



# **Auswahlssystematik für energieeffiziente quasistationäre elektrische Antriebssysteme**

**- am Beispiel von Pumpen- und Förderbandanlagen -**

**Dipl.-Ing. Jörg Schützhold**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORINGENIEURS**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik  
Dr.-Ing. Andreas Krätzschar

Tag der Einreichung: 25.09.2015  
Tag der Verteidigung: 29.06.2016



Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und  
Antrieben

Band 8

**Jörg Schützhold**

**Auswahlsystematik für energieeffiziente  
quasistationäre elektrische Antriebssysteme**

am Beispiel von Pumpen- und Förderbandanlagen

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4871-1

ISSN 1869-8190

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Im Rahmen meiner Arbeit sind die Veröffentlichungen [5–7, 34, 35, 67–74] entstanden, in welche auch Auszüge aus dieser Arbeit eingeflossen sind.

Bei der Korrektur des Manuskriptes habe ich die Unterstützung von den Herren Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Dr.-Ing. Volkmar Müller sowie Dr. Karl-Heinz Schützhold und Prof. Dr. Ralf Schützhold erhalten. Die Voruntersuchungen zu den Pumpenantrieben wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Kenneth Benath erstellt. Die Vorarbeit zu den Förderbandantrieben wurde von Herrn Dipl.-Ing. Chris Evers unter meiner Betreuung angefertigt. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.

Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Dokortitels führen kann.

Dresden, den 18. September 2015

## **Danksagung**

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann danke ich für Betreuung meiner Promotion, für die Chance am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe arbeiten zu dürfen und für die daraus resultierenden fünf Jahre guter Zusammenarbeit.

Bei Herrn Dr.-Ing. Volkmar Müller und Herrn Dr.-Ing. Nicol Hildebrand möchte ich mich für die vielen konstruktiven Gespräche zu technischen und auch verwaltungsbezogenen Fragestellungen bedanken.

Ein Großteil dieser Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „Auswahlkriterien für eine energieeffiziente Antriebstechnik“, das von der „Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.“ (FVA) unter der Projektnummer 673 aus Eigenmitteln gefördert wurde. Hierbei danke ich vor allem Herrn Dr. Krätzschar (Siemens AG) und Herrn Ehlich (Lenze SE) für die gute Führung des Projektausschusses und für die vielen kritischen Hinweise.

Besonderen Dank schulde ich natürlich auch meinem Kollegen Kenneth Benath für seine Motivation unser gemeinsames Projekt zu einem guten Ende zu bringen.

Ich möchte hier auch meinen Eltern und meinen Brüdern danken, für ihre Unterstützung in allen Lebenslagen, nicht nur in den letzten fünf, sondern in allen vergangenen Jahren.

Zuletzt danke ich allen meinen Freunden und Kollegen, wobei man hier wohl keine klare Trennlinie mehr ziehen kann. Ohne euch hätte es einfach nicht so viel Spaß gemacht!



---

## Kurzfassung

Rund 70 % der Energieaufnahme von elektrischen Antriebssystemen wird von quasistationären Antrieben in Transportanlagen hervorgerufen. Eine gesteigerte Energieeffizienz führt neben reduzierten Energiekosten zu weiteren Nutzeffekten, wie z.B. einem verringerten Kühlaufwand, einem kleinerem Bauraum und einer höheren Lebensdauer der Komponenten. Zur Steigerung der Energieeffizienz dieser Transportanlagen werden in dieser Arbeit Methoden zur Auslegung der zugehörigen Antriebssysteme unter besonderer Berücksichtigung des Förderprozesses erarbeitet. Als repräsentative Transportanwendungen werden Pumpen- und Förderbandanlagen untersucht.

Dabei wird das gesamte elektromechanische System analysiert, um das volle Energiesparpotenzial zu erfassen – beginnend mit dem Lastprofil des transportierten Förderguts bis hin zur elektrischen Energieversorgung. Hierzu werden alle Systemkomponenten modelliert, um die Verluste in verschiedenen Betriebspunkten im Volllast- und Teillastbereich abzuschätzen.

Darauf aufbauend erfolgt die Erarbeitung praktikabler Projektierungshinweise und prozessspezifischer Auswahl diagramme, welche eine schnelle Vorauswahl der energieeffizientesten Antriebstopologie ermöglichen. Da die Verlustmodelle auf frei zugänglichen Datenblattangaben basieren, können die vorgestellten Methoden und Auswahlkriterien bereits in einem frühen Projektierungsstadium zur Auslegung einer energieeffizienten Transportanlage angewandt werden.

## Abstract

Quasi-stationary electric drive systems in transport systems for gaseous, liquid and solid materials use about 70 % of the electrical energy flow in electrical drives. Improved energy efficiency leads to reduced energy costs in addition to other important benefits, such as reduced cooling requirements, smaller drive dimensions and a longer service life. In order to improve the energy efficiency of quasi-stationary transport systems, methods for an energy efficient design of the drive systems with special consideration of the mechanical process are developed. Pumps and conveyor drive systems are investigated as representative transport applications.

It is essential to consider the entire electromechanical system to realize the full energy saving potential – beginning with the load profile of the transported material and ending with the electrical power supply. To this end, all system components are modeled in order to estimate the losses at various operating points – especially in partial load conditions.

Based on these loss models, a guide for choosing an appropriate design option is developed. This guide includes a set of design criteria and selection diagrams that enable fast concept decisions for energy efficient drive systems. Since the loss models are based on freely accessible data-sheet parameters, the presented methods and selection criteria can be applied directly in an early stage of the design process in order to find suitable drive configurations.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielstellung . . . . .	1
1.2	Stand der Forschung . . . . .	2
1.2.1	Auslegung energieeffizienter elektrischer Antriebssysteme . . . . .	2
1.2.2	Auslegung energieeffizienter Pumpenantriebe . . . . .	3
1.2.3	Auslegung energieeffizienter Förderantriebe . . . . .	4
1.3	Gliederung der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Herleitung von Auswahlkriterien für energieeffiziente Transportantriebe</b>	<b>7</b>
2.1	Systematisierung von Anlagen über die Drehmoment-Drehzahl Kennlinie . . . . .	7
2.2	Prozessorientierte Projektierung von elektrischen Antriebssystemen . . . . .	9
2.2.1	Allgemeiner Aufbau einer Transportanlage . . . . .	9
2.2.2	Definition des prozessorientierten Lastprofils . . . . .	11
2.3	Allgemeine Projektierungsfreiheitsgrade im Transport- und Antriebssystem . . . . .	11
2.3.1	Mechanische Auslegung des Transportsystems . . . . .	12
2.3.2	Zahl der Antriebe und Transportsysteme . . . . .	13
2.3.3	Anpassung des Förderstroms mit netz- oder umrichterbetriebenen Antrieben . . . . .	15
2.3.4	Anwendungsspezifische Projektierungsfreiheitsgrade . . . . .	19
2.4	Auswahlsystematik für energieeffiziente quasistationäre Transportantriebe . . . . .	19
2.4.1	Definition der Auswahlkriterien . . . . .	19
2.4.2	Erzeugung des Auswahldiagramms . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Verlustmodelle für elektrische Antriebssysteme auf Basis von Datenblattangaben</b>	<b>23</b>
3.1	Verlustmodell des Frequenzumrichters . . . . .	23
3.2	Verlustmodell der Motoren . . . . .	24
3.2.1	Asynchronmotoren . . . . .	25
3.2.2	Permanentmagneterregte Synchronmotoren . . . . .	33
3.2.3	Zusammenfassung der Eingangsgrößen und Modellannahmen . . . . .	34
3.3	Verlustmodell des Getriebes . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Anwendungsbezogene Verlustmodelle unter Berücksichtigung des Prozesses</b>	<b>37</b>
4.1	Verlustmodell des Pumpenantriebssystems . . . . .	37
4.1.1	Prozess . . . . .	38
4.1.2	Rohrsystem . . . . .	40
4.1.3	Modell der Pumpe . . . . .	43
4.2	Verlustmodell des Förderantriebssystems . . . . .	47
4.2.1	Kategorisierung von Förderanlagen . . . . .	47

4.2.2	Aufbau von Gurtförderern . . . . .	48
4.2.3	Berechnung der Widerstände in der Förderanlage . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Validierung der Verlustmodelle</b>	<b>61</b>
5.1	Vergleich des Umrichtermodells mit Messungen . . . . .	61
5.2	Vergleich der Motormodelle mit Messungen . . . . .	62
5.2.1	Wirkungsgradkennfeld des Asynchronmotors . . . . .	63
5.2.2	Wirkungsgradkennfeld des permanentmagneterregten Synchronmotors	64
5.2.3	Gegenüberstellung der Motorverlustmodelle . . . . .	65
5.3	Unsicherheit des Getriebemodells . . . . .	66
5.4	Vergleich des Pumpenmodells mit Messdaten . . . . .	66
5.5	Vergleich des Förderanlagenmodells mit Messdaten . . . . .	68
5.6	Diskussion der gesamten Modellunsicherheit . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Anwendungsspezifische Projektierungsfreiheitsgrade</b>	<b>71</b>
6.1	Projektierungsfreiheitsgrade von Kreiselpumpenanlagen . . . . .	71
6.1.1	Regelverfahren für die Anpassung des Förderstroms in einem Einzel- pumpensystem . . . . .	71
6.1.2	Regelverfahren und Antriebstopologien für kaskadierte Pumpensysteme	73
6.1.3	Auswahl der zu untersuchenden Freiheitsgrade . . . . .	76
6.2	Projektierungsfreiheitsgrade von Förderanlagen . . . . .	76
6.2.1	Antriebsseitige Freiheitsgrade . . . . .	76
6.2.2	Prozessseitige Freiheitsgrade . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Einfluss der Projektierungsfreiheitsgrade auf die Energieeffizienz</b>	<b>79</b>
7.1	Einfluss von Sicherheitszuschlägen im Lastprofil . . . . .	79
7.2	Energieeffizienz von Pumpenantriebssystemen . . . . .	81
7.2.1	Untersuchung unterschiedlicher Regelverfahren . . . . .	81
7.2.2	Betrachtung der Lebensdauer von Pumpen bei Teildrehzahlregelung . .	85
7.2.3	Energetische Auswirkungen der Anpassung des Laufraddurchmessers .	88
7.2.4	Einfluss des Sicherheitszuschlages . . . . .	91
7.2.5	Vergleich unterschiedlicher Motorsteuerungen und Motortypen . . . .	92
7.2.6	Pumpenantriebssysteme mit erhöhter Drehzahl . . . . .	94
7.3	Energieeffizienz von Förderantriebssystemen . . . . .	97
7.3.1	Vorgaben für das untersuchte Förderantriebssystem . . . . .	97
7.3.2	Einfluss unterschiedlicher Regelverfahren und Aufteilung der Widerstände	98
7.3.3	Mechanische Freiheitsgrade . . . . .	100
7.3.4	Elektrische Freiheitsgrade . . . . .	104

---

<b>8</b>	<b>Auswahlkriterien und Projektierungsregeln für energieeffiziente quasistationäre Antriebssysteme</b>	<b>107</b>
8.1	Projektierungstools zur energieoptimalen Projektierung von Antriebssystemen . . . . .	107
8.2	Auswahlsystematik für energieeffiziente Pumpenantriebssysteme . . . . .	108
8.2.1	Definition der Auswahlkriterien . . . . .	108
8.2.2	Auswahldiagramm für energieeffiziente Pumpenantriebssysteme . . . . .	109
8.2.3	Einfluss der Modellvereinfachungen auf die Auswahlsystematik . . . . .	113
8.2.4	Projektierungshinweise für energieeffiziente Pumpenantriebssysteme . . . . .	116
8.3	Auswahlsystematik für energieeffiziente Förderantriebe . . . . .	119
8.3.1	Definition der Auswahlkriterien . . . . .	119
8.3.2	Auswahldiagramm für energieeffiziente Förderantriebssysteme . . . . .	119
8.3.3	Projektierungshinweise für energieeffiziente Förderantriebssysteme . . . . .	121
<b>9</b>	<b>Übertragung der Auswahlsystematik auf Stückgut-Förderer</b>	<b>125</b>
9.1	Annahmen für Stückgut-Förderer . . . . .	125
9.2	Widerstände in Stückgut-Förderanlagen . . . . .	126
9.3	Energiebedarf einer Stückgut-Förderanlage mit Start-Stopp . . . . .	127
9.4	Angepasstes Auswahldiagramm für Stückgut-Förderer . . . . .	130
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Formelzeichen, Indizes, Abkürzungen</b>	<b>139</b>
A.1	Lateinische Symbole . . . . .	139
A.2	Griechische Symbole . . . . .	144
A.3	Abkürzungen in Indizes . . . . .	145
A.4	Konstanten . . . . .	145
A.5	Mathematische Symbolik . . . . .	145
<b>B</b>	<b>Anhang: Beispiele, Formeln, Abbildungen und Tabellen</b>	<b>147</b>
B.1	Auslegungsbeispiel für eine Pumpenanlage . . . . .	147
B.2	Zahlenbeispiel für den Retrofit bestehender Anlagen . . . . .	148
B.3	Vergleich verschiedener Rohrdurchmesser . . . . .	149
B.4	Software zur energieoptimalen Projektierung von Antriebssystemen . . . . .	150
B.5	Pumpenkennlinien für die drei Regelungsarten bei Kaskadierung . . . . .	151
B.6	Grenzgleichungen für das Auswahldiagramm für Pumpenantriebe . . . . .	152
B.7	Formeln zur Auslegung von Förderanlagen . . . . .	153
B.8	Tabellen zur Auslegung von Förderanlagen . . . . .	159
B.9	Datenblattangaben für Stahl- und Textilgurte . . . . .	161
B.10	Berechnung der Widerstände in Förderanlagen nach DIN 22101 . . . . .	162