Lars Blumenthal

Multidomänenbasierte Optimierung des axialdynamischen Schaltverhaltens von Federkraftbremsen

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Konstruktions- und Antriebstechnik **15**

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Konstruktions- und Antriebstechnik

Multidomänenbasierte Optimierung des axialdynamischen Schaltverhaltens von Federkraftbremsen

zur Erlangung des akademischen Grades DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn

genehmigte

DISSERTATION

von

Lars Blumenthal, M.Sc.

aus Friedrichshafen

Tag des Kolloquiums:	10.11.2022
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Konstruktions- und Antriebstechnik

Band 15

Lars Blumenthal

Multidomänenbasierte Optimierung des axialdynamischen Schaltverhaltens von Federkraftbremsen

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8869-4
ISSN 2567-2924

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität Paderborn.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer für die Überlassung des Forschungsthemas und seine wohlwollende Betreuung der Arbeit, die sich durch eine gelungene Balance aus Unterstützung und Freiheiten ausgezeichnet hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie die hilfreiche Diskussion der Arbeit. Für ihr Mitwirken in der Promotionskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Koch sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster.

Allen Mitarbeitenden des Lehrstuhls für Konstruktions- und Antriebstechnik danke ich für die kollegiale Atmosphäre, die mich stets gerne in die Universität kommen ließ. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meine Kollegen aus der Fachgruppe Antriebstechnik, mit denen ich nicht nur diverse Aspekte der Antriebstechnik in der Teeküche des Lehrstuhls diskutieren konnte: Herrn Magnus Schadomsky (M.Sc.), Herrn Johann Rauhaus (M.Sc.), Herrn Tobias Bührmann (M.Sc.), Herrn Bowen Deng (M.Sc.), Herrn Dr.-Ing. Johannes Tominski, Herrn Dr.-Ing. Malte Strop, Herrn Dr.-Ing. Christoph Hübner sowie Herrn Alexander Klause (M.Sc.). Herrn Dennis Hambach (M.Ed.) danke ich für die gute Stimmung im Büro. Herrn Stephan Stieren (M.Sc.), der mich als wissenschaftliche Hilfskraft tatkräftig unterstützt hat, sowie allen Studierenden, die Anteil an den Ergebnissen dieser Dissertation haben, danke ich für Ihre engagierte Mitarbeit.

Bei meinen Eltern bedanke ich mich für Ihre stetige Unterstützung sowie das ausführliche Lektorat dieser Arbeit.

Meiner Partnerin Alexandra danke ich für Ihren starken Rückhalt in allen Belangen, den sie mir den vergangenen Jahren gegeben hat. Meiner Tochter Paulina danke ich für Ihre Verspätung, mit der Sie mir rücksichtsvollerweise die Möglichkeit eingeräumt hat, diese Arbeit in wortwörtlicher Ruhe abzuschließen.

Paderborn, im November 2022 Lars Blumenthal

Zusammenfassung

Federkraftbremsen kommen in unterschiedlichen Anwendungen vieler Branchen zum Einsatz, die verschiedenste Anforderung an sie stellen. Die Entwicklungsprozesse für individualisierte Federkraftbremsen können durch den zielgerichteten Einsatz von Simulationen unterstützt werden. Diese Arbeit befasst sich mit der numerischen Optimierung des axialdynamischen Schaltverhaltens von Federkraftbremsen auf Basis eines Multidomänenmodells. Das zu diesem Zweck entwickelte Multidomänenmodell berücksichtigt elektrische, magnetische, mechanische und thermische Effekte, die während des Betriebs kontinuierlich miteinander in Wechselwirkung stehen. Dazu werden zunächst topologiebasierte Teilmodelle der einzelnen Effekte entwickelt, die zu einem geschlossenen Multidomänen-Gesamtmodell verknüpft werden. Eine experimentelle Validierung weist die Gültigkeit des Multidomänenmodells nach. Für die Optimierung wird zunächst eine Optimierungsstruktur auf Basis des Multidomänenmodells entwickelt und implementiert. Im Rahmen zweier Anwendungsbeispiele wird die Funktionalität der Optimierungsstruktur nachgewiesen.

Summary

Spring-applied brakes are used in a wide variety of applications in many industries, which are associated with a spectrum of different requirements. The purposeful use of simulations can support development processes for individualised spring-applied brakes. This work deals with the numerical optimisation of the axial-dynamic switching behaviour of spring-applied brakes based on a multi-domain model. The multi-domain model developed for this purpose considers electrical, magnetic, mechanical and thermal effects that continuously interact with each other during operation. Therefore, topology-based sub-models of the individual effects are developed, which are synthesised to form a common overall multidomain-model. An experimental validation proves the validity of the multidomain-model. For the optimisation, an optimisation structure is first developed and implemented based on the multi-domain model. The functionality of the optimisation structure is finally demonstrated in two application examples.

Liste der Vorveröffentlichungen

BLUMENTHAL, L.; ZIMMER D.; STIEREN S.: *Multidomänensimulation des Schaltverhaltens von Federkraftbremsen.* Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Ausgabe 11/12 2022.

SCHADOMSKY, M.; BLUMENTHAL, L.; ZIMMER, D.; PETER, S.; BOROS, L.: *Maßnahmen zur Reduzierung von plastischer Verformung an statischen Druckplatten von Lammellenbremsen infolge einseitig eingebrachter Reibarbeit.* Springer, Forschung im Ingenieurwesen, 29.09.2022.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation ... 1

2 Stand der Technik und Wissenschaft ... 5

2.1 Klassifizierende Einordnung von Federkraftbremsen ... 5

2.2 Schaltverhalten von Federkraftbremsen ... 7

2.2.1 Lüftvorgang ... 7

2.2.2 Verknüpfvorgang ... 10

2.3 Aktuelle Entwicklungstrends von Federkraftbremsen ... 14

2.4 Wissenschaftliche Ausführungen zu Federkraftbremsen ... 16

2.5 Erstellung kontinuierlicher Dynamikmodelle ... 17

2.5.1 CAD-basierte Modellierung ... 19

2.5.2 Topologiebasierte Modellierung ... 19

2.5.3 Signalflussbasierte Modellierung ... 19

2.5.4 Multidomänensimulation ... 20

2.6 Etablierte topologiebasierte Modellierungsansätze ... 22

2.6.1 Elektromagnetische Energiewandler ... 22

2.6.2 Thermische Netzwerkmodelle ... 25

2.7 Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs ... 29

3 Zielsetzung und Vorgehen ... 30

3.1 Zielsetzung ... 30

3.2 Methodische Vorgehensweise ... 31

4 Definition des Untersuchungsgegenstands ... 33

5 Modellbildung ... 36

5.1 Anforderungen an das Modell ... 36

5.1.1 Physikalische Anforderungen ... 36

5.1.2 Informationstechnische Anforderungen ... 37

5.2 Definition der Systemgrenzen ... 38

5.3 Definition von Teilsystemen ... 39

5.4 Festlegung des Modellbildungsansatzes ... 40

5.5 Idealisierte Modellgeometrie ... 42

5.6 Axialdynamisches Teilmodell ... 43
5.6.1 Elektrizität ... 44
5.6.2 Magnetismus ... 44
5.6.3 Translatorische Mechanik ... 53

5.7 Thermisches Teilmodell ... 55
5.7.1 Geometrische Segmentierung ... 55
5.7.2 Werkstoffe ... 56
5.7.3 Thermische Kontakte innerhalb des Modells ... 61
5.7.4 Thermische Randbedingungen ... 63
5.7.5 Betriebsbedingter Wärmeeintrag ... 67

5.8 Thermodilatatorisches Teilmodell ... 68

5.9 Multidomänenmodellsynthese ... 70

6 Validierung ... 72

6.1 Validierungsmethodik ... 72

6.2 Prüfstand ... 74
6.2.1 Benutzerinterface ... 76
6.2.2 Datenerfassungs- und Steuerungsmodul ... 76
6.2.3 Prüfstandansteuerung ... 77
6.2.4 Drehzahl- und Drehmomentmessung ... 77
6.2.5 Temperaturmessung ... 77
6.2.6 Messung von Strom und Spannung ... 79
6.2.7 Messung der Ankerscheibenposition ... 79

6.3 Validierung der Domänenmodelle ... 80
6.3.1 Axialdynamisches Teilmodell ... 80
6.3.2 Thermisches Teilmodell ... 86
6.3.3 Thermodilatatorisches Teilmodell ... 91

6.4 Validierung des Multidomänenmodells ... 95

7 Multidomänenbasierte Optimierung ... 100

7.1 Optimierungsstruktur ... 100
7.1.1 Multidomänenmodell ... 101
7.1.2 Auswertung güterelevanter Merkmale ... 101

7.1.3 Gütefunktion ... 102
7.1.4 Numerischer Optimierungsalgorithmus ... 104
7.2 Anwendungsbeispiele ... 106
7.2.1 Anwendungsbeispiel 1: Azimutverstellung einer Windkraftanlage ... 107
7.2.2 Anwendungsbeispiel 2: Motorbremse eines Flurförderfahrzeuges ... 113
7.2.3 Diskussion der Optimierungsergebnisse ... 118

8 Interpretation der Ergebnisse ... 120

9 Zusammenfassung und Ausblick ... 122

9.1 Zusammenfassung ... 122
9.2 Ausblick ... 123

Literaturverzeichnis ... 125

Abbildungsverzeichnis ... 132

Tabellenverzeichnis ... 134

Formelzeichen und Abkürzungen ... 136

Anhang ... 142