

Konzeptstudie zum dieselelektrischen Fahrtrieb einer Transportraupe

Modellierung eines dieselelektrischen Fahrtriebs mittels SimulationX®

Dipl.-Ing. Peter Mischek, Dipl.-Ing. Thomas Hentschel,

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze

Technische Universität Dresden



tu-dresden.de/bft

Durch die Gesetzgebung werden zukünftig immer strengere Energie- und Emissionsgrenzwerte vorgegeben, die von den Herstellern Mobiler Arbeitsmaschinen eingehalten werden müssen. Zum Erreichen dieser Ziele sind Prinzipien der Leistungswandlung mit höherem Wirkungsgrad gefragt. Die Kombination des Dieselmotors mit elektrischer Leistungsübertragung ist eine Möglichkeit den Gesamtwirkungsgrad von Antriebssystemen zu erhöhen.

Im nachfolgenden Beitrag wird exemplarisch die Konzipierung eines dieselelektrischen Fahrtriebs für die Transportraupe RT350 der Fa. TAKRAF GmbH durchgeführt. Neben der Auswahl eines favorisierten Antriebskonzepts wurden Simulationsuntersuchungen hinsichtlich des prozessabhängigen, energetischen Systemverhaltens mittels SimulationX® durchgeführt.

1 Motivation und Zielstellung

Die Konzipierung von Antriebssystemen für mobile Arbeitsmaschinen findet nach verschiedenen Gesichtspunkten wie z. B. Leistungsdichte, Bauraumdimensionierung, Anschaffungskosten, Steuer- und Regelungseigenschaften usw. statt. Dabei muss zunächst die Frage des Grundkonzeptes – hydraulische oder elektrische Leistungsübertragung/-wandlung – geklärt werden. Der hier veröffentlichte Beitrag zur Konzipierung eines dieselelektrischen Fahrtriebs der Transportraupe RT350 der Fa. TAKRAF GmbH stellt einen Auszug aus der Diplomarbeit [1] dar. Dabei sollte zunächst ein favorisiertes Lösungskonzept für die Referenzmaschine entwickelt werden. Anschließend fand sowohl die Modellierung der Referenzmaschine und -prozess als auch energetische Simulationsuntersuchung von unterschiedlichen Betriebspunkten der Referenzmaschine statt.

2 Bestandsaufnahme der Referenzmaschine

Basisdaten und Fahrtrieb

Die Transportraupe RT350 der Fa. TAKRAF GmbH verfügt über eine installierte Dieselmotorleistung von 480 kW und besitzt eine Eigenmasse von ca. 125 t. Mit der maximalen Transportzuladung von 350 t und einem Steigungswinkel der Fahrbahn von 9,5 ° ist eine Geschwindigkeit von 15 m/min erreichbar. Die Maximalgeschwindigkeit von 33 m/min ist im unbeladen Zustand bei Steigungswinkeln von 0 bis 9,5 ° erzielbar.

Beide Kettenfahrwerke besitzen jeweils das gleiche mechanisch-hydrostatische Antriebssystem, siehe **Bild 1**. Der dabei eingesetzte geschlossene Hydrostat besteht aus einer Verstellpumpe und zwei parallelgeschalteten Verstellmotoren. Ein Turasgetriebe sorgt für die Drehzahlanpassung zwischen

beiden Verstellmotoren und Turaswelle/Kettentrieb. Mit einem Pumpenverteilergetriebe (PVG) erfolgt die Drehzahlanpassung zwischen Dieselmotor und der Verstellpumpen.

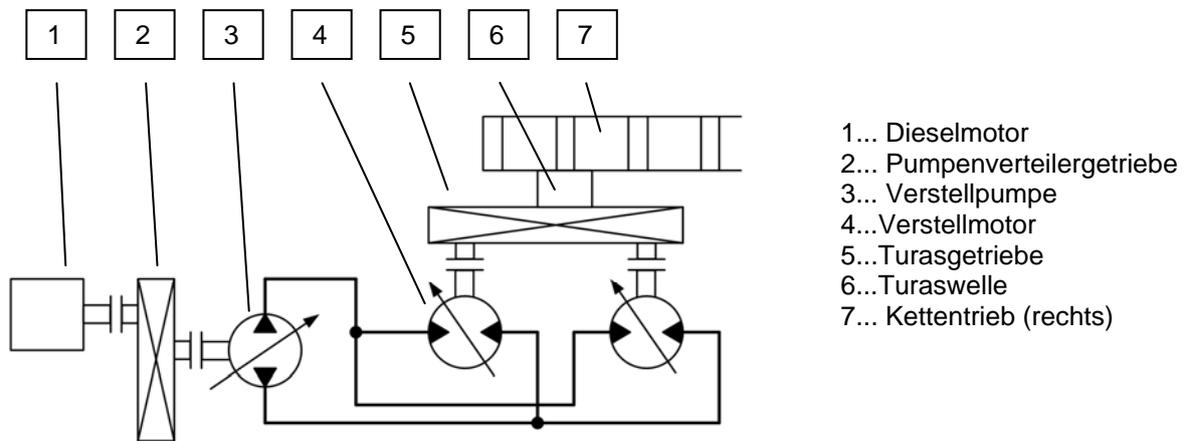


Bild 1: Prinzipskizze des rechten Fahrtriebs der RT350

2.1 Technologischer Leistungsbedarf

Für die spätere Bemessung der elektrischen Antriebskomponenten wurden die charakteristischen Betriebspunkte der drei wählbaren Fahrstufen der RT350 analysiert. Dies ist für die Beibehaltung der technologischen Leistungsfähigkeit unerlässlich. Die in **Bild 2** dargestellten Leistungswerte repräsentieren die erforderliche Eingangsleistung je Turasgetriebe.

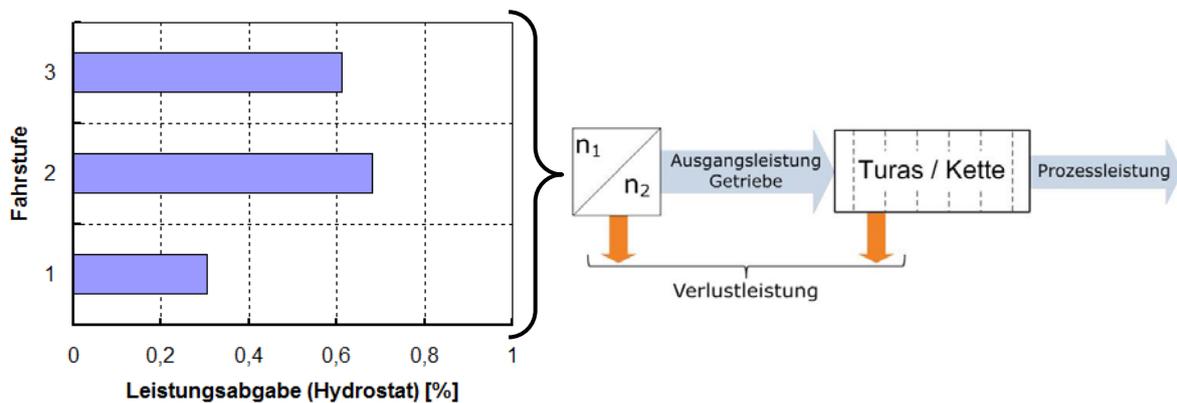


Bild 2: Leistungsfluss vom Hydrostaten bis zum Prozess

3 Konzeption des elektrischen Antriebssystems

3.1 Konzeptvarianten

Zum Anfang der Konzeption sind vier Lösungsvarianten erstellt worden, die durch ausschließliche Verwendung der Drehstromtechnik charakterisiert sind (**Tabelle 1**). Gleichstrommaschinen fanden aufgrund der geringen Leistungsdichte und des geringen Wirkungsgrades keine Verwendung.

	Generator	Leistungswandlung	Motor
Konzept 1	PMSM	Frequenzumrichter	ASM
Konzept 2	PMSM	Frequenzumrichter	PMSM
Konzept 3	PMSM	Frequenzumrichter	TFM
Konzept 4	PMSM	Frequenzumrichter	SRM

Tabelle 1: Konzepte der elektrischen Leistungswandlung

Alle vier aufgelisteten Konzepte verwenden die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) als Generator und die Leistungswandlung übernimmt ein Frequenzumrichter (FU). Verschiedene Motortypen unterscheiden die vier Konzepte. Im Einzelnen sind dies die Asynchronmaschine (ASM), die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM), die Transversalflussmaschine (TFM) und die geschaltete Reluktanzmaschine SRM.

3.2 Bewertung der Konzeptvarianten

Zur systematischen Herausarbeitung des favorisierenden Konzeptes ist eine gewichtete Bewertung nach VDI 2225 durchgeführt worden (**Tabelle 2** und **Tabelle 3**). Die höchste Wichtung weisen hierbei die Kriterien Wirkungsgrad und Kosten auf. Das Konzept 2 stellte sich nach der Bewertung als Vorzugsvariante heraus.

unbefriedigend	noch tragbar	ausreichend	gut	sehr gut
0	1	2	3	4

Tabelle 2: Werteskala nach VDI 2225

Kriterien	Wichtung	Konzepte							
		K1		K2		K3		K4	
		P	P·W	P	P·W	P	P·W	P	P·W
Wirkungsgrad	5	3	15	4	20	4	20	3	15
Kosten	4	2	8	1	4	0	0	2	8
Steuerungsaufwand	3	2	6	3	9	3	9	4	12
Wartungsaufwand	3	3	9	3	9	3	9	3	9
Robustheit	3	3	9	3	9	3	9	3	9
Leistungsdichte	3	3	9	4	12	4	12	4	12
Drehmomentdichte	2	3	6	4	8	3	6	3	6
Entwicklungsstand	2	3	6	3	6	1	2	2	4
Summe			68		77		67		75
Rang			3		1		4		2

Tabelle 3: Bewertungstabelle der Konzepte

3.3 Vorzugsvariante

Bei der Vorzugsvariante werden die zwei Kettenfahrwerke durch jeweils einen PMS-Motor angetrieben. Dessen Drehzahl erhält über eine Getriebestufe die Anpassung an die Turasdrehzahl (**Bild 3**). Mit einem FU pro PMS-Motor ist die Drehzahl durch Änderung der Frequenz und der Spannung stufenlos verstellbar. Der FU stellt die benötigte elektrische Leistung des PMS-Motors zur Verfügung. Die von den Frequenzumrichtern abgeforderte elektrische Leistung wird von jeweils einem PMS-Generator geliefert, die die mechanische Leistung des Dieselmotors in elektrische Leistung wandeln. Dabei muss die Drehzahl des Dieselmotors durch ein Getriebe angepasst werden. Die Auswahl der PMS-Motoren erfolgte nach den ermittelten Betriebspunkten (siehe **Bild 2**). Entsprechend richtete sich die Auswahl von FU und PMS-Generator nach der elektrischen Nennleistung des PMS-Motors.

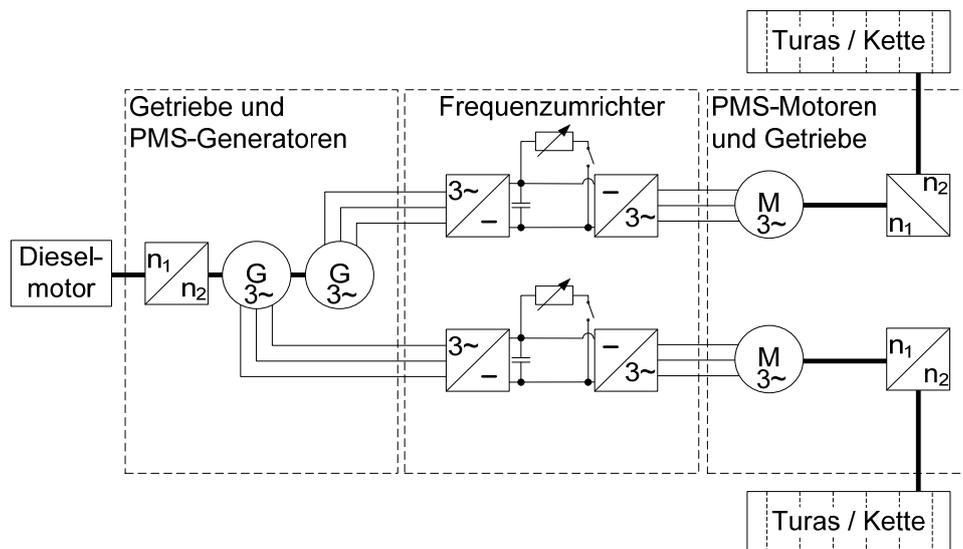


Bild 3: Prinzipskizze der Vorzugsvariante

4 Modellbildung und Simulation

4.1 Fahrtrieb und Arbeitsprozess

Das komplette Ersatzmodell "dieselelektrischer Fahrtrieb" umfasst sowohl Energiequelle, mechanisch-elektrische Leistungsübertragung/-wandlung, Verbraucher (Kettentrieb) als auch den maschinenspezifischen Referenzprozess, siehe Bild 4. Für die Eingrenzung und die Verkürzung des Modellierungsaufwands und der Simulationszeit wurden im Vorfeld Vereinfachungen getroffen. Diese berücksichtigen beispielsweise die Geradeausfahrt und den symmetrischen Fahrwiderstand. Durch die angenommene Lasteingangsfunktion des Fahrprozesses besteht das Modell aus einem PMS-Generator, einem FU und einem PMS-Motor. Für die Abbildung des Lastmoments vom Dieselmotor (zwei PSM-Generatoren) wurde das Modellobjekt "Reibstelle" eingefügt, welches das mechanische Lastmoment des zweiten PSM-Generators generiert. Aufgrund der definierten Annahmen ist dieses Reibmoment gleich dem Wellendrehmoment des ersten PMS-Generators und entspricht somit dem Lastmoment des gesamten zweiten Turasantriebs.

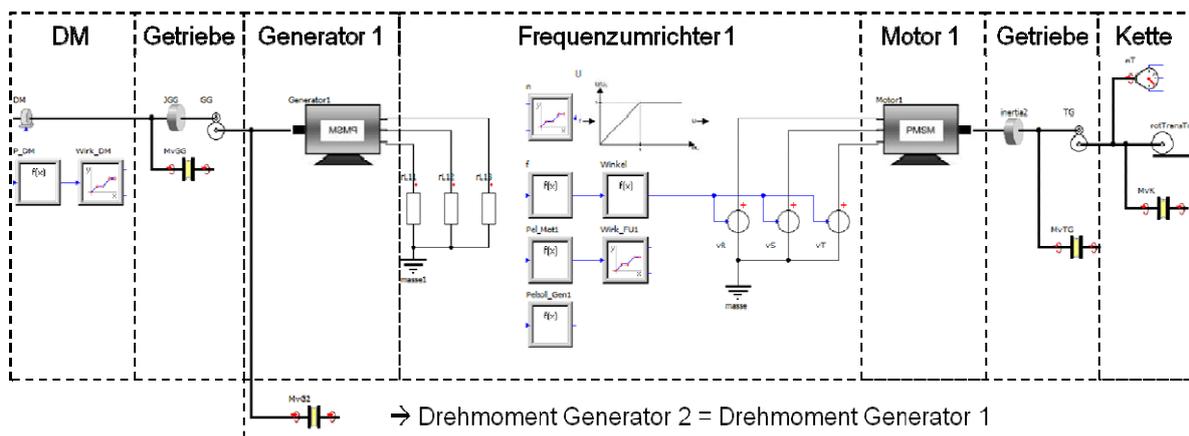


Bild 4: Modellstruktur des Fahrtriebssystems (Auszug)

Das Prozessmodell berücksichtigt die Maschineneigenmasse und die Transportzuladung in einer Punktmasse (**Bild 5**). Die Modellierung des Schlupfes (0,15) zwischen Kette und Fahrbahn erfolgt durch eine translatorische Zwangsbedingung. Der Fahrwiderstand beinhaltet die Hangabtriebskraft und den Bodenwiderstand. Hierbei wird die Hangabtriebskraft mit einem Kräftelement abgebildet. Die Abbildung des Bodenwiderstandes erfolgt mittels einer translatorischen Reibstelle.

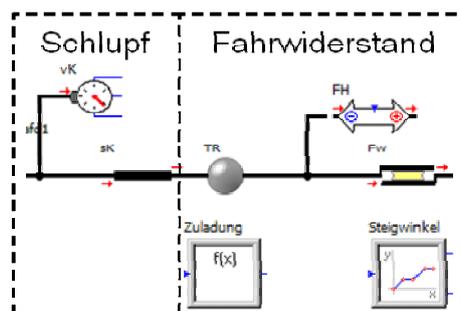


Bild 5: Ersatzmodell des maschinenspezifischen Referenzprozesses

4.2 PMSM-Modell

Das Ersatzmodell der PMSM setzt sich aus vier Teilmodellen zusammen, siehe Bild 6. Als Basis dient hierbei das SimulationX®-Modell einer Synchronmaschine aus der Standard-Modellbibliothek. In diesem sind bereits die Zusammenhänge zwischen den elektrischen und mechanischen Schnittgrößen implementiert. Weiterhin werden die Kupferverluste beachtet. Außerdem sollen die Verluste durch Kugellagerreibung, Rotorluftreibung und Ummagnetisierung (Eisenverluste) berücksichtigt werden.

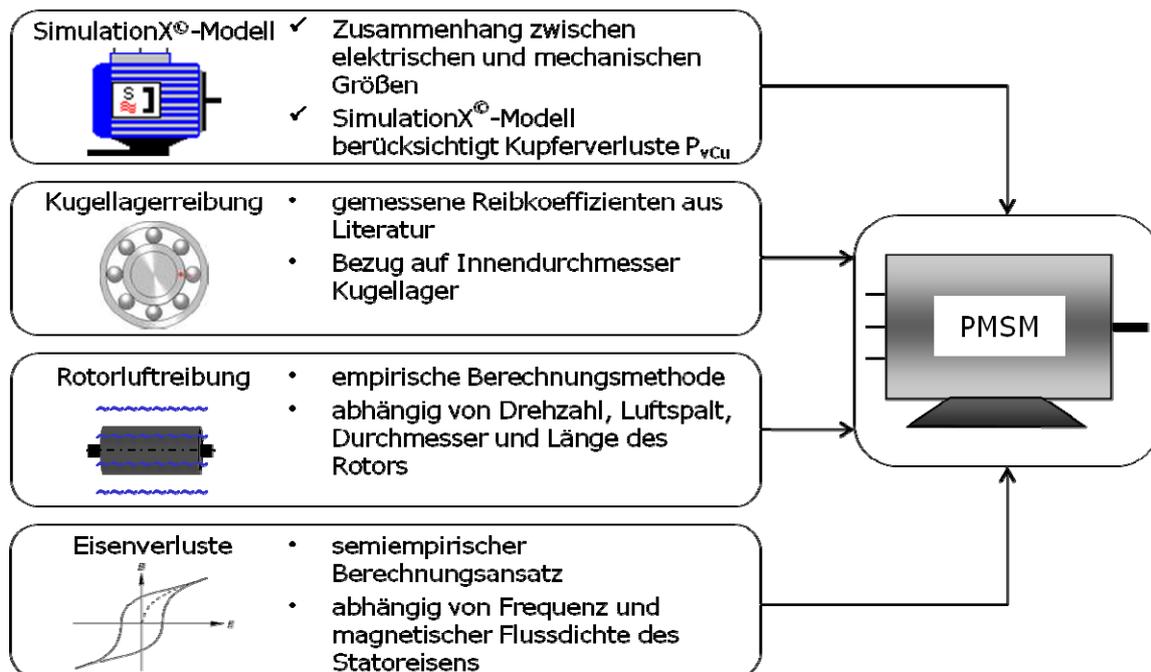


Bild 6: Modellstruktur der PMSM

Kugellagerreibung

Die Reibung im Kugellager wurde durch ein gemessenes Reibkoeffizientenkenntfeld $\mu = f(n, F)$ modelliert, welches von der Drehzahl n und der Normalkraft F abhängt [2]. Der Reibkoeffizient bezieht sich dabei auf den Innendurchmesser des Kugellagers.

Rotorluftreibung

Bei der Berechnung der Reibung zwischen Luft und Rotor handelt es sich um einen empirischen Ansatz nach [3] und [4]. Das Modell benötigt die Parameter Luftspalt, Drehzahl, Durchmesser und Länge des Rotors.

Eisenverluste

Für die Berechnung der Eisenverluste ist ein semiempirischer Ansatz gewählt worden [5]. Als Parameter werden die Speisefrequenz f , die magnetische Flussdichte B , die Masse des Statoreisens und der spezifische Eisenverlust bei 50 Hz und 1,5 T benötigt.

4.3 Verifizierung

Für die Bewertung der Genauigkeit des PMSM-Modells ist ein Vergleich zwischen Mess- und Simulationen durchgeföhrt worden. Der Generatorbetrieb wurde entsprechend den Messbedingungen aus [6] simuliert und mit den Messwerten verglichen, siehe **Bild 7a**). Ebenso erfolgte dies für den Motorbetrieb (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. b**). Die Messwerte hierfür wurden [7] entnommen. Im Generatorbetrieb entstehen bei kleinen Leistungen und Drehzahlen Abweichungen zwischen 6 % und 32 %.

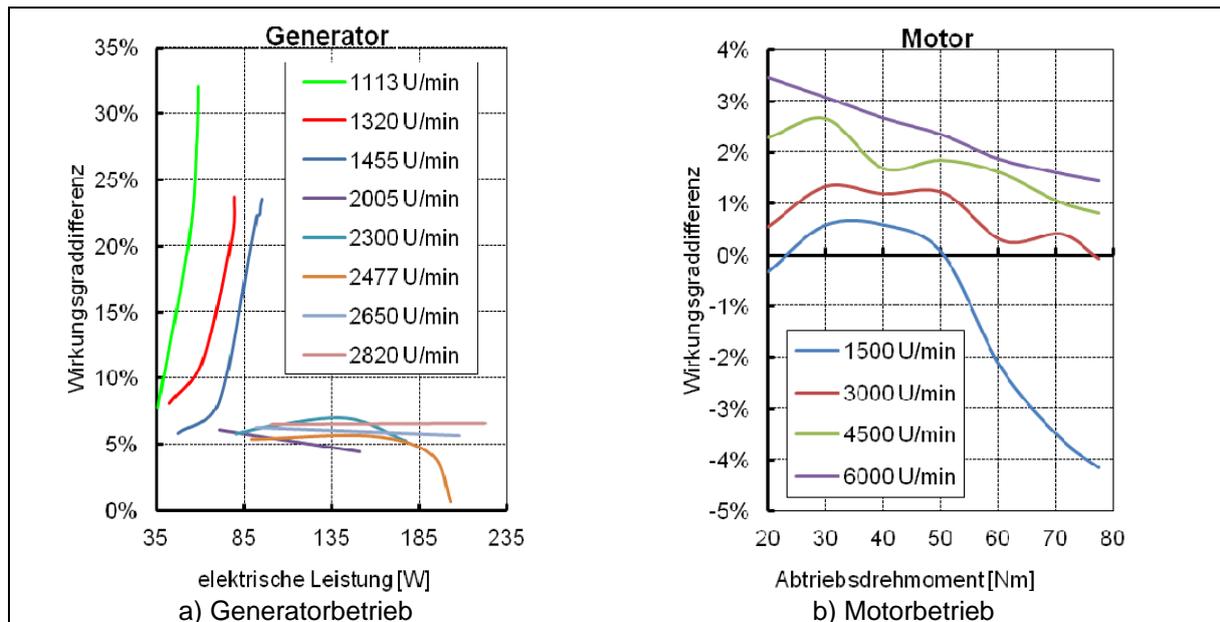


Bild 7: Abweichung simulierter Wirkungsgrad von gemessenem Wirkungsgrad

Geringe Abweichungen von 1 % bis 7 % lassen sich im mittleren und hohen Leistungs- und Drehzahlbereich erkennen. Der Motorbetrieb weist über den gesamten Drehzahl- und Drehmomentbereich kleine Abweichungen von -4 % bis 3,5 % auf. Insgesamt ist das PMSM-Modell als ausreichend genau zu bewerten und wird nicht weiter verändert.

4.4 Simulation und Ergebnisse

Um das energetische Verhalten des dieselektrischen Antriebsystems zu analysieren, sind verschiedene Betriebspunkte simuliert worden. Hierzu wurden die Parameter Fahrstufe, Zuladung und Steigungswinkel der Fahrbahn variiert. Ein Ergebnis der Simulationsrechnungen ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Prozessleistung, siehe **Bild 8**. Bei Teillast ist ein hoher Wirkungsgrad (ca. 0,85) der elektrischen Leistungswandlung (PMS-Generator → FU → PMS-Motor) zu erkennen. Mit dem geringen Dieselmotorwirkungsgrad (ca. 0,4) resultiert daraus ein kleiner Gesamtwirkungsgrad von ca. 0,3. Der große Einfluss des Dieselmotors auf den Systemwirkungsgrad spiegelt sich darin wieder.

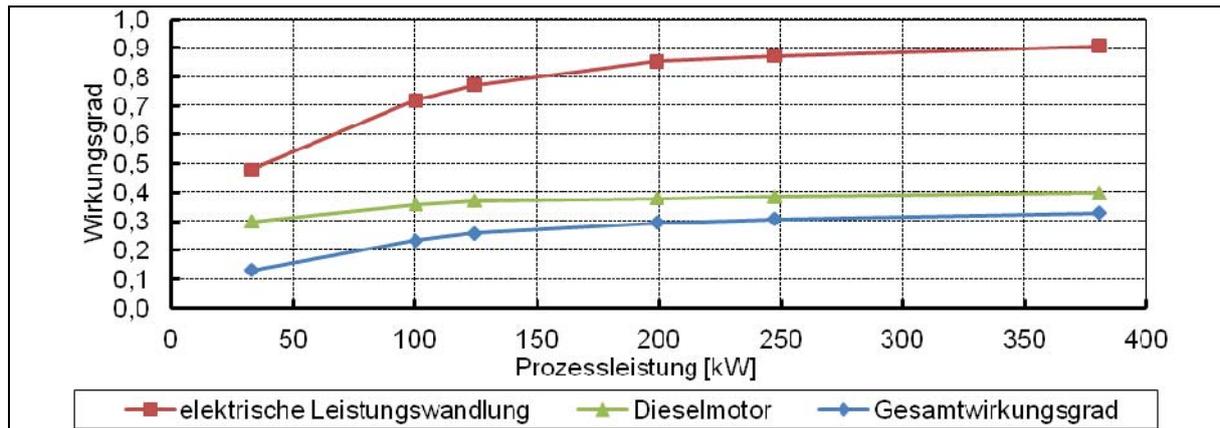


Bild 8: Simulierte Wirkungsgrade des dieselektrischen Fahrtriebs

Ein weiteres Simulationsergebnis ist der spezifische Energieverbrauch in kWh/km abhängig von der Prozessleistung, siehe **Bild 9**. Hierbei ist erkennbar, dass die dritte Fahrstufe (PMS-Motor-Drehzahl: 857 min^{-1}) einen geringeren spezifischen Energieverbrauch aufweist, als die zweite Fahrstufe (PMS-Motor-Drehzahl: 430 U/min). Die dritte Fahrstufe entspricht dem Feldschwächebetrieb des PMS-Motors. Damit ergibt sich ein erster Ansatz zur Optimierung der Betriebsstrategie und der Leistungswandlung zwischen PMS-Motor und Turas. Der PMS-Motor sollte möglichst im Feldschwächebereich betrieben werden. Durch eine zweite Untersetzung im Turasgetriebe ist der Feldschwächebetrieb auch für langsame Fahrt mit hohem Fahrwiderstand möglich. Die vorhandene Untersetzung des Turasgetriebes ist demnach für schnelle Fahrt mit geringem Fahrwiderstand vorzusehen.

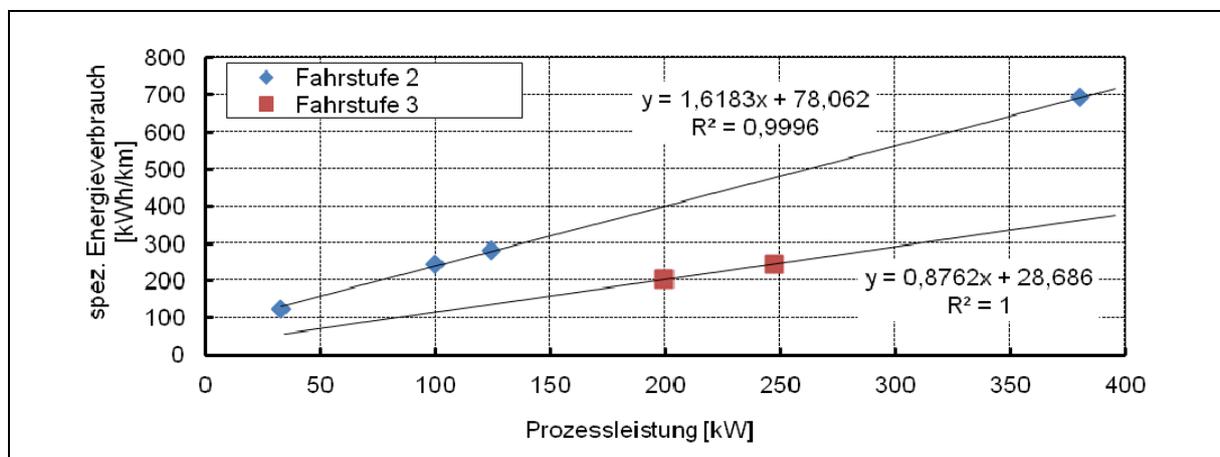


Bild 9: Simulierter spezifischer Energieverbrauch

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Analyse der benötigten technologischen Leistung wurde die Bemessungsgrundlage für die Auswahl der elektrischen Antriebskomponenten gelegt. Nach der systematischen Auswahl einer Vorzugsvariante (PMS-Generator-Motor und Frequenzumrichter) folgte die Modellierung des Antriebssystems, des Arbeitsprozesses und der PMSM. Die Verifizierung des PMSM-Modells zeigte eine ausreichende Genauigkeit. Nach Simulation verschiedener Betriebspunkte war ein hoher Wirkungsgrad der elektrischen Leistungswandlung (PMS-Generator \rightarrow FU \rightarrow PMS-Motor) erkennbar. Der Gesamtwirkungsgrad wird wesentlich durch den kleinen Dieselmotorwirkungsgrad dominiert. Eine weitere Er-

kenntnis aus den Simulationsergebnissen ist der geringe spezifische Energiebedarf des Gesamtsystems im Feldschwächebereich des PMS-Motors.

Ein nächster Schritt wäre die Optimierung der Betriebsstrategie und der Leistungswandlung für den dieselelektrischen Antrieb mithilfe der Simulation. Anschließend kann ein Vergleich von Simulationsergebnissen mit experimentellen Energiebetrachtungen des hydrostatischen Referenzantriebs durchgeführt werden. Dieser Vergleich stellt dann eine Entscheidungshilfe für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit des dieselelektrischen Fahrtriebes in der Transportraupe RT350 dar. Die erstellten Modelle sind allgemein als Entwicklungswerkzeug für elektrische Antriebe nutzbar.

Quellen

[1]

Mischek, P.: Konzeptstudie zum dieselelektrischen Fahrtrieb einer Transportraupe. Dresden, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit 2011

[2]

Baly, Hatem: Reibung fettgeschmierter Wälzlager. Universität Hannover. Dissertation. 2005

[3]

Lu, Tong: Weiterentwicklung von hochtourigen permanenterrregten Drehstromantrieben mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen und experimentellen Untersuchungen. Universität Darmstadt. Dissertation. 2004

[4]

Grote, Karl-Heinrich und Feldhusen, J.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 22.Auflage. Magdeburg, Aachen. Springer-Verlag. 2007. ISBN 978-3-540-49714-1

[5]

Müller, Germa: Berechnung elektrischer Maschinen. 6. Auflage. WILEY-VCH Verlag. 2007. ISBN 3-527-40525-9

[6]

Scherer, Adrian: Permanent-Magnet-Maschine im Generatorbetrieb. Hochschule Luzern. Bachelorarbeit. 2009

[7]

Lindström, Joachim: Development of an Experimental Permanent-Magnet Motor Drive. Chalmers University. Department of Electric Power Engineering Göteborg. Sweden. Licentiate of Engineering. 2010

Kontakt

Dipl.-Ing. Thomas Hentschel

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze

TU Dresden
Institut für Verarbeitungsmaschinen und
Mobile Arbeitsmaschinen

TU Dresden
Institut für Verarbeitungsmaschinen und
Mobile Arbeitsmaschinen

D-01062 Dresden

D-01062 Dresden

Tel.: +49 (0) 351/463-36016

Tel.: +49 (0) 351/463-33511

Fax: +49 (0) 351/463-37731

Fax: +49 (0) 351/463-37731

e-Mail: Thomas.hentschel@tu-dresden.de

e-Mail: gunter.kunze@tu-dresden.de

Internet: tu-dresden.de/bft

Internet: tu-dresden.de/bft