls wahlweise über Torquemotoren (hochpoliger PM-Synchronmotor) angetrieben. Zum Vergleich wird der Torquemotor DA1.04 mit einem Maximalmoment von 642 Nm herangezogen. Der Außendurchmesser mit 400 mm ist mit dem des Zielmotors vergleichbar. Zur axialen Höhe werden keine Angaben gemacht. Eine Abschätzung aus den vorhandenen Abbildungen lässt eine Schätzung für die Bauhöhe von ca. 100 mm zu und liegt damit bei 150 % des Zielmotors. Allerdings muss dabei auf Unsicherheiten beim Vergleich von absoluter Höhe und aktiver Höhe hingewiesen werden.

Die Fa. Torque Tec GmbH aus Jülich stellt Torquemotoren für eine Vielzahl von Anwendungen her u.a. auch für Rundtische. Sie bestehen aus hochpoligen PM-Synchronmotoren. In den Anwendungshinweisen wird dezidiert darauf hingewiesen, dass keine magnetisierbaren Späne in die Nähe des Torquemotors kommen sollten. Der Motor sollte außerdem nicht auch in Kontakt mit Ölen, Fetten und Kohlenwasserstoffverbindungen kommen. Diese Einschränkungen sind beim LEANTEC-Motor nicht zu erwarten. Wegen der großen Anwendungsvielfalt sind keine besonderen Optimierungen hinsichtlich einer geringen Axialhöhe erkennbar. Auch hier bleiben die Werte weit über den Vergleichswerten des Zielmotors. Erstaunlich gering fällt die Motormasse aus, die als Konkurrenzwert für den Zielmotor berücksichtigt werden sollte.

Die Fa. HIWIN GmbH aus Offenburg bietet Lineartechnologie an, die auch für Rundtische zur Anwendung gebracht werden kann. Das erreichbare Dauermoment liegt mit 96 Nm derzeit ca. um eine Größenordnung unter der des Zielmotors. Durchmesser und axiale Länge sind schon deshalb

nicht vergleichbar (vgl. auch Der Konstrukteur, Magazin für Konstruktion und Entwicklung Heft 4 2009, S.50).

Die Fa. INA Drives Mechatronics GmbH aus Suhl bietet für Rundtische verschiedenster Durchmesser rastmomentarme bzw. rastmomentlose Torquemotoren in genuteter bzw. nutenloser Bauform an. Mit letzterer lassen sich höchste Rundlaufgenauigkeiten, wie sie für das Präzisionsschleifen benötigt werden, erreichen. Die rotierenden Torquemotoren sind PM-Synchronmotoren in hochpoliger Ringausführung als Radialflussmaschine gestaltet und bei nutenloser Ausführung sind die Spulenwicklungen auf dem Eisenring befestigt und mit dem Stator vergossen. Wegen des vergrößerten Luftspalts ist die Kraftdichte mit (25 ... 30) kN/m² etwas reduziert. Ein mit dem Zielmotor vergleichbarer Motor ist der RM3P800x72 mit einem Dauermoment von 572 Nm. Während die axiale Höhe mit 72 mm in der Größenordnung des Zielmotors liegt, fällt der Durchmesser mit 800 mm um 100 % höher aus. Eine weitere Bauform ist der genutete PM Synchronmotor in Außenläuferbauform. Die Permanentmagnete sind auf dem außenliegenden Eisenring befestigt, die Wicklung liegt im genuteten Statoreisenblechpaket: Vergleichsmotor ist hier der RE11-3P-250x175. Der Durchmesser liegt mit 250 mm bei 63 % die Höhe mit 175 mm bei 270 % der Abmaße des Zielmotors. Der Torquemotor in Innenpolbauweise weist eine Kraftdichte von (60 ... 80) kN/m² aus. Ein Vergleich mit dem Zielmotor zeigt RI11-3P-250/150 mit 63 % des Durchmessers und 230 % der axialen Länge.

Die Fa. EAAT Chemnitz entwickelt u.a. permanenterregte Synchron-Torquemotoren, die sich für den Einsatz in Rundschalttischen eignen. Die Bauform ist als Radialflussmaschine ausgeführt und weist deshalb eine relative große Aktivteillänge aus.

Magnetische Spannvorrichtung

Spannvorrichtungen dienen zur Fixierung von Werkstücken bei Be- und Verarbeitung derselben. In der Patentschrift [Ste08] wird eine permanentmagneterregte Vorrichtung beschrieben.

Magnetische Spannvorrichtungen dienen zum Festhalten magnetisierbarer Werkstücke auf einer in einzelne Polstücke unterteilten Platte unter Ausnutzung der durch einen Permanentmagneten oder einen Elektromagneten hervorgerufenen magnetischen Kräfte. Der Patentschrift AT 174515 kann eine Magnetspannvorrichtung mit einem aus einzelnen Magneten und unmagnetischen Zwischenlagen abwechselnd geschichteten Magnetpaket, das durch Spannmittel zusammengehalten wird, entnommen werden. In der Patentschrift DE 41 20 338 C1 ist eine Außenrundscheifmaschine mit einem rotierend angetriebenen Elektromagnetfutter beschrieben. Hersteller dieser Spannvorrichtungen ist die Spann-Automations-Normteiltechnik GmbH.

Mit [Kle01] wird eine Antriebseinheit für 5-Achs-Simultanfräsmaschinen vorgestellt. Diese bietet mit einer neuen Direct-Drive-Technologie ein neues Kopf-Achsantriebskonzept für die vierte und fünfte Achse an. Das Kopfkonzert ist so aufgebaut, dass es die kompletten Belange im Werkzeug- und Formenbau abdeckt. Der verwendete Direktantrieb-Einbaumotor basiert auf dem Prinzip eines aufgewickelten Linearmotors (Torque-Motor mit Einzelpolwicklungen) und ermöglicht höchste Leistungsdichte auf kleinsten Bauraum (Drehmomente von 1000 Nm pro Einheit). Die weiteren Vorteile sind: Wegfall mechanischer Übertragungselemente (der Wegfall möglicher mechanischer Übertragungsfehler, wie Getriebeispiel, Zahnflankenverschleiß oder Pitting ermöglicht eine höhere Positioniergenauigkeit und -wiederholbarkeit); nahezu wartungsfrei sowie Winkelgeschwindigkeiten von 360 Grad pro Sekunde.

Extruderantrieb

Bisher üblicherweise eingesetzt wurden für Extruder elektrische Antriebe mit Getriebe. Für Großextruder in Polymerisationsanlagen wird in [Kre01] erstmals ein Überlagerungsgetriebe verwendet, welches es erlaubt, einen kostengünstigen Hauptmotor mit fester Drehzahl mit einem kleineren, preiswerten drehzahlvariablen Zusatzmotor zu kombinieren. Das Prinzip basiert auf einer Leistungsverzweigung. Der daraus resultierende drehzahlgeregelte Extruderantrieb, besitzt ein bisher nicht erreichtes Preis-Leistungsverhältnis. Ein Kostenvergleich liefert eine Kosteneinsparung um über 40 %. Am Beispiel der Polyethylenaufbereitung bei hoher Dichte mit unterschiedlicher Viskosität wird gezeigt, dass erst der drehzahlvariable Antrieb die Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Extruderbetrieb schafft. Es wird ferner gezeigt, dass der drehzahlvariable Antrieb die Zahnradpumpe ersetzen kann, wodurch sich die Gesamtkosten für die Aufbereitungsanlage um rund 20 % senken lassen.

[Bud97] behandelt die Verwendung von Direktantrieben in Extrusionsanlagen. Da Drehstrommotoren eine größere Leistungsdichte als Gleichstrommotoren haben, sind erstere zu bevorzugen. Durch deren Ausführung als Direktantrieb ist eine spielfreie Ankopplung des Motors möglich. Der modulare Aufbau erleichtert Planung und Wartung. Jeder Antrieb besitzt eine eigene "Intelligenz" um Sollwerte einzuhalten. Ein Gleichrichter und ein Wechselrichter für die einzelnen Antriebe ist die preisgünstigste Lösung auf der Ebene der Leistungselektronik.

Der derzeitige Stand der Einführung der Direktantriebstechnik für Extruder wird in [Mas04] zusammengefasst. Der Direktantrieb wird dabei als direkte Anbindung der Extruderschnecke mit dem Elektromotor (mit oder ohne Integration der Schneckenlagerung) verstanden unter Wegfall von Getriebe und Kupplung. Es wird prognostiziert, dass Direktantriebe von Extruderschnecken die Antriebe für zukünftige Extrudergenerationen sein werden. Es bieten sich bereits heute unterschiedlichste Möglichkeiten an, die jedoch noch nicht die erwarteten Kostenvorteile bringen. Eine äußerst interessante und sehr kompakte Antriebslösung und Variante des Direktantriebs für kleinere Extruder stellt die Entwicklung der Firma Knödler dar. Sie ist ausgereift und auch kostenmäßig mit den bestehenden Antriebslösungen, bei deutlichen Vorteilen, vergleichbar. Bei dieser Lösung wird das mechanische Prinzip der Drehmomentaddition, wenn mehrere Antriebe auf einen gemeinsamen Abtrieb hin arbeiten, genutzt. Es können preiswerte Standardmotoren verwendet werden. Zur Steuerung der Elektromotoren kann die gleiche Steuerung, wie sie für einen in der Leistungssumme gleich großen, einzelnen Elektromotor benötigt wird, eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um einen Torque-Antrieb, wobei die angebotenen Antriebe meistens als Synchronmotor konzipiert sind. Nachteilig bei den Torque-Motoren im Vergleich zu den bisherigen Standardantrieben ist einerseits die z.Z. geringe Produktionsstückzahl, die es noch nicht erlaubt, Kosteneffekte durch Stückzahlregression zu nutzen, und andererseits der aufgrund der Motorgröße beträchtliche Kostenaufwand für die Permanentmagneten mit denen der Rotor bestückt ist. Obwohl unter technischen Aspekten betrachtet ein Direktantrieb beträchtliche Vorteile aufweist, kann er diese deshalb noch nicht direkt in Kostenvorteile umsetzen. Verbesserungsmöglichkeiten bietet hier die Transversalflussstechnologie. Diese eignet sich vor allem für Antriebe im niederen Drehzahlbereich und mit hohen Drehmomenten.

In [Mas03] wird ein Mehrachsendifraktantrieb beschrieben, der bei Ausführung mit einem Transversalflussmotor aus zwei Segmentmotoren bestehen kann, die einen Doppelschneckenextruder bewegen. Der Transversalflussmotor hat einen 2- bis 5-fachen Drehschub gegenüber klassischen Radialflussmotoren und ist deshalb für die geforderten Drehzahlen bis zu 500 1/min prädestiniert. Für eine Plastifiziereinheit wird der Antriebsmotor sowohl als

Scheibenläufermotor als auch als Transversalflussmotor synchroner oder asynchroner Bauart vorgeschlagen. Die Stator-Rotoranordnung wird in verschiedenen Konfigurationen beschrieben. Als Außenringläufer wird ein besonders großes Drehmoment erreicht, wie auch beim Zwischenring- und Mehringläufer. Beim Innenringläufer fällt dagegen das Trägheitsmoment geringer aus. In der Patentschrift werden spezielle meist dreiphasige Wicklungsausführungen vorgeschlagen, die z.B. spiralförmig aufgewickelt werden.

Eine breitere Produktpalette von asynchronen und synchronen Direktantrieben wird von [Weh06] vorgestellt, der insbesondere auf die hohe Drehmomentdichte der Direktantriebe verweist und auf Besonderheiten ihres Aufbaus wie Zahnspulenwicklungen bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen eingeht. Der Extruder wird dabei als eine Anwendungsmöglichkeit genannt.

Nach [Mar07] wird als Direktantrieb einer Schnecke zum Spritzgießen von Kunststoff eine permanentmagneterregte Synchronmaschine oder ein Synchronservomotor vorgeschlagen. Hauptgegenstand des Patents ist die Kühlung des Servoantriebs und der Lagereinheit.

Im industriellen Einsatz haben sich bereits mannigfaltige Vorteile erreichen lassen wie ein konstant hohes Drehmoment über den gesamten Extrusionsdrehzahlbereich. Dadurch können die Energiekosten um 20 % gesenkt werden und bauartbedingt wird ein um 30 % geringerer Platzbedarf benötigt. Durch den Wegfall eines Getriebes entstehen zudem keine Vibrationen, keine Drehzahlschwankungen und keine Pulsationen.

Radlader-Direktantrieb

Ein Überblick zum Stand der Technik zu Radladern, insbesondere den Fahrtrieb und die Arbeitsantriebe auf hydraulischer Basis betreffend, wird in [Lat99] gegeben.

Eine hybride dieselelektrische Antriebsversion für Radlader wird in [Bur09] behandelt. Das Konzept sieht eine in einen Dieselmotor integrierte E-Maschine vor (IMG - Integrierter Motor-Generator). Der Rotor der E-Maschine ersetzt das Schwungrad des Dieselmotors und der Stator der E-Maschine ist in das Schwungradgehäuse integriert. Als E-Maschine dient eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit konzentrierten Einzelzahnwicklungen, die einen hohen Wirkungsgrad aufweist, eine kompakte Bauweise ermöglicht und die in den Kühlkreislauf des Dieselmotors integriert ist. Es wurden zwei Varianten des Hybridantriebs entwickelt, nämlich ein 'Mild-Hybrid'-Antrieb, bei dem ein kleiner Dieselmotor durch die integrierte E-Maschine zur Abdeckung von Leistungsspitzen unterstützt wird und ein Voll-Hybridantrieb, bei dem die gesamte mechanische Energie des Dieselmotors in elektrische Energie umgewandelt wird.

In [Dei09] werden Auswahl und Dimensionierung des Antriebs für einen Radlader anhand von Bewegungszyklen beschrieben. Für Arbeitsaufgaben mobiler Arbeitsmaschinen wurde über die Analyse der Messdaten und die Auswertung statistischer Kennwerte des Umfangs an gemessenen Belastungsdaten mit einem neu entwickelten reproduzierbaren Verfahren zur Erzeugung repräsentativer Zyklusdaten ein Standard-Lastzyklus generiert. Dieser Lastzyklus lässt insbesondere im Bereich der Simulation von Antriebsstrangkzepten ein hohes Einsatzpotenzial erwarten. Unterschiedliche Getriebearchitekturen können auf diese Weise mit dem gleichen, für die betrachtete Arbeitsaufgabe charakteristischen standardisierten Lastzyklus untersucht werden. Ergebnisse von Simulationen bieten durch die Repräsentanz der enthaltenen Belastungen für die betrachtete Arbeitsaufgabe eine hohe Aussagekraft über die Effizienz der analysierten Antriebsstrangvariante. Beispielhaft wurde an einem Mehrmotorengetriebe aus einem Radlader sowie an einem leistungsverzweigten Traktorgetriebe auf Basis des standardisierten Lastzyklus die Effizienzbeurteilung vorgenommen. Die beiden Varianten wurden als Simulationsmodelle abgebildet

und diese über Messungen an einem stationären Versuchsstand verifiziert. Die verifizierten Simulationsmodelle wurden abschließend für die Effizienzbeurteilung auf Basis des standardisierten Lastzyklus herangezogen. Es konnten signifikante Unterschiede im Effizienzverhalten der beiden Getriebe aufgezeigt und auf diese Weise die Grundlage für die Beurteilung der Eignung der Konzepte für die betrachtete Arbeitsaufgabe geschaffen werden. Die entwickelte Standardisierung von Lastzyklen stellt also eine vielversprechende Möglichkeit zur reproduzierbaren Aufbereitung von repräsentativen Lastzyklen für Arbeitsaufgaben von mobilen Arbeitsmaschinen dar. Das Verfahren bietet eine sehr gute Möglichkeit zur Datenreduktion. Diese führte bei der Nutzung des standardisierten Lastzyklus in der Simulation zu erheblichen Verkürzungen der Rechenzeit bei gleichzeitig belastbaren Ergebnissen. Darüber hinaus lässt sich durch eine Automatisierung des Verfahrens eine weitere Beschleunigung erzielen und so die Vorteilhaftigkeit der Standardisierung von Lastzyklen mobiler Arbeitsmaschinen steigern.

Im Gegensatz zu Antriebsvarianten mit Getrieben sollen mit dem LEANTEC-Motor die Vorteile eines Direktantriebs ausgespielt werden.

Andere Anwendungen

Bei der Version eines Transversalflussmotors in Mehrfachringanordnung zur Vergrößerung der Drehmomentdichte erfolgt die Erregung permanentmagnetisch. Die Welle ist als Hohlwelle ausgeführt und dient u.a. mit einem zusätzlichen Ventilator zur schnellen Wärmeabfuhr [Fis04].

In Bezug auf die Zieltechnologie wird eine sehr ähnliche Ringanordnung in gezahnter Ausführung nach dem Transversalflussprinzip in [Tha00] vorgeschlagen für einen Fahrtreppenantrieb. Der reluctanten TFM wird ausdrücklich erwähnt. Der stationäre Teil des Transversalflussmotors, der mit der Personenbeförderung über eine Halterung verbunden ist, besteht aus zwei gleichartig aufgebauten Segmenten, die sandwichartig den beweglichen Teil umfassen. Auf dem Stator ist eine Spulenwicklung angebracht, die das Magnetfeld erzeugt, das sich in den Jochen ausbildet. Je nachdem, ob sich nun gegenüber dem Statorzahn im Luftspalt auf der beweglichen Seite eine Nut oder ein Zahn befindet, wird eine drehmomentbildende Kraft ausgeübt oder nicht. In einer besonderen Ausführung wird die Zahnung auf dem beweglichen Teil versetzt angeordnet. Dadurch kann durch alternative Bestromung des oberen oder unteren Statorsegments eine verfeinerte Weichschaltung des beweglichen Teils erreicht werden. Eine alternative Ausführung eines Transversalflussmotors wird angeführt. Ein Antriebskettenrad ist fest mit der Rotorwelle verbunden, die ihrerseits über eine scheibenförmige Verbindung mit dem Rotor der TFM verbunden ist. Der Rotor ist dort, wo er mit dem Stator in Wechselwirkung treten kann, gezahnt gestaltet. Der Stator besteht aus 4 Segmenten, die ebenfalls gezahnt sind.

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

Literatur:

- [Bod06] Patentanmeldung DE 10 2006 036 051.6 AT.: 02.08.2006, WO 2008/015069, Rundtischlagerungs- und Antriebsvorrichtung. AT.: 07.02.2008, Erfinder: Bode, H.; Schreiber, M.; Anmelder: Schaeffler KG
- [Bud97] Budig, P.K.; Luscalu, R.: Moderne Drehstromantriebe für Extrusionsanlagen und Reifenaufbaumaschinen. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe * Band 50 (1997) Heft 11, S. 807-811

- [Bur09] Burow, W.; Schiffgens, H.-J.; Brun, M.; Schoulen, K.: DEUTZ-Hybrid-Antrieb für mobile Arbeitsmaschinen. Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motorentchnik, 18, (2009) Seite 1223-1235
- [Dei09] Deiter, H.: Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen. Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik / 2009 / 20090902175, Dissertation TU Braunschweig
- [Dop08] Doppelbauer, M.: Direktantrieb oder doch besser Getriebemotor? – Systematische Analyse der Vor- und Nachteile beider Konzepte. Antriebstechnik 4/2008, S. 66-73
- [Fis04] Patentanmeldung: EP 1 607 362 A1, Antrieb für eine Aufzugsanlage. AT.: 19.06.2004, Erfinder: Fischer, D.; Anmelder: INVENTIO AG
- [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, 2007VP3 – Teilprojekt: TP3.5 – TUD-ET 13
- [Kle01] Klement, B.: Neues Achsantriebskonzept für das 5-Achs-Simultanfräsen. AGT-Dokumentation * Band 30 (2001) H. 3, S. 48-49.
- [Kre01] Kreuzer, W.; Stöhrer, B.: Vom Betriebspunkt zum Betriebsfenster. Drehzahlvariabler Antrieb für große Doppelschneckenextruder. Kunststoffe, München * Band 91 (2001) Heft 6, Seite 50,53-54,56-57
- [Lat99] Latour, C.; Beck, J.: Fahrtrieb und Arbeitshydraulik für einen Radlader. Tagung Landtechnik, 1999, in: VDI-Berichte Band 1503 (1999) S. 379-384 Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Mar07] Patentanmeldung DE 10 2006 024 712.4 2007. 12. 06 (OS); Antriebssystem. AT.: 26.05.2006, OT.: 06.12.2007, Erfinder: Markert, C.; Oestreich, M.; Scheer, A.; Anmelder: Siemens AG,
- [Mas03] Patentanmeldung DE 103 56 627 A1 2005.06.30 (OS); Mehrachsdirektantrieb. AT.: 01.12.2003; OT.: 30.06.2005; Erfinder: Masberg, U.; Willich, W.; Anmelder: dto.
- [Mas04] Masberg, U.: Direktantrieb von Extruderschnecken. Extrudieren und Thermoformen von Verpackungsfolien - bessere Qualität durch höhere Leistung, Extrusionstechnik, 2004 * (2004) S. 109-126, Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Rod07] Patentanmeldung DE 20 2007 002 207.7,. AT.: 14.02.2007; WO 2008/098846 A2, Elektrische Direktantriebsvorrichtung, insbesondere für einen Drehtisch. AT.: 21.08.2008; Erfinder: Rode, D.; Anmelder: INA DRIVES & Mechatronics GmbH & Co KG
- [Ste08] Patentanmeldung DE102007025196A1 04.12.2008 Magnetische Spann-vorrichtung. 04.12.2008 IPC-Hauptklasse, Erfinder: Sterzinger, Anmelder: Schaeffler KG
- [Tha00] Patentanmeldung DE 100 36 913 A1; Fahrtreppen- und Fahrsteigantrieb. AT.: 28.07.2000, OT.: 14.02.2002; Erfinder: Thaler, D.; Spannhake, S.; Anmelder: Ortis Elevator Co.

[Weh06] Wehner, H.-J.: Torquemotoren als Direktantriebe in Produktionsmaschinen: Leistungsmerkmale, Einsatzmöglichkeiten, Grenzen. SPS/IPC/Drives, Elektrische Automatisierung - Systeme und Komponenten, 2005 * (2005) S. 440-450

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 3 zu finden sind:

- SAMAG Saalfelder Werkzeugmaschinen GmbH,
- RAKO Spannmittel GmbH,
- BITSz engineering GmbH,
- 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.:

- MIMNET GmbH,
- Magnettechnik Kleine und
- EPSa GmbH.

II Eingehende Darstellung

1 Bearbeitung der Arbeitspakete / Erzielte Ergebnisse (Erstantrag)

1.1 AP 3.1 Antriebssystem für Rundtischantrieb

1.1.1 AP 3.1.1 Anwendungsspezifikation Rundtischantrieb

Bei der Rundtisch - Anwendung wird vom Motor ein Dauermoment von maximal 2000 Nm über einen geringen Drehzahlbereich von 0 bis 10 min^{-1} gefordert. Es wird eine Teilgenauigkeit von $5''$ und eine Wiederholgenauigkeit von $0,5''$ gefordert. Abbildung 1 illustriert den geforderten Betriebsbereich und die resultierende Motorkennlinie.

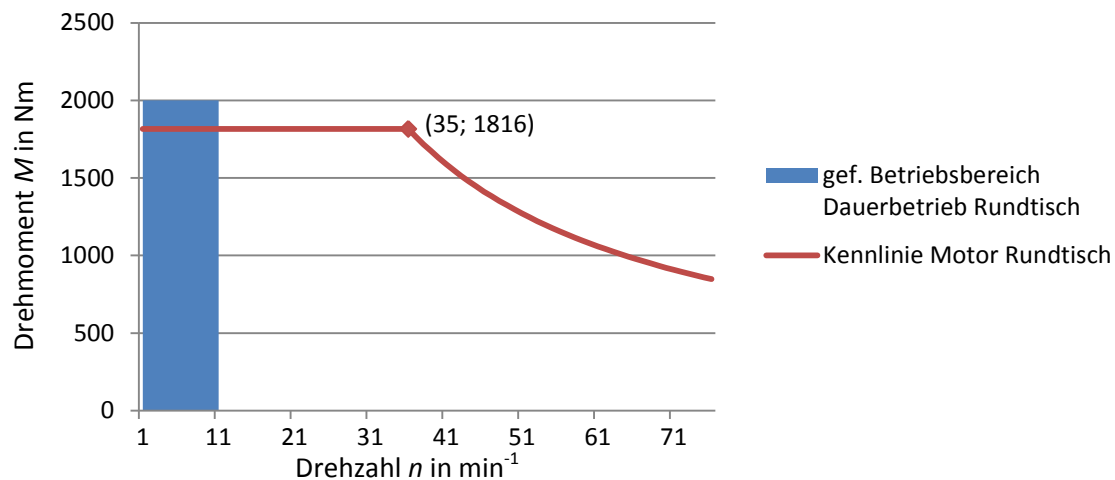


Abbildung 1: Geforderte Betriebsbereiche und Motorkennlinie beim Antrieb des Rundtisches

Der geforderte Betriebsbereich mit großen Dauermomenten bei geringen Drehzahlen ist dem Anforderungsprofil des Extruder-Antriebes sehr ähnlich, deshalb wurde für beide Anwendungen ein geometrisch identischer Motor ausgelegt. Damit konnten der Auslegungsprozess und die Motorfertigung wesentlich vereinfacht werden.

1.1.2 AP 3.1.2 Systementwicklung und Herstellung des Rundtischantriebs

AP 3.1.2.9 Übernahme und Adaption der Entwicklungsergebnisse aus VP 1 für den Rundtisch

Im Vergleich zum im VP1 untersuchten Testmotor wurde die Zahngeometrie verändert. Die Zahnhöhe wurde dabei vergrößert, um den Anforderungen an ein größeres Drehmoment gerecht zu werden. Aus demselben Grund wurden auch ein größerer Durchmesser und eine höhere Polzahl verwendet.

Das Wicklungs- und das Kühlsystem wurden ohne Änderungen übernommen.

AP 3.1.2.10 Dimensionierung des Rundtischantriebs

Gemäß den vom Anwender vorgegebenen Anforderungen wurde ein Motor ausgelegt. Nachfolgende Tabelle 3 zeigt die Daten des Motors für den Rundtischantrieb.

Tabelle 3: Daten des Motors für den Rundtischantrieb

	Rundtisch
Bemessungsdrehmoment M_1 in Nm	1816
Bemessungsdrehzahl N_1 in min^{-1}	35
Maximalstrom I_{ph} in A	800
Axiale Länge (Stator + Rotor) in mm	276,9
Aktivdurchmesser D_m in m	0,357
Zahnhöhe a in mm	26
Polzahl $2p$	146

AP 3.1.2.11 Optimierung des Antriebssystems auf Basis einer Anwendungssimulation (Dreh-/Fräsbearbeitung)

Die Optimierung des Antriebssystems wurde begonnen, konnte aber aufgrund der fehlenden praktischen Versuche beim Partner SAMAG nicht erfolgreich beendet werden. Die dadurch frei gewordenen Personalkapazitäten flossen gemeinsam mit allen Partnern in die Lösung der Inbetriebnahme Probleme bei allen Demonstratoren ein: Fehlersuche, Fehleranalyse, Erstellung eines Fehlerbeseitigungskonzepts, praktische Erprobung neuer Lösungen, Instandsetzung, Wiederinbetriebnahme.

AP 3.1.2.12 Entwicklung eines Projektierungstools zur anwendungsangepassten Antriebsauslegung von LEANTEC-Antrieben

Die Auslegung eines neuen LEANTEC-Motors erfolgt nach dem in Abbildung 2 dargestellten Schema als Kombination mehrerer Berechnungstools, die während der einzelnen AP auch innerhalb des TP 1.5 erarbeitet wurden. 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 im Abschlussbericht zu TP 1.5.

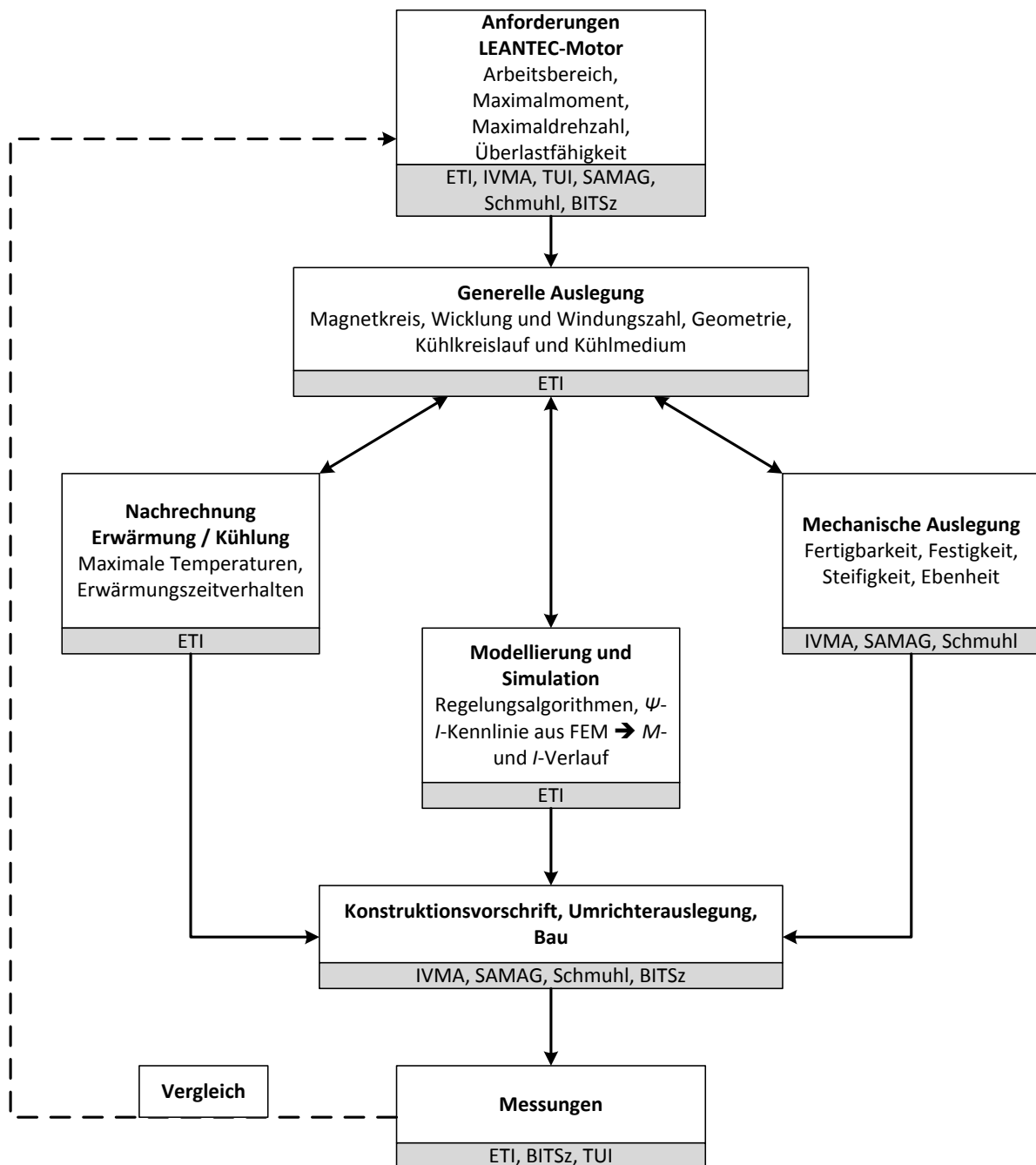


Abbildung 2: Auslegungsprozess eines LEANTEC-Antriebes

Zusätzlich zu den im obigen Schema angegebenen Schwerpunkten mussten noch folgende Randbedingungen Beachtung finden: zur Verfügung stehender Bauraum, die thermischen Randbedingungen, die Schutzart, die Betriebsart (Dauer- bzw. Aussetzbetrieb), die Definition der Schnittstellen zu den Parametern der angrenzenden Baugruppen (Getriebe, Schutzeinrichtungen, Netz) und die Integrierbarkeit des Stromrichters in die Einhausung des Motors beim Radlader.

Aus den Spezifikationen der Demonstratorantriebe wurden, wie teilweise in der Tabelle oben ersichtlich, Skalierungsfaktoren für die elektromagnetischen, elektrischen sowie geometrischen Parameter der verschiedenen Antriebskonfigurationen abgeleitet. So variieren die Windungszahlen im Verhältnis 1:2, die Stromrichter-Topologie zwischen Boost-Ausführung und Asymmetrischer Halbbrücke sowie die Phasenströme im Verhältnis 1:2.

1.1.3 AP 3.1.3 Erprobung und Optimierung des Rundtischantriebs

Ein Versuchsstand zur Prüfung des Rundtischantriebs wurde bei der SAMAG in Saalfeld aufgebaut. Es ist dort möglich, alle relevanten Betriebsgrößen (Drehmoment, Drehzahl, Strom etc.) zu erfassen und aufzuzeichnen.

Aufgrund unvorhergesehener Probleme bei der Maßhaltigkeit des Luftspaltes und der Erwärmung der Rotorscheiben konnte allerdings keine Erprobung des Rundtischantriebes stattfinden.

Durch die sehr komplexen und zeitintensiven Zusammenhänge bzw. Arbeitsabläufe war eine konstruktive Optimierung der Demonstratormotoren an einzelnen Versuchsteilen möglich, aber praktisch nicht mehr umsetzbar. Das betrifft insbesondere die Ausführung der Wicklungsisolierung, wo Versuche zur Teilentladungseinsetzspannung an der TUD durchgeführt wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass es noch technische Probleme beim Verguss der Wicklung in den SMC-Statorelementen gibt, die nur durch eine größere Routine und exakt definierte Arbeitsschritte bei der Herstellung lösbar sind. Das war aber im Rahmen des WK-Zeitraums nicht machbar.

1.2 AP 3.2 Antriebssystem für magnetische Spannvorrichtung

1.2.1 AP 3.2.1 Anwendungsspezifikation magnetische Spannvorrichtung

An dem Demonstrator für die Anwendung Spannvorrichtung sollen Drehbearbeitungen von Rohrenden durchgeführt werden. Die zu bearbeitenden Rohre haben einen Durchmesser von bis zu 148 mm und eine Mindestlänge von ca. 700 mm. Die Drehbearbeitung erfolgt bei drehender Spannvorrichtung und gleichzeitig stillstehendem Werkzeug. Für die Drehbearbeitung besteht an den Motor der Spannvorrichtung die Forderung nach einem maximalen Dauermoment von 500 Nm bei einem Drehzahlbereich bis 1500 min^{-1} . Abbildung 3 illustriert den geforderten Betriebsbereich und die resultierende Motorkennlinie.

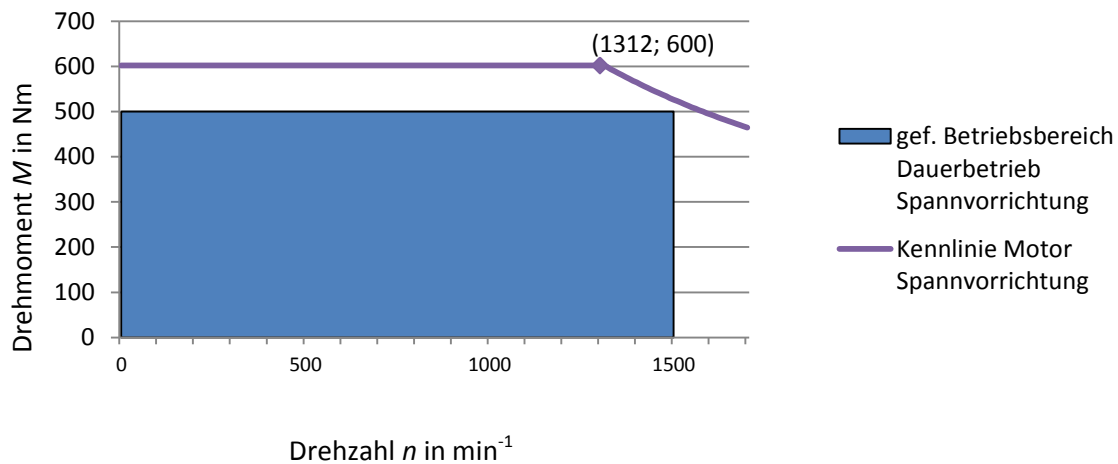


Abbildung 3: Geforderte Betriebsbereiche und Motorkennlinie beim Antrieb der Spannvorrichtung

1.2.2 AP 3.2.2 Systementwicklung und Herstellung des magnetische Spannvorrichtung

AP 3.2.2.13 Übernahme und Adaption der Entwicklungsergebnisse aus VP 1 für die Spannvorrichtung

Siehe dazu AP 3.1.2.9.

AP 3.2.2.14 Dimensionierung des Spannvorrichtungsantriebes

Gemäß den vom Anwender vorgegebenen Anforderungen wurde ein Motor ausgelegt und dimensioniert. Nachfolgende Tabelle 4 zeigt die Daten des Antriebsmotors für das magnetische Spannmittel.

Tabelle 4: Daten des Motors für den Antrieb der magnetischen Spannvorrichtung

	Spannmittel
Bemessungsdrehmoment M_1 in Nm	602
Bemessungsdrehzahl N_1 in min^{-1}	1312
Maximalstrom I_{ph} in A	100
Axiale Länge (Stator + Rotor) in mm	276,9
Aktivdurchmesser D_m in m	0,357
Zahnhöhe a in mm	26
Polzahl $2p$	146

AP 3.2.2.15 Optimierung des Antriebes auf Basis einer Anwendungssimulation (Schleifbearbeitung)

Die Optimierung des Antriebssystems wurde begonnen, konnte aber aufgrund der fehlenden praktischen Versuche beim Partner RAKO nicht erfolgreich beendet werden. Die dadurch frei gewordenen Personalkapazitäten flossen gemeinsam mit allen Partnern in die Lösung der Inbetriebnahmeprobleme bei den anderen Demonstratoren ein: Fehlersuche, Fehleranalyse, Erstellung eines Fehlerbeseitigungskonzepts, praktische Erprobung neuer Lösungen, Instandsetzung, Wiederinbetriebnahme.

AP 3.2.2.16 Entwicklung eines Projektierungstools zur anwendungsangepassten Antriebsauslegung von LEANTEC-Antrieben

Siehe dazu AP 3.1.2.12.

1.2.3 AP 3.2.3 Erprobung und Optimierung der magnetische Spannvorrichtung

Ein Versuchsstand zur Prüfung des Spannmittelantriebs wurde bei der RAKO Spannmittel GmbH in Gelenau aufgebaut. Es ist dort möglich, alle relevanten Betriebsgrößen (Drehmoment, Drehzahl, Strom etc.) zu erfassen und aufzuzeichnen.

Die sehr große Bemessungsdrehzahl und die großen Polzahlen führen zu einer entsprechend hohen Grundschwingungsfrequenz von $f = 3898$ Hz im Strom des Demonstrators. Das wiederum hat große Verluste im Eisenkreis des Motors und vor allem in der Form von Wirbelströmen in der Rotorscheibe zur Folge. Es kam deshalb als Folge einer offenbar sehr großen Erwärmung der Rotorscheibe zu Problemen mit der Maßhaltigkeit des Luftspaltes. Eine Erprobung des Demonstrators war daher nur sehr eingeschränkt möglich.

Aufgrund der sehr komplexen und zeitintensiven Zusammenhänge bzw. Arbeitsabläufe war eine konstruktive Optimierung der Demonstratormotoren an einzelnen Versuchsteilen möglich, aber praktisch nicht mehr umsetzbar. Das betrifft insbesondere die Ausführung der Wicklungsisolierung, wo Versuche zur Teilentladungseinsetzspannung an der TUD durchgeführt wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass es noch technische Probleme beim Verguss der Wicklung in den SMC-Statorelementen gibt, die nur durch eine größere Routine bei der Herstellung lösbar sind. Das war aber im Rahmen des WK-Zeitraums nicht machbar.

Eine Ertüchtigung des Motors ist Teil der kostenneutralen Verlängerung.

1.3 AP 3.3 Antriebssystem für Extruder

1.3.1 AP 3.3.1 Anwendungsspezifikation Extruder

Beim Extruder besteht an den Motor die Anforderung bis zu einer Drehzahl von 600 min^{-1} ein Dauermoment von bis zu 1000 Nm liefern zu können. Das Beschleunigen stellt an den Antrieb des Extruders die Forderung, kurzzeitig ein über das maximale Dauermoment hinaus höheres Moment von bis zu 1500 Nm zu liefern. Dieses Maximalmoment wird über den Geschwindigkeitsbereich von $0 \dots 40 \text{ min}^{-1}$ gefordert. Die maximale Zeitdauer für das Durchfahren dieses Geschwindigkeitsbereichs wird mit 60 s angegeben. Abbildung 4 illustriert die geforderten Betriebsbereiche und die Motorkennlinie.

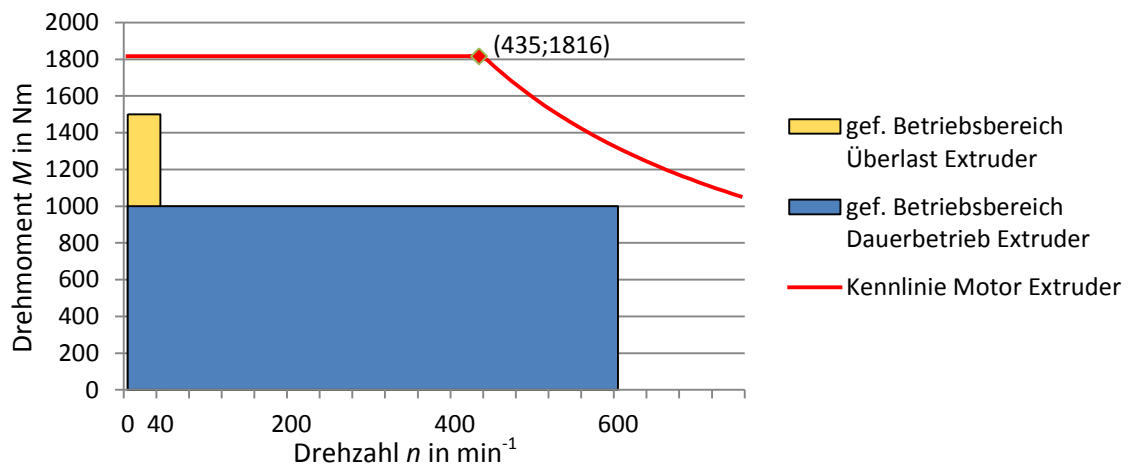


Abbildung 4: Geforderte Betriebsbereiche und Motorkennlinie beim Extruderantrieb

1.3.2 AP 3.3.2 Systementwicklung und Herstellung des Extruders

AP 3.3.2.9 Übernahme und Adaption der Entwicklungsergebnisse aus VP 1 für den Extruder

Siehe dazu AP 3.1.2.9.

AP 3.3.2.10 Dimensionierung des Extruderantriebes

Gemäß den vom Anwender vorgegebenen Anforderungen wurde ein Motor ausgelegt. Tabelle 5 zeigt die Daten des ausgelegten Motors. Bis auf die Bemessungsdrehzahl sind sie mit den Werten des Demonstrators Rundtischantrieb identisch.

Tabelle 5: Daten des Motors für den Extruderantrieb

	Extruder
Bemessungsdrehmoment M_1 in Nm	1816
Bemessungsdrehzahl N_1 in min^{-1}	435
Maximalstrom I_{ph} in A	800
Axiale Länge (Stator + Rotor) in mm	276,9
Aktivdurchmesser D_m in m	0,357
Zahnhöhe a in mm	26
Polzahl $2p$	146

Aus den Erfahrungen mit den anderen Demonstratoren waren auch für den Demonstrator Extruder aufgrund seiner identischen Bauweise mit den anderen Demonstratoren Probleme mit der Maßhaltigkeit des Luftspaltes unter Last zu erwarten. Der Motor wurde daher nicht gefertigt und die Ressourcen im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung in die Neuentwicklung eines Extruderantriebes investiert.

AP 3.3.2.11 Optimierung des Antriebssystems auf Basis einer Anwendungssimulation (Extrusion)

Eine Optimierung erfolgte dahingehend, dass simulativ nachgewiesen wurde, dass der Motor das Anfahrmoment liefern kann und anschließend im S1-Dauerbetrieb das Bemessungsmoment aufbringt, ohne sich unzulässig zu erwärmen.

AP 3.3.2.12 Entwicklung eines Projektierungstools zur anwendungsangepassten Antriebsauslegung von LEANTEC-Antrieben

Siehe dazu AP 3.1.2.12.

1.3.3 AP 3.3.3 Erprobung und Optimierung des Extruders

Aufgrund der sehr komplexen und zeitintensiven Zusammenhänge bzw. Arbeitsabläufe war eine konstruktive Optimierung der Demonstratormotoren zwar an einzelnen Versuchsteilen möglich, aber praktisch nicht mehr umsetzbar. Das betrifft insbesondere die Ausführung der Wicklungsisolierung, wo Versuche zur Teilentladungseinsetzspannung an der TUD durchgeführt wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass es noch technische Probleme beim Verguss der Wicklung in den SMC-Statorelementen gibt, die nur durch eine größere Routine und mehr Erfahrung bei der Herstellung lösbar sind. Das war aber im Rahmen des WK-Zeitraums nicht machbar.

Da auf einstimmigen Beschluss der Bündnispartner der Extruderantrieb nicht gebaut wurde, konnten weder eine Erprobung noch eine komplette Optimierung durchgeführt werden.

1.4 AP 3.4 Antriebssystem für Radlader

1.4.1 AP 3.4.1 Anwendungsspezifikation Radlader

Bei dem Demonstrator für den radintegrierten Fahrtrieb eines Radladers wird vom Motor im Drehzahlbereich von 0 bis ca. 260 min^{-1} ein Dauermoment von bis zu 600 Nm gefordert. Ab diesem Arbeitspunkt nimmt das maximal geforderte Dauermoment bei konstant bleibender Leistung von $16,3 \text{ kW}$ bis zur Drehzahl von 1700 min^{-1} ab. Abbildung 5 illustriert den geforderten Betriebsbereich und die resultierende Motorkennlinie.

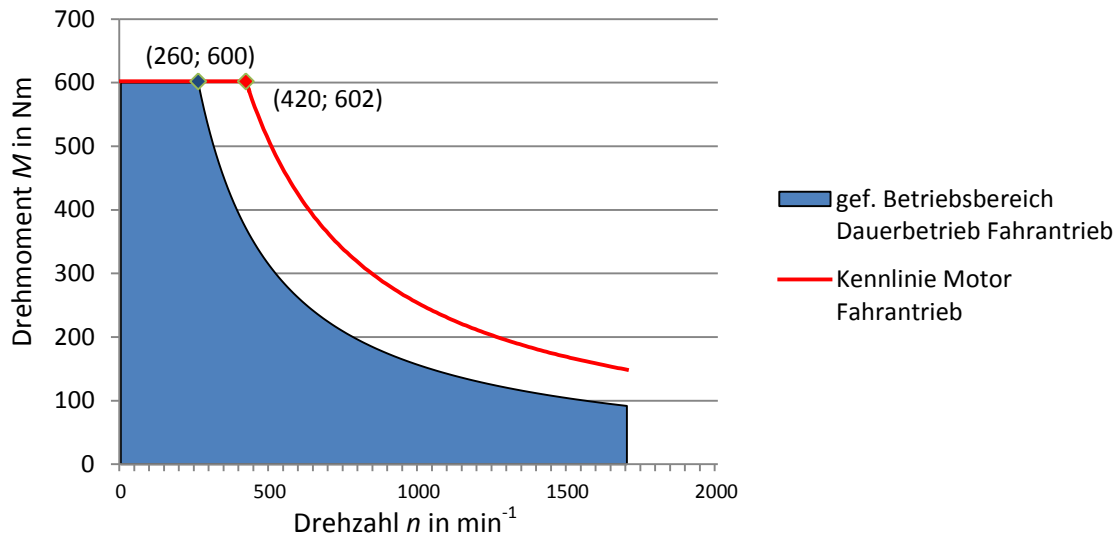


Abbildung 5: Geforderte Betriebsbereiche und Motorkennlinie beim Radladerantrieb

Ein Pflichtenheft auf Basis des Lastenheftes wurde für den Demonstrator Fahrtrieb erstellt.

1.4.2 AP 3.4.2 Systementwicklung und Herstellung des Antriebssystems Radlader

AP 3.4.2.5 Übernahme und Adaption der Entwicklungsergebnisse aus VP 1 für den Radlader

Siehe dazu AP 3.1.2.9.

AP 3.4.2.6 Dimensionierung des Radladerantriebs

Gemäß den vom Anwender vorgegebenen Anforderungen wurde ein Motor ausgelegt. Nachfolgende Tabelle 6 zeigt die Daten des ausgelegten Radladerantriebs.

Tabelle 6: Daten des Motors für den Radladerantrieb

	Radlader
Bemessungsdrehmoment M_1 in Nm	602
Bemessungsdrehzahl N_1 in min^{-1}	422
Maximalstrom I_{ph} in A	400
Axiale Länge (Stator + Rotor) in mm	276,9
Aktivdurchmesser D_m in m	0,240
Zahnhöhe a in mm	26
Polzahl $2p$	72

Der Motor des Radladerantriebes wurde von den beteiligten Partnern bis Ende 2013 hergestellt. Abbildung 6 zeigt den fertigen Motor mit den angeschlossenen Kühlschläuchen (orange) und den elektrischen Zuleitungen (schwarz).



Abbildung 6: Demonstrator Radladerantrieb

1.4.3 AP 3.4.3 Erprobung und Optimierung des Antriebssystems Radlader

Der Radladerantrieb wurde am Maschinenprüfstand des ETI umfangreich untersucht.

Bei den ersten Messungen am Demonstrator Fahrtrieb konnte eine massive Erwärmung der Rotorscheiben bereits im Leerlauf beobachtet werden. Die aufgenommenen Verlustleistungen standen dabei in keinem Verhältnis zur mechanischen Leistung. Abbildung 7 zeigt das mit einer Thermokamera aufgenommene Thermogramm einer Rotorscheibe. Die übermäßige Erwärmung der Rotorscheibe (Bildmitte) im Vergleich zum Stator ist deutlich zu erkennen.

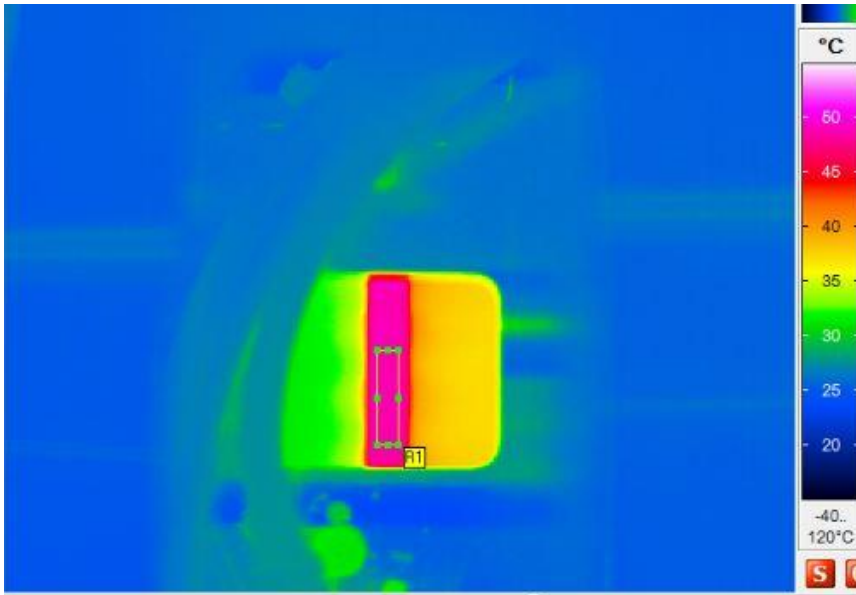


Abbildung 7: Thermogramm einer Rotorscheibe des Radladerantriebs

Als Ursache wurden Wirbelströme in der Rotorscheibe, insbesondere als Ringstrom zwischen innerem und äußerem Rotorzahn, vermutet. Dieser Effekt beschränkte die möglichen Lastmessungen am Objekt. Es wurden deshalb folgende Messungen durchgeführt:

- Schleppmessungen bei $n = (200, 400, \dots, 1200) \text{ min}^{-1}$,
- Leerlaufmessungen bei $n = (100, 200, \dots, 800) \text{ min}^{-1}$ sowie
- zwei Lastmessungen.

Aufgezeichnet wurden dabei jeweils Drehmoment, Drehzahl, Phasenströme, Phasenspannungen, Schein- und Wirkleistungen und Temperaturen. Eine kurze Auswertung gibt eine erste Übersicht über festgestellte Effekte und Probleme. Thermische Messungen konnten aufgrund der oben genannten Erwärmungsproblematik noch nicht bis zum Beharrungszustand geführt werden.

Schleppmessungen

Zur Bestimmung des Reibmomentes wurden zuerst die Schleppmessungen durchgeführt. Der Radlader-Motor wird dabei von der Lastmaschine angetrieben. Die gewonnene Abhängigkeit für die Reibungsverluste wird in Abbildung 8 dargestellt.

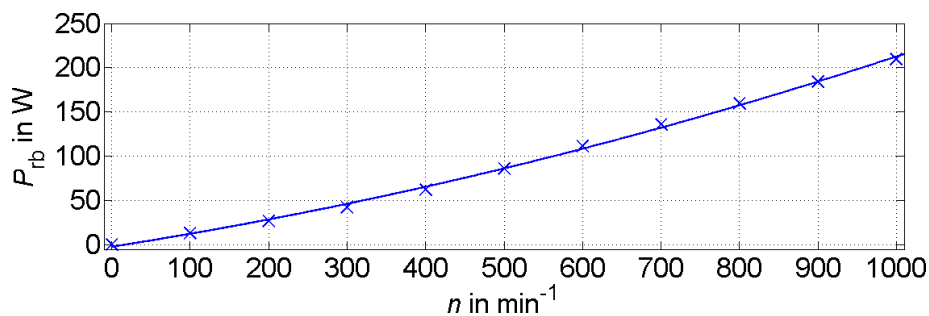


Abbildung 8: Reibleistung des Demonstrators Radlader

Leerlaufmessungen

Der LEANTEC-Motor wurde im Leerlauf, aber mit mechanisch angeschlossener Belastungsmaschine betrieben. Aufgezeichnet wurden die ungefilterten Phasenströme, die Scheinleistung S , die Blindleistung Q und die aufgenommene Wirkleistung P_{el} . Zusätzlich wurde auch die mechanische Leistung P_m protokolliert, die die Reibungsverluste von Belastungsmaschine und Zwischenlager beinhaltet. Die Temperaturen wurden beobachtet, aber nicht gespeichert. Die Gesamtverluste des LEANTEC-Motors bestimmen sich dann nach

$$P_V = P_{el} - P_m \quad (1).$$

Aus den aufgezeichneten Stromkurven können die Kupferverluste P_{VCu} berechnet werden. Die Eisen- und Zusatzverluste P_{FeZ} bestimmen sich somit nach

$$P_{FeZ} = P_V - P_{VCu} - P_{rb} = P_{Fe} + P_Z \quad (2)$$

mit den bereits im Vorfeld gemessenen Reibungsverlusten P_{rb} (siehe *Schleppmessungen*) des LEANTEC-Motors. Diese Differenzverluste enthalten neben den Verlusten P_{Fe} im aktiven Eisen sowie in metallischen Gehäuseteilen auch die Verluste P_Z im Rotorlaminat und sonstige nicht näher bestimmbare Zusatzverluste. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die gemessenen Gesamtverluste und die Eisen- und Zusatzverluste des Demonstrators Radlader bei Leerlauf.

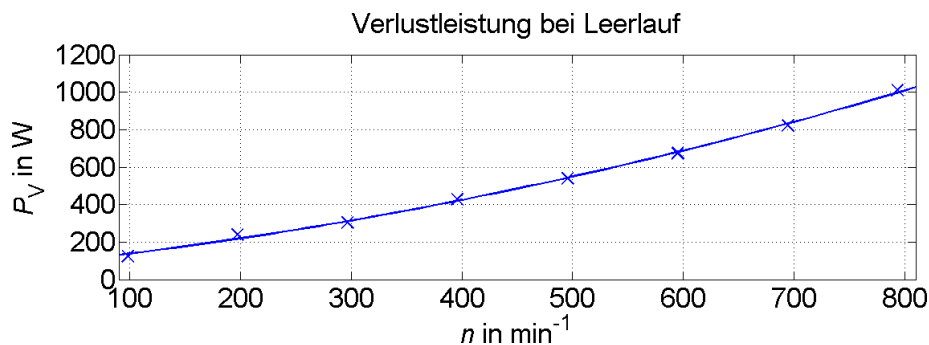


Abbildung 9: Gesamtverluste des Demonstrators Radlader bei Leerlauf

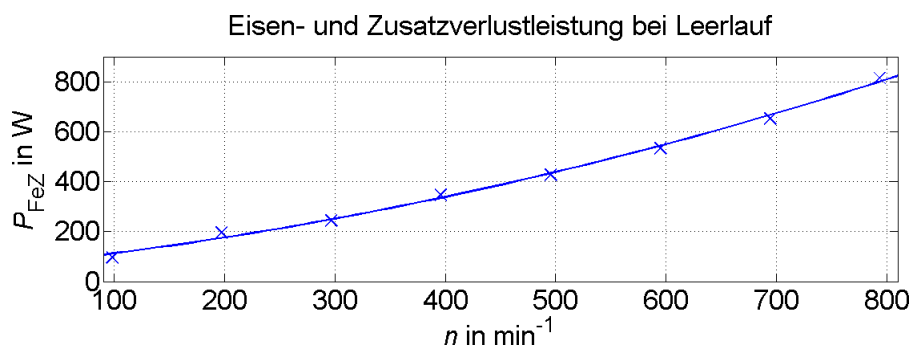


Abbildung 10: Eisen- und Zusatzverluste des Demonstrators Radlader bei Leerlauf

Die Differenz aus beiden Verlustarten bilden die Reibungsverluste der Lastmaschine (als mechanische Leistung an der Drehmomentmesswelle) und die Kupferverluste des Demonstrators. Letztere sind bei Leerlauf aber vernachlässigbar klein und werden hier nicht dargestellt. Bis zu 80 % der Gesamtverluste werden allein im Eisenkreis und als Zusatzverluste wirksam!

Beispielhaft sind in Abbildung 11 gemessene Spannungs- und Stromverläufe aller Phasen für Leerlauf und $n = 700 \text{ min}^{-1}$ dargestellt.

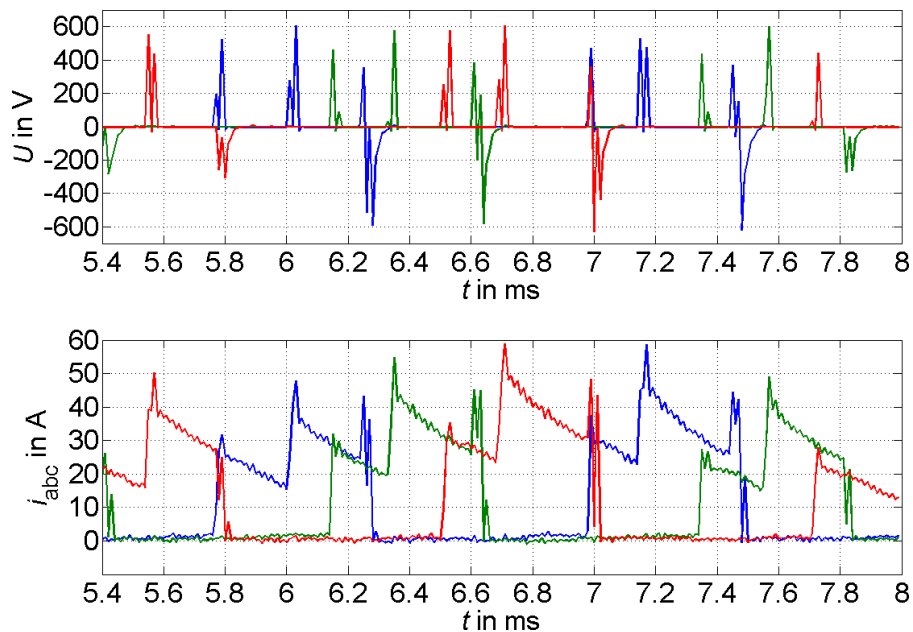


Abbildung 11: Spannungs- und Stromverläufe bei Leerlauf und $n = 700 \text{ min}^{-1}$; blau: Phase A; grün: Phase B; rot: Phase C

Belastungsmessungen

Aus Sicherheitsgründen (siehe Rotorerwärmung in Abbildung 7) wurde vorerst nur mit geringer Belastung gearbeitet. Zunächst wurde durch die Belastungsmaschine eine feste Drehzahl vorgegeben und anschließend am LEANTEC-Motor das Drehmoment bzw. der Strom eingestellt. Aufgezeichnet wurden wieder Ströme, Spannungen, Drehzahl und Drehmoment. Die Temperatur wurde überwacht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Untersucht wurde bei zwei Drehzahlen 400 min^{-1} und 700 min^{-1} .

Tabelle 7: Zusammenfassung der Leistungen bei Belastung

Betriebsart	Last	
Drehzahl n in min^{-1}	400	700
Mechanische Leistung P_{mech} in W	511	697,7
Scheinleistung S in VA	11920	14892
Aufgenommene Wirkleistung P_{el} in W	1862	3307
Gesamtverluste P_V in W	1567	2609
Berechnete Kupferverluste $P_{V\text{Cu}}$ in W	49	60,3
Reibungsverluste P_{rb} in W	62	137
Eisen- und Zusatzverluste P_{FeZ} in W	1454	2405

Bei den Lastversuchen ist auffällig, dass sich der Rotor des LEANTEC-Motors innerhalb kürzester Zeit ($< 5 \text{ min}$) so stark erwärmt, dass Schäden am Material und thermisch induziertes Rotorschleifen nicht mehr ausgeschlossen werden können. Der thermische Beharrungszustand kann damit nicht vermessen werden. Im CFK-Laminat bilden sich Wirbelströme aus, die sowohl für die Erhöhung der Verluste als auch für die starke Rotorerwärmung verantwortlich sind. Die dafür verantwortliche

elektrische Leitfähigkeit in Tangentialrichtung des Rotors konnte anhand von Messungen an einem Referenzrotor und durch FEM-Simulationen bereits nachgewiesen werden.

Thermische Messungen

Zur Überprüfung des thermischen Modells ohne Belastung des Motors wurde eine Messung der Abkühlung durchgeführt. Das war möglich, da die Wasservorlauftemperatur deutlich unter der Raumtemperatur lag. Abbildung 12 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf und die Rechnung unter denselben Bedingungen. Die Übereinstimmung ist gut und bestätigt die Treffsicherheit des thermischen Modells aus TP 1.5 bzw. TP 2.3.

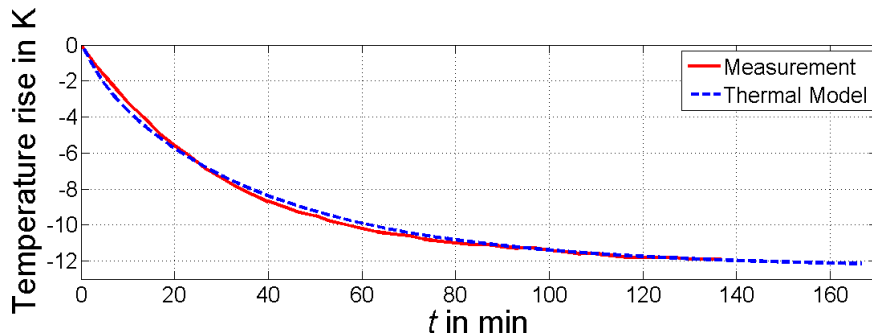


Abbildung 12: Abkühlungsverlauf und Vergleich mit thermischer Rechnung

Schlussfolgerungen

Wesentliche Erkenntnis aus den Messreihen ist, dass die Rotorscheibe, sofern sie aus elektrisch leitfähigem Material besteht, möglichst so ausgeführt werden muss, dass Wirbelströme unterdrückt werden. Die Schlitzung der Rotorscheibe wurde deshalb auch beim Referenzmotor aus Verbundprojekt 2 und beim Demonstrator Extruder Version 2 aus der kostenneutralen Verlängerung umgesetzt.

Weiterhin konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des Betriebsverhaltens eines Motors und der Maßhaltigkeit des Luftspaltes gewonnen werden. Kleinere Probleme mit der Leistungselektronik konnten identifiziert und beseitigt werden.

Zur weiteren Minimierung der Verluste in der Rotorscheibe und insbesondere im Trägermaterial wurden in Zusammenarbeit mit dem Partner IVMA weitere Rechnungen zur Gestaltung bzw. Ausführung der Schlitze durchgeführt. Grenzen setzte dabei immer wieder die geschwächte mechanische Belastbarkeit des Trägermaterials, so dass die vorgestellte Ausführungsvariante (siehe Kapitel 2.2) als elektromechanischer Kompromiss anzusehen ist. Weitere Verbesserungen können nur durch magnetisch und elektrisch nicht leitfähige Scheibenwerkstoffe erzielt werden.

1.5 Zusammenfassung

Für die Anwendungsspezifikationen der vier Demonstratoren liegen folgende Daten fest (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9):

Tabelle 8: Daten für Extruder und Rundtisch

	Extruder	Rundtisch
Maximalmoment M_{\max} in Nm	1500	2000
Maximaldrehzahl n_{\max} in min^{-1} bei M_{\max}	40	10
Dauerdrehmoment in Nm/bis n in min^{-1}	1000/600	2000/10
Maximalleistung P_{\max} in kW	63	2

Tabelle 9: Daten für Spannvorrichtung und Radlader

	Spannvorrichtung	Radlader
Maximalmoment M_{\max} in Nm	500	600
Maximaldrehzahl n_{\max} in min^{-1} bei M_{\max}	1312	260
Dauerdrehmoment in Nm/bis n in min^{-1}	500/1500	100/1700
Maximalleistung P_{\max} in kW	83	27

Aus den vorangestellten Überlegungen lässt sich das in Abbildung 13 dargestellte Spinnendiagramm destillieren, in dem die Anforderungen an alle Demonstratoren übersichtlich dargestellt werden. Anhand des maximal geforderten Drehmomentes werden zwei Motortypen abgeleitet, die alle projektierten Anwendungen abdecken (siehe Tabelle 10).

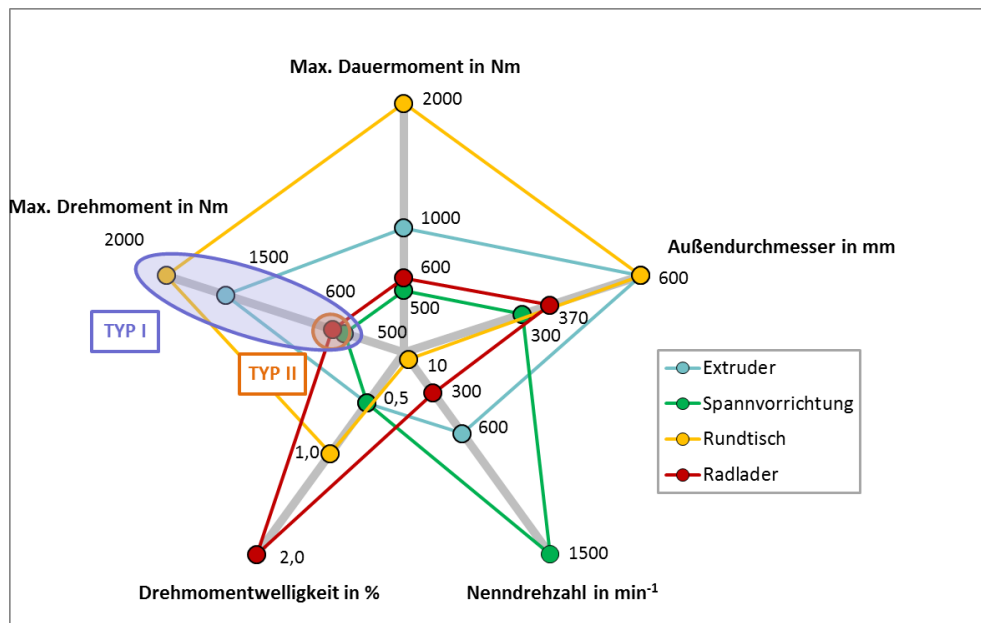


Abbildung 13: Anforderungsspinne aller Demonstratoren mit abgeleiteten Motortypen (TYP I und TYP II)

Tabelle 10: Parameter der Demonstratorantriebe

	Extruder	Rundtisch	Spannvor- richtung	Radlader
Motorklasse	Typ I			Typ II
Bemessungsdrehmoment in Nm	1816			602
Aktivdurchmesser in mm	357			240
Zahnhöhe in mm	26			
Polzahl	146			72
Drehzahl bei Bemessungsmoment in min ⁻¹	435			420
Drehmoment in Nm	1000		500	600
Drehzahl in min ⁻¹	792		1580	429
Leistung in kW	83			27
Masse der Aktivteile in kg	100,2			67,3
Bauhöhe (etwa), Stator + Rotor in mm	277			277
Drehmomentdichte bez. auf Aktivteile in Nm/kg	18,1			12,4
Leistungsdichte in kW/kg	0,83			0,4
Windungszahl je Phase	2 x 4			8
Strom in A	2 x 400			400
Spannung in V	1000			600
Umrichter Ausführung	Boost			Asymmetr. Halbbrücke

1.6 AP 3.6 Vorstandstätigkeit und Regionalmanagement

Der Projektleiter des TP 3.5 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 (kostenneutrale Verlängerung)

Mit der Zwischenbegutachtung durch den Projektträger am 24.02.2014 wurde rückwirkend der von den Bündnispartnern einstimmig beschlossene und eingereichte Arbeitsplan für die Zeit vom 01.01.2014 bis 28.02.2014 genehmigt.

In der o. g. Zeitspanne wurden die Bündniskräfte insbesondere auf die Erfassung des IST-Zustands und die Strategieentwicklung, die Herstellung der Prüffähigkeit, die dynamischen und statischen Messungen, die Überprüfung/Anpassung/Validierung der Berechnungsmodelle sowie auf eine konstruktionskritische Analyse der vier Demonstratoren konzentriert.

Für das hier beschriebene Teilprojekt wurde durch den Projektträger eine Kostenneutrale Verlängerung unter Aufhebung einer Zweckbindung der genehmigten Finanzmittel bewilligt.

2.1 AP 3.5.6.1.1 Projektierungstools

Prinzipiell ist ein rudimentäres Projektierungstool vorhanden, welches jedoch aufgrund der eingeschränkten oder nicht vorhandenen Funktionstüchtigkeit der Demonstratoren nicht verifiziert werden konnte.

2.2 AP 3.5.6.1.2 Normengerechte Erprobung und Dauerversuche

AP 3.5.6.1.2.1 Normengerechte Erprobung

Normengerechte Erprobungen waren aufgrund ständig und wiederholt auftretender mechanischer, thermischer und Dichtigkeitsproblemen des Kühlkreislaufs nicht möglich.

Deshalb erfolgte eine Konzentration der Kapazitäten auf die Lösung eines schwerwiegenden Erwärmungsproblems an den Rotorscheiben (siehe Kapitel 1.4.3). Gemäß der Vermutung, dass Wirbelströme entlang tangential verlaufender Strombahnen im Rotor fließen, wurde der Motor demontiert und das in tangentialer Richtung leitfähige CFK zwischen den Zähnen aller Rotorscheiben entfernt, um geschlossene Wirbelstrombahnen zu verhindern. Der Demonstrator mit nun „geschlitzter“ Rotorscheibe (siehe Abbildung 14) wurde wieder aufgebaut und erneut vermessen. Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Schleppmessungen bei $n = (200, 400, \dots, 1000) \text{ min}^{-1}$,
- Leerlaufmessungen bei $n = (100, 200, \dots, 900) \text{ min}^{-1}$ sowie
- Lastmessungen bei $n = (100, 200, \dots, 700) \text{ min}^{-1}$ und $M = (10, 20, 30, 40) \text{ Nm}$ (soweit erreichbar).

Aufgezeichnet wurden dabei jeweils Drehmoment, Drehzahl, Phasenströme, Phasenspannungen, Schein- und Wirkleistungen und Temperaturen. Die Messungen sollen mit den ursprünglichen Messungen am Motor mit der ungeschlitzten Rotorscheibe (siehe Kapitel 1.4.3) verglichen werden.

Zusätzlich konnten noch mechanische Unregelmäßigkeiten und Störungen durch elektromagnetische Felder beobachtet werden, auf die im Folgenden ebenfalls eingegangen wird.



Abbildung 14: Zwischen den Zähnen geschlitze Rotorscheibe (Ausschnitt)

Schleppmessungen

Zur Bestimmung des Reibmomentes wurden zuerst die Schleppmessungen durchgeführt. Der Radlader-Motor wird dabei von der Lastmaschine angetrieben. Die gewonnene Abhängigkeit für die Reibungsverluste wird in Abbildung 15 dargestellt. Die Neuvermessung ergab eine Reduzierung der Reibverluste gegenüber der ersten Messung. Das ist auf mechanische Einflüsse auf die Messwelle durch den Umbau des Versuchstandes (Verspannungen in den Lagern, andere Ausrichtung der Wellen etc.) zurückzuführen und muss bei den folgenden Auswirkungen berücksichtigt werden.

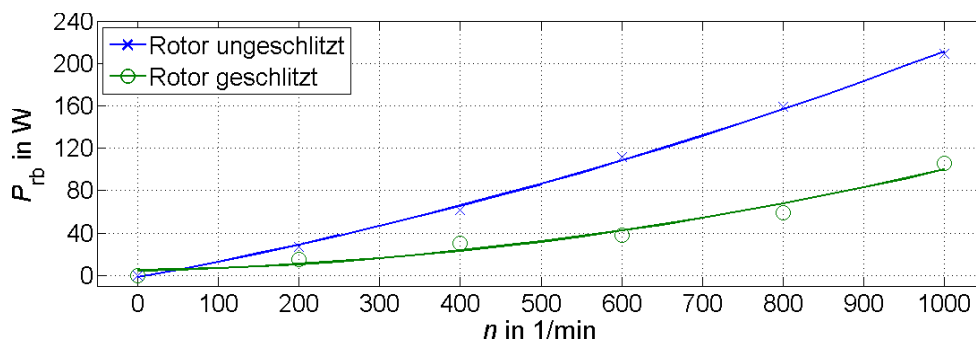


Abbildung 15: Verlauf der Reibungsverluste über der Drehzahl

Auffällig ist eine leichte Abweichung des erwarteten Kurvenverlaufs bei ca. 400 min^{-1} hin zu einem größeren Reibmoment.

Leerlaufmessungen

Der LEANTEC-Motor wurde im Leerlauf, aber mit mechanisch angeschlossener Belastungsmaschine betrieben. Aufgezeichnet wurden die ungefilterten Phasenströme, die Scheinleistung S , die Blindleistung Q und die aufgenommene Wirkleistung P_{el} . Zusätzlich wurde auch die mechanische Leistung P_m protokolliert, die die Reibungsverluste von Belastungsmaschine und Zwischenlager beinhaltet. Die Temperaturen wurden beobachtet. Die Gesamtverluste des LEANTEC-Motors bestimmen sich dann nach

$$P_V = P_{el} - P_m \quad (3).$$

Aus den aufgezeichneten Stromkurven können die Kupferverluste P_{VCu} berechnet werden. Die Eisen- und Zusatzverluste P_{FeZ} bestimmen sich dann nach

$$P_{FeZ} = P_V - P_{VCu} - P_{rb} = P_{Fe} + P_Z \quad (4)$$

mit den bereits im Vorfeld gemessenen Reibungsverlusten P_{rb} (siehe *Schleppmessungen*) des LEANTEC-Motors. Diese Differenzverluste enthalten neben den Verlusten P_{Fe} im aktiven Eisen sowie in metallischen Gehäuseteilen auch die Verluste P_Z im Rotorlaminat und sonstige nicht näher bestimmbare Zusatzverluste.

In Abbildung 16 bis Abbildung 19 werden die gemessenen Leistungen über der Drehzahl dargestellt. Zusätzlich sind in den Diagrammen auch stets die Leistungskurven der ungeschlitzten Rotorscheibe enthalten.

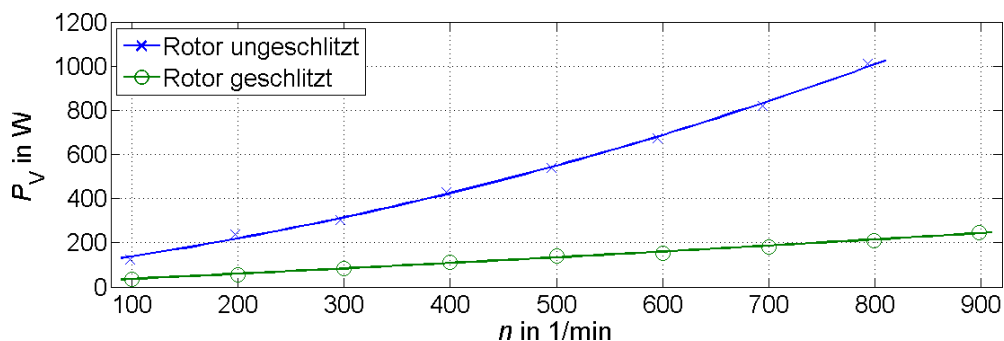


Abbildung 16: Vergleich der gesamten Verlustleistung bei Leerlauf zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

Die Gesamtverluste werden aus der Differenz der gemessenen Gesamtwirkleistung und der gemessenen mechanischen Leistung gebildet. Der Vergleich zwischen geschlitzter und ungeschlitzter Rotorscheibe zeigt, dass durch die Schlitzung die Verluste bei gleicher Drehzahl auf unter 20 % absinken. Deutlich wird das Absinken der Rotorverluste auch daran, dass es bei Leerlauf praktisch zu keiner Erwärmung des Rotors mehr kommt. Die Übertemperaturen an der Außenseite der Rotorscheibe bleiben dabei unter 5 K, trotz zeitlich sehr umfangreicher Messreihen.

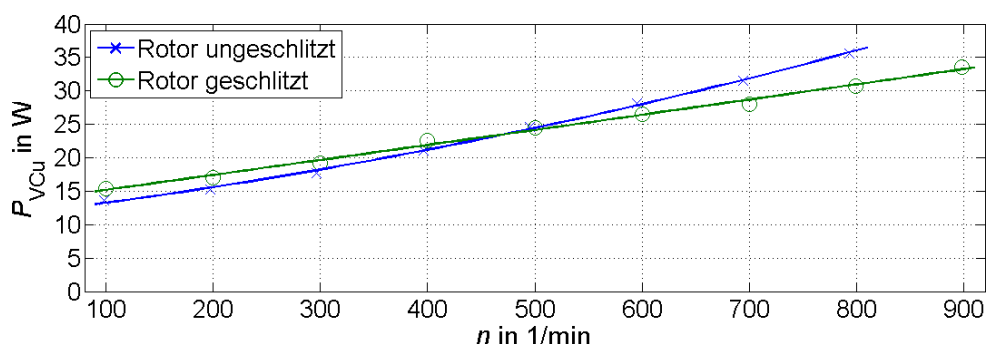


Abbildung 17: Vergleich der berechneten Kupferverluste bei Leerlauf zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

Die Kupferverluste bleiben nahezu konstant. Bei kleineren Drehzahlen sind die Kupferverluste mit geschlitztem Rotor etwas größer, während bei Drehzahlen über 500 min^{-1} die Verluste bei ungeschlitzter Scheibe überwiegen. Die zur Berechnung der Stromverdrängungsfaktoren und

Kupferverluste herangezogenen Stromverläufe (siehe Abbildung 18) wurden bei allen Messungen ohne Filter aufgezeichnet und ausgewertet.

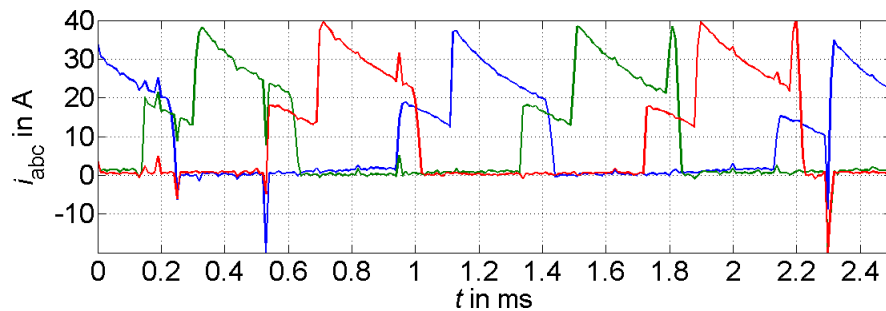


Abbildung 18: Gemessene Stromverläufe bei Leerlauf und $n = 700 \text{ min}^{-1}$ für den geschlitzten Rotor; blau: Phase A; grün: Phase B; rot: Phase C

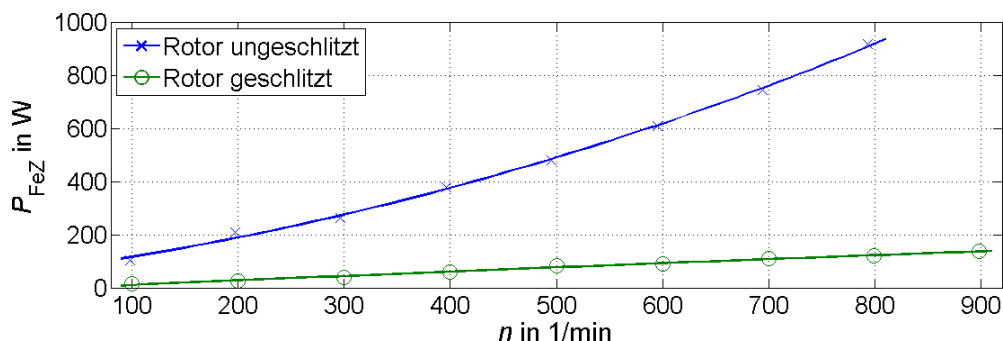


Abbildung 19: Vergleich der Eisen- und Zusatzverluste bei Leerlauf zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

In den verbleibenden Eisen- und Zusatzverlusten (Abbildung 19) ist der Einfluss der Schlitzung am deutlichsten zu erkennen. Die große Differenz zwischen geschlitzter und ungeschlitzter Rotorscheibe ist vor allem durch eine drastische Reduzierung der Rotorverluste erklärbar. Das Unterbrechen der tangentialen Wirbelstrombahnen zwischen innerem und äußerem Rotorzahn hat hier offensichtlich einen wirksamen Effekt.

Belastungsmessungen

Der Vergleich zwischen geschlitzter und ungeschlitzter Rotorscheibe soll auch für verschiedene Belastungspunkte durchgeführt werden. Dabei wurden für Drehzahlen von $n = (100, 200, \dots, 700) \text{ min}^{-1}$ jeweils die Drehmomente von $M = (10, 20, 30, 40) \text{ Nm}$ angefahren. Bei Drehzahlen über 400 min^{-1} konnte ein Drehmoment von 40 Nm oder mehr nicht erreicht werden. Bei Stromspitzenwerten über 200 A kam es immer wieder zum Abschalten des Umrichters, so dass der Sollstrom maximal auf ca. 200 A Spitzenwert eingestellt werden durfte. Zusätzlich konnte akustisch ein Schleifen des Rotors festgestellt werden. Der genaue Einsetzpunkt des Schleifens war aber stark drehzahl- und drehmomentabhängig und konnte nicht eindeutig festgelegt werden. Aufgrund der kurzen Messdauer kam es erneut zu keiner kritischen Erwärmung der Rotorscheibe. Thermischer Verzug als alleinige Ursache für das Schleifen ist also unwahrscheinlich. Das wurde auch dadurch gestützt, dass bei Messungen am kalten Motor das Schleifen bei bestimmten Betriebspunkten (nicht ausschließlich, aber vor allem um 400 min^{-1}) sofort einsetzte, ohne dass es überhaupt zu einer messbaren Erwärmung gekommen wäre. Auch nach umfangreichen Belastungsmessungen stiegen die gemessenen Übertemperaturen an Rotor und Stator nicht über 20 K an, was nach den

mechanischen Simulationen noch zu wenig war, um ein Schleifen durch thermischen Verzug zu erzeugen.

Die Messungen am ungeschlitzten Rotor wurden aufgrund der sehr starken Rotorerwärmung nur für zwei Betriebspunkte bei $M = 10 \text{ Nm}$ und $n = (400, 700) \text{ min}^{-1}$ durchgeführt.

Im Folgenden sind wieder die Leistungsverläufe über der Drehzahl dargestellt. Eine Gruppierung der Kurven erfolgt dabei anhand des eingestellten Drehmoments. Da alle Messwerte bei 400 min^{-1} als zweifelhaft angesehen werden müssen, wurden sie bei Bildung der Trendkurven nicht berücksichtigt.

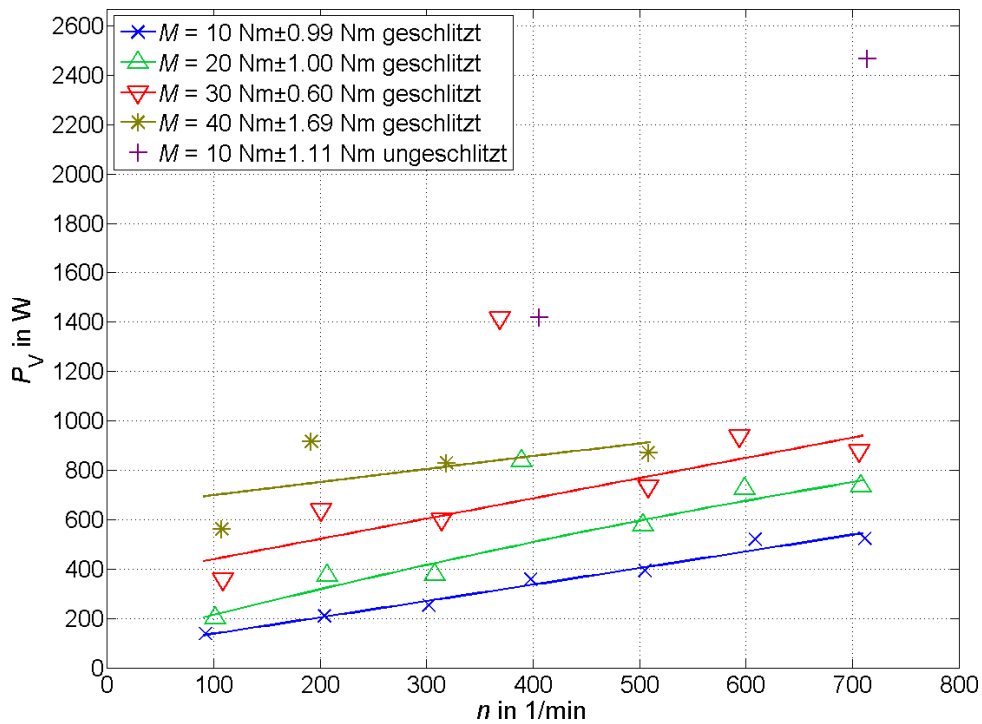


Abbildung 20: Vergleich der Gesamtverlustleistung bei Belastung zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

Die gesamte Verlustleistung in Abbildung 20 kann durch die Schlitzung wieder stark reduziert werden. Ähnlich wie bei der Scheinleistung ist auch hier eine Spitze in der Leistungsaufnahme bei 400 min^{-1} zu erkennen. Kleinere Leistungsspitzen treten bei 200 min^{-1} und 600 min^{-1} auf.

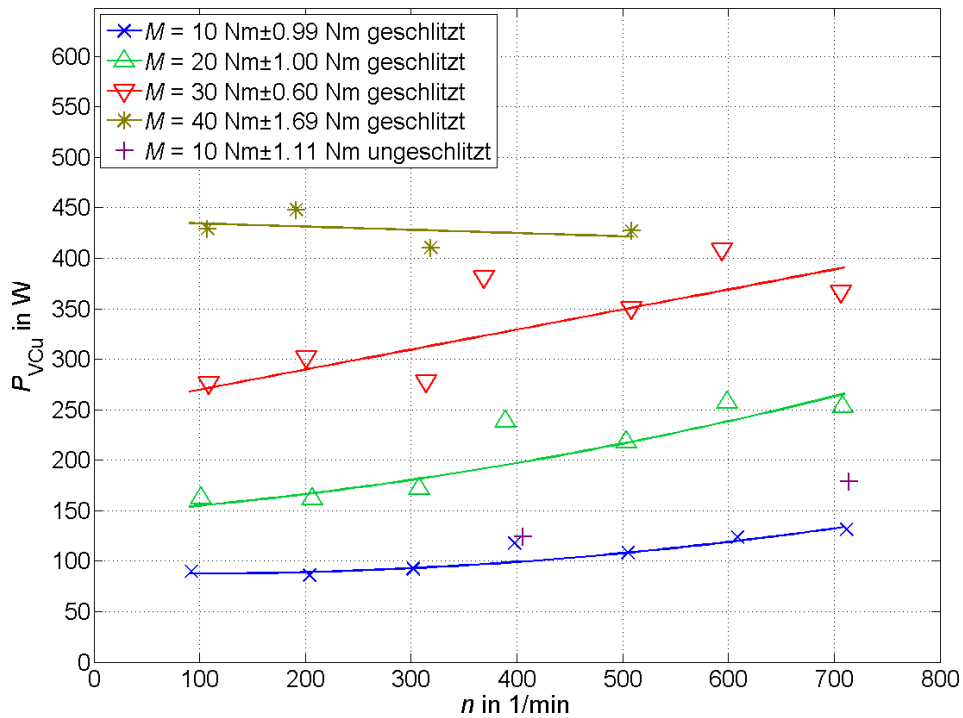


Abbildung 21: Vergleich der Kupferverluste bei Belastung zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

Die Kupferverluste in Abbildung 21 zeigen, wie erwartet, eine deutliche Abhängigkeit vom Drehmoment. Zwischen geschlitzter und ungeschlitzter Scheibe gibt es bei 400 min^{-1} fast keine Abweichung und bei 700 min^{-1} eine deutliche Differenz. Die Stromverdrängungsfaktoren und die Stromeffektivwerte sind bei der geschlitzten Scheibe etwas kleiner als bei der ungeschlitzten. Da der Wert der geschlitzten Rotorscheiben bei 400 min^{-1} zweifelhaft ist, gibt Tabelle 11 eine kleine Übersicht für Phase B nur bei 700 min^{-1} . So ist der Effektivwert des Stromes etwa gleich groß, der Stromverdrängungsfaktor der ungeschlitzten Scheibe aber deutlich größer. Es ist wahrscheinlich, dass die Unterschiede in der Stromform zu finden sind, ein direkter Vergleich dieser ist aber aufgrund starker Signalstörungen (siehe Abschlussbericht zu TP 2.3) nicht möglich.

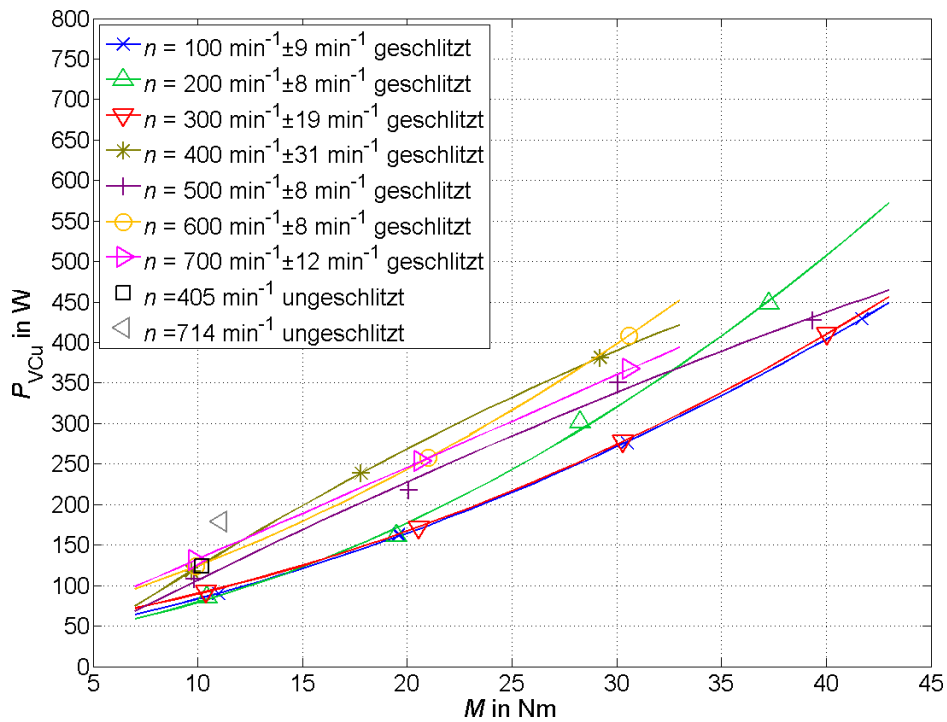


Abbildung 22: Kupferverluste bei Belastung über dem Drehmoment; Kurven geordnet nach Drehzahl

Die Kupferverluste sind in Abbildung 22 über dem Drehmoment mit der Drehzahl als variablem Parameter dargestellt. Im Trend ist eine quadratische Abhängigkeit der Verluste vom Drehmoment erkennbar. Auch hier kann wieder beobachtet werden, dass die Kupferverluste bei 200 min^{-1} , 400 min^{-1} und 600 min^{-1} größer sind bzw. stärker steigen als bei den anderen Drehzahlen.

Tabelle 11: Vergleich der Stromverdrängungsfaktoren und Stromeffektivwerte für Phase B bei $n = 700 \text{ min}^{-1}$ und $M = 10 \text{ Nm}$

$n \text{ in min}^{-1}$	k_r		$I \text{ in A}$	
	geschlitzt	ungeschlitzt	geschlitzt	ungeschlitzt
700	2,57	3,03	40,66	40,01

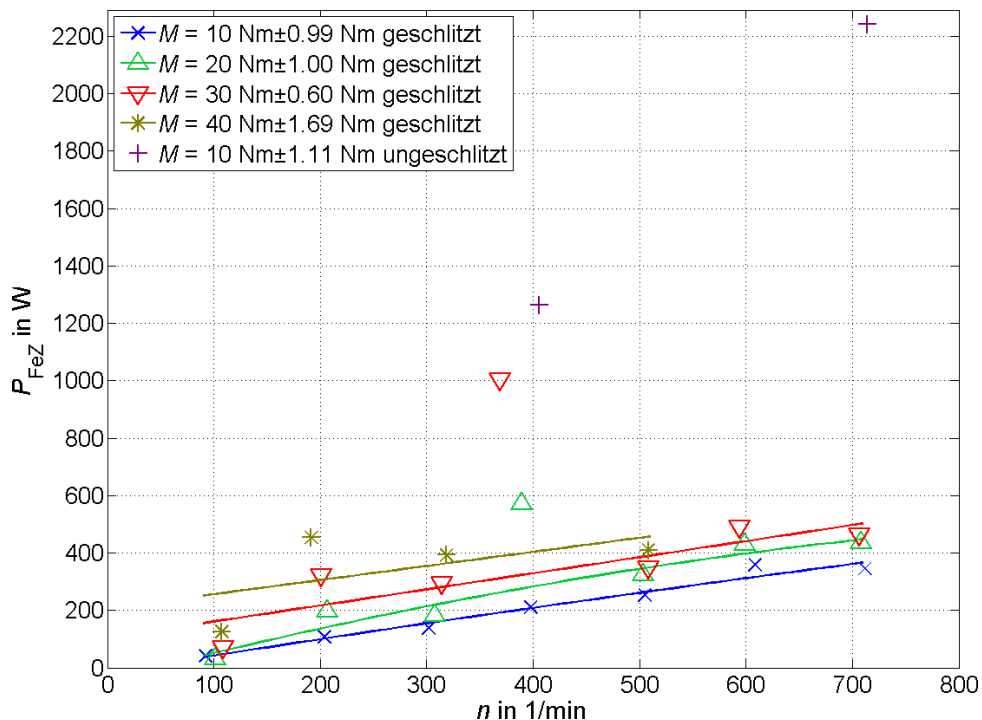


Abbildung 23: Vergleich der Differenzleistung (Eisen- und Zusatzverluste) bei Belastung zwischen ungeschlitzter und geschlitzter Rotorscheibe

Wie auch bei Leerlauf stellen die Eisen- und Zusatzverluste in Abbildung 23 den größten Anteil an den Gesamtverlusten. Das deckt sich mit den Vorausberechnungen der Verluste, wonach die Eisenverluste weitaus größer sind als die Kupferverluste. Auch hier sind große Leistungsspitzen bei 400 min^{-1} zu erkennen. Eine deutliche Reduzierung der Eisen- und Zusatzverluste durch die Schlitzung ist erkennbar.

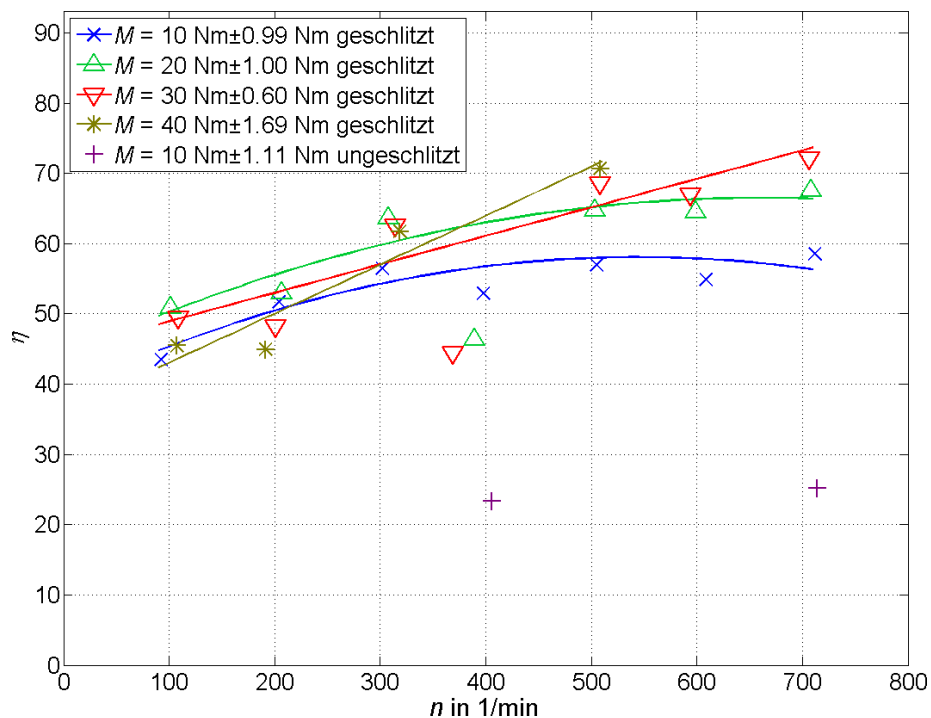


Abbildung 24: Motorwirkungsgrade der aufgenommenen Arbeitspunkte

Die Berechnung des Motorwirkungsgrades η erfolgt nach der Formel

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (5).$$

Der Wirkungsgrad steigt tendenziell mit Drehzahl und Drehmoment (siehe Abbildung 24). Bei einer Belastung von $M = 10 \text{ Nm}$ kann ein Maximum bei ca. 500 min^{-1} beobachtet werden. Bei anderen Drehmomenten ist ein solches Maximum ebenfalls zu erwarten, allerdings reichen die Messungen nicht weit genug. Während bei ungeschlitzten Rotorscheiben der Wirkungsgrad des Motors bei lediglich ca. 25 % liegt, können durch die Schlitzung bei gleicher Belastung bereits Werte von ca. 55 % erreicht werden. Auch hier zeigt sich erneut der positive Einfluss der Schlitzung. Das erreichte Moment von 40 Nm entspricht 20 % des Maximaldrehmoments von etwa 200 Nm. Zum Vergleich wurde für eine Drehzahl von $n = 500 \text{ min}^{-1}$ der Wirkungsgrad nochmals über dem Drehmoment dargestellt (siehe Abbildung 25), wobei der Wirkungsgrad erkennbar mit dem Drehmoment steigt.

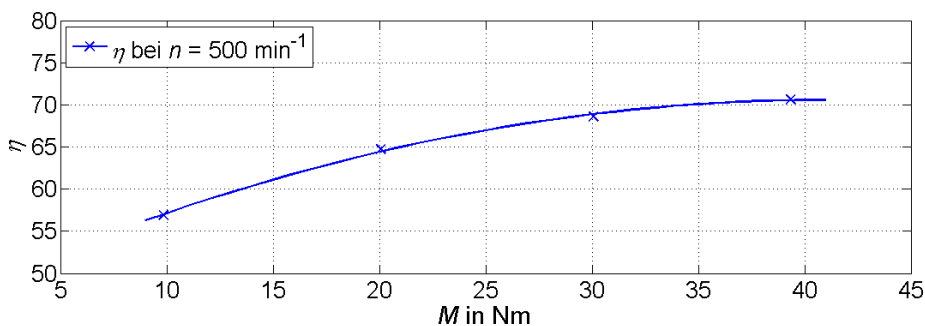


Abbildung 25: Motorwirkungsgrade der aufgenommenen Arbeitspunkte

AP 3.5.6.1.2.2 Dauerversuche

Dauerversuche im Sinne eines Betriebs bei kontinuierlicher Belastung im thermischen Beharrungszustand konnten an keinem der Demonstratoren durchgeführt werden. Alle Demonstratoren hatten mehr oder weniger starke Einschränkungen in der Drehzahl und/oder in der Last, bzw. konnten durch thermische Verformungen/Dehnungen nicht dauerhaft stationär betrieben werden.

3 Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten im Teilprojekt 3.5 waren die Personalkosten für den wissenschaftlichen Mitarbeiter nach der Gehaltsgruppe TV-L-Ost E13 und für die wissenschaftlichen/studentischen Hilfskräfte (Summe 182.932,58 €). Der Posten der Aufträge stellte den zweitgrößten Anteil an den Kosten (3510,50 €). Mit Hilfe der Aufträge wurden hauptsächlich Materialproben hergestellt und Messungen zur Materialkennwertermittlung der magnetischen Aktivteile durchgeführt. Die sonstigen Aufwendungen fielen unter die Posten der Geräte und Dienstreisen (Summe 8.940,33 €).

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aus der Fertigung und der Vermessung der Demonstratoren konnten grundlegende Erkenntnisse zum Betriebsverhalten und Betriebsproblemen dieses Antriebstyps gewonnen werden. Das umfasst den Motor selbst, aber auch die Leistungselektronik. Es wurde Verbesserungs- und Optimierungspotential aufgedeckt und am Referenzmotor aus VP2 sowie im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung auch am Demonstrator Extruder V2 in verbesserte Antriebe umgesetzt.

5 Voraussichtlicher Nutzen

Der entscheidende Nutzen liegt in der Verwertung der Ergebnisse innerhalb des LEANTEC-Bündnisses, beispielsweise hinsichtlich einer Optimierung zukünftiger Antriebsgenerationen. 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 (TFRM), versuchen den Kupferbedarf zu senken und auf seltene Erden zu verzichten. Als Unterschiede können der Fokus auf ein fehlertolerantes Antriebssystem und die Beschränkung auf ein konkretes Anwendungsgebiet genannt werden.

7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

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

Literaturverzeichnis

- [Bar13] H. Barth, F. Bahr, N. Hildebrand, W. Hofmann: Einsatz weichmagnetischer Pulververbundwerkstoffe in energieeffizienten Transversalflussmaschinen. Int. ETG-Kongress 2013, ETG-Fachbericht 04-01-02, Berlin 2013, 9 Seiten
- [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

III Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage

IV Kurzfassung - Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Nicht geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht VP3 „Demonstratoren für vier Zielanwendungen“ Teilprojekt 3.5 – Anwendungsspezifische Antriebsauslegung und Motorerprobung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Steinborn, Gunar	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2014
	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dresden Fakultät Elektrotechnik Elektrotechnisches Institut Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe Görges-Bau, Helmholtzstr. 9, 01069 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution TB 05/2015
	10. Förderkennzeichen 03WKBY03E
	11. Seitenzahl 45
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 30
	14. Tabellen 11
	15. Abbildungen 25
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	

18. Kurzfassung

Konkrete Anwendungen für eine Transversalfluss-Reluktanzmaschine sind bislang nicht bekannt. Im Rahmen des Teilprojekts 3.5 sollen LEANTEC-Antriebe für festgelegte industrielle Anwendungen entwickelt werden. Ziel des TP ist dabei die Ermittlung der Anforderungen, die sich aus den Anwendungen ergeben, und daraus die Auslegung der entsprechenden Antriebe und das Festschreiben der Antriebsparameter in einem Pflichtenheft.

Die Auslegung der Antriebe erfolgt dabei mit in den Teilprojekten 1.5 und 2.3 entwickelten Modellen und Methoden. Wo möglich, werden für ähnliche Anforderungen baugleiche Motoren ausgelegt, die sich nur in den Bemessungsdaten unterscheiden. Damit können im Rahmen der Entwicklung und Fertigung viele Ressourcen eingespart werden. Im Ergebnis werden zwei Motortypen unterschiedlicher Geometrie festgelegt, mit denen alle Anwendungen abgedeckt sind.

Für alle projektierten Motoren ist nach deren Fertigstellung eine umfangreiche Messkampagne vorgesehen, um die Einhaltung der Anforderungen zu prüfen. Dabei festgestellte Probleme dienen der weiteren Optimierung der LEANTEC-Motoren.

19. Schlagwörter

LEANTEC, Antrieb, Elektromotor, Elektrische Maschine, Transversalfluss, Reluktanz, Reluktanzkraft, Transversalfluss-Reluktanzmaschine, TFRM, Wachstumskern, Unternehmen Region, Direktantrieb, Radlader, Rundtisch, Extruder, Spannmittel, Messungen

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 3 – „Demonstrators for four industrial applications“ Sub-project 3.5 – Application-based drive design and motor testing	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hofmann, Wilfried; Hildebrand, Nicol; Döring, Jan; Steinborn, Gunar	5. end of project 31.12.2014
	6. publication date -
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address) Dresden University of Technology Faculty of Electrical and Computer Engineering Department of Electrical Machines and Drives Helmholtzstr. 9, 01069 Dresden	9. originator's report no. TB 05/2015
	10. reference no. 03WKBY03E
	11. no. of pages 45
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 30
	14. no. of tables 11
	15. no. of figures 25
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	

18. abstract

Specific applications for transverse flux reluctance machines are currently unknown. In the scope of sub-project 3.5, LEANTEC-drives for given industrial applications should be developed. Goal of the sub-project is the evaluation of application demands and, following from that, design of fitting drives. The drive parameters were codified within a specification sheet.

Drive design relies on the methods developed in sub-projects 1.5 and 2.3. Where applicable, identically constructed motors that only differ in rated values were designed for similar application demands. That allows for major savings on resources within development and production. As a result only two types of LEANTEC-motors fit for all given applications.

All projected motors shall be measured thoroughly after production to ensure compliance with the application demands. Any problems found during these measurements further help the optimization process of the LEANTEC-drives.

19. keywords

LEANTEC, drive, electric motor, electrical machine, transverse flux, reluctance, reluctance force, transverse flux reluctance machine, TFRM, direct drive, wheel loader, rotary table, extruder, tensioning mean, measurements

20. publisher

-

21. price

-