

Energetische Untersuchung und Verbesserung der Antriebstechnik pneumatischer Handhabungssysteme

An der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Jan Hepke
geb. am 03. Dezember 1983 in Dresden

Tag der Einreichung: 08.06.2016

Tag der Verteidigung: 02.11.2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Weber
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. O. Sawodny

Prof. Dr.-Ing. B. Schlecht
Vorsitzender der Promotionskommission

Fluidmechatronische Systeme

Jan Hepke

**Energetische Untersuchung und Verbesserung
der Antriebstechnik pneumatischer
Handhabungssysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5254-1

ISSN 2196-2340

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die Inhalte der vorliegenden Dissertation entstanden während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Fluidtechnik (IFD) der TU Dresden. Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Weber, danke ich für seine wertvollen Anregungen sowie für die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. O. Sawodny danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Die Arbeit profitierte maßgeblich von der kompetenten Unterstützung durch industrielle Projektpartner. Besonderer Dank gilt hierbei den Mitarbeitern der Firma Festo AG & Co. KG, für die gute Zusammenarbeit und vielen konstruktiven Gespräche.

Ich möchte mich weiterhin bei allen Kollegen und Mitstreitern des IFD für die herzliche und angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Die Zeit am Institut mit allen fachlichen und nichtfachlichen Diskussionen wird unvergessen bleiben. Im Besonderen bedanke ich mich bei Dr.-Ing. A. Leonhard und Dr.-Ing M. Fiedler in ihrer Rolle als Mentoren. Zum Gelingen der Arbeit haben des Weiteren zahlreiche Studenten und das fachkundige Werkstattpersonal des IFD beitragen.

Besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Nicole, meinen lieben Kindern, Julius und Valeska, sowie meiner Familie für das entgegengebrachte Verständnis und die stetige Unterstützung. Ihr gabt mir den Rückhalt und Freiraum, um diese Arbeit anfertigen zu können.

Dresden, Juni 2016

Jan Hepke

Inhaltsverzeichnis**Seite**

1	Einleitung und wissenschaftliche Problemstellung	1
2	Stand der Forschung und Technik	5
2.1	Pneumatische Handhabungssysteme / Standardantriebe.....	5
2.2	Modellbildung und Simulation pneumatischer Antriebe.....	10
2.3	Energetische Untersuchungen an pneumatischen Systemen	15
2.4	Energiesparmaßnahmen für Einzelantriebe und Mehrachssysteme.....	16
2.5	Heutiger Einsatz von Energiesparmaßnahmen in der industriellen Praxis.....	25
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	27
4	Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte	30
4.1	Aufbau und Energieflüsse innerhalb der ausgewählten Anlagen	34
5	Methoden zur energetischen Bilanzierung in pneumatischen Systemen.....	36
5.1	Energetische Analyse auf der Grundlage von Exergie	36
5.2	Einfluss des thermischen Verhaltens auf die Energieaufnahme von Antrieben	41
5.3	Energieanalyse der Anlagen ohne messtechnische Erfassung von Temperaturen	46
5.4	Vergleich weiterer Ansätze zur energetischen Analyse	47
6	Analyse des energetischen Anlagenverhaltens und Einsparpotenziale.....	51
6.1	Experimentelle Untersuchung der Beispielanlagen.....	51
6.1.1	Auswahl und Einsatz geeigneter Messtechnik	53
6.1.2	Messtechnische Untersuchung der Bremscheiben-Beladeeinrichtung.....	55
6.1.3	Messtechnische Untersuchung des Bestückungsautomaten.....	59
6.2	Simulationsgestützte Untersuchung der Beispielanlagen	65
6.2.1	Modellbildung und Validierung eines Einzelantriebs	65
6.2.2	Modellbildung der Anlagen und Abbildung der Anlagenprozesse	74
6.2.3	Validierung des energetischen Anlagenverhaltens	77
6.2.4	Simulationstechnische Analyse der Exergieverteilung.....	79
6.3	Bewertung der Einsparpotenziale der Anlagen	83
6.4	Auswahl geeigneter Energiesparmaßnahmen	86

7	Untersuchung und Gegenüberstellung von Energiesparschaltungen	90
7.1	Realisierbare Funktionen bei pneumatischen Zylinderantrieben	91
7.2	Nutzbare Energieeinsparungseffekte und deren Quantifizierung	92
7.3	Generierung von Energiesparschaltungen für Einzelantriebe	96
7.4	Vergleich der erarbeiteten Energiesparschaltungen	101
7.4.1	Definition von Bewertungskriterien	101
7.4.2	Gegenüberstellung der Lösungsvarianten und Auswahl von Vorzugslösungen	109
7.4.3	Betrieb der gefundenen Vorzugslösungen	113
7.5	Detailvergleich der gefundenen Vorzugslösungen	123
7.5.1	Eignungs- und Amortisationsbereiche	124
7.5.2	Schaltungsauswahl für die betrachteten Antriebe der untersuchten Anlagen	133
8	Anwendung der ausgewählten Energiesparmaßnahmen an den Anlagen	137
8.1	Umsetzung der Maßnahmen an einem Beispielantrieb	137
8.1.1	Anpassung der Designparameter	137
8.1.2	Einsatz der Abluftspeicherschaltung	142
8.1.3	Kombination beider Energiesparmaßnahmen	143
8.2	Simulationsgestützte Implementierung der Maßnahmen an den Anlagen	146
8.3	Modifizierung einer Anlage und Validierung der Exergieeinsparung	148
9	Ableitung von Richtlinien zur energieeffizienten Gestaltung	153
10	Zusammenfassung und Ausblick	159
11	Literatur	164
12	Anhang	172
12.1	Fluidtechnische Grundgleichungen der verwendeten Simulationsmodelle	172
12.2	Gesamtplan der untersuchten Anlagen	175
12.3	Parameter des Referenzantriebs	177
12.4	Weitere Lösungen für Energiesparschaltungen mit 2x3/2-Wegeventilen	179
12.5	Betrachtete Antriebsaufgaben für die Beschreibung der Eignungsbereiche	180