**Modellbasierter Entwurf und experimentelle
Validierung von elektro-mechanischen
Betätigungsfunktionen für ein
Bugfahrwerkssystem**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing.
Dennis Doberstein

aus Bremervörde

2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke
Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann
Institut für Elektrische Energiesysteme
und Automation
Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 05. November 2015

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 2/2016

Dennis Doberstein

**Modellbasierter Entwurf und experimentelle
Validierung von elektro-mechanischen Betätigungs-
funktionen für ein Bugfahrwerksystem**

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2015

Foto Titelseite: Marc Steinmetz / VISUM

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 978-3-8440-4367-9

ISSN 1861-5279

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 vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich an meinen Doktorvater und den Leiter des Instituts FST Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für die sehr gute Betreuung und das entgegengebrachte Vertrauen richten. Seine Unterstützung und die Schaffung eines hervorragenden Forschungsumfeldes haben mir erst die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann für die freundliche Bereitschaft danken, im Rahmen des Promotionsverfahrens das Zweitgutachten zu verfassen.

Die inhaltlichen Grundlagen dieser Arbeit entstanden im vom Bundesministerium geförderten Forschungsprojekt "FASY". Einen großen Dank möchte ich der Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, stellvertretend Herrn Ulrich Grabherr und Herrn Christoph Reinbold, für außerordentlich gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie Unterstützung dieses Projektes aussprechen. Dieser Dank gilt ebenfalls allen übrigen beteiligten Projektpartnern.

Danken möchte ich auch meinen ehemaligen Studenten Hauke Lüdders, Marian Pitroff und Johannes Bergel, deren studentische Arbeiten einen wertvollen Beitrag zur Entstehung dieser Dissertation geliefert haben. Darüber hinaus geht ein Dank an Oliver Ritter stellvertretend für alle studentischen HiWis, die mich bei der Prüfstandsarbeit unterstützt haben.

Allen Kollegen des Instituts danke ich für die wunderbare Zeit, die vielen fruchtbaren Diskussionen und Ratschläge und die freundschaftliche Atmosphäre, welche auch über die Institutszeit hinaus große Bedeutung hat. Stellvertretend für alle Kollegen danke ich Swantje Johnsen und Kevin Poole. Ein weiterer Dank gilt zudem allen Institutsmitarbeitern, die mir jederzeit mit passenden Problemlösungen unterstützend zur Seite gestanden haben, im Speziellen Detlef Lehmann für seinen unermüdlichen Einsatz beim Prüfstandsbau.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, allen voran meinen Eltern und meinem Bruder, für die uneingeschränkte Unterstützung und den Rückhalt, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bristol, im Februar 2016

Dennis Doberstein

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xi
Formelzeichen	xi
Indizes	xiv
Abkürzungen	xvi
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik	5
1.1.1 Aufbau und Funktionen	6
1.1.2 Hydraulische Versorgung und Steuerung	8
1.1.3 Elektro-hydrostatische Fahrwerksbetätigung	11
1.1.4 Elektro-mechanische Antriebskonzepte	13
1.2 Ziele, Inhalte und Struktur der Arbeit	17
2 Anforderungsdefinition und Entwicklungsprozess	21
2.1 Systemanforderungen	21
2.1.1 Funktionen	22
2.1.2 Lasten	23
2.1.3 Dynamische Anforderungen	27
2.1.4 Zuverlässigkeit	28
2.1.5 Integration und Umgebungsbedingungen	30
2.2 Entwurfsmethodik	31
3 Kinematiksynthese	37
3.1 Aufbau eines Mehrkörpermodells des Fahrwerks	37
3.1.1 Mehrkörpersimulation	37
3.1.2 Geometriebildung	38
3.1.3 Struktur	39
3.1.4 Krafterelemente und Lasten	42
3.1.5 Modellverifikation	43
3.2 Studie neuartiger Kinematikkonzepte	45
3.2.1 Eigenschaften der Viergelenkkette für Fahrwerkskinematiken	45
3.2.2 Synthese neuer Betätigungs kinematiken	48
3.3 Bewertung der Betätigungs konzepte und Konzeptauswahl	59

4	Auslegung und Modellierung des Betätigungssystems	67
4.1	Abstimmung von Kinematik und Aktuatorposition	69
4.2	Auslegung des Antriebssystem	71
4.2.1	Auswahl der Aktuatorkonfiguration	71
4.2.2	Modellierung elektrischer Antrieb	76
4.2.3	Modellierung Getriebe	80
4.3	Auslegung der Ausfahrverriegelung	83
4.4	Bremswiderstand	87
4.5	Struktur und Lager	93
4.6	Gesamtsystemmodell	93
4.6.1	Transfer des Fahrwerksmodells in die Matlab-Umgebung	94
4.6.2	Gesamtstruktur	95
5	Experimentalsystem mit Steuerkonzept	99
5.1	Systemaufbau	99
5.1.1	Prüfumgebung und Prüfling	100
5.1.2	Messtechnik	103
5.1.3	Messdatenerfassung und Echtzeitsteuerung	104
5.2	Lastaufprägung	105
5.2.1	Lasttrajektorien	106
5.2.2	Belastungseinheit	108
5.2.3	Lastregelung	108
5.3	Konzept der Ablaufsteuerung	113
5.3.1	Implementierung im Experimentalsystem	115
5.3.2	Integration in die avionische Infrastruktur	116
5.4	Versuche zur experimentellen Parameterermittlung und Modellvalidierung	119
5.4.1	Übertragungsfunktion Strom - Motormoment	119
5.4.2	Interne Reibverluste des EMA	121
5.4.3	Reibverluste in der Kinematik	128
5.4.4	Dynamik der Regelkreise	129
5.4.5	Kurzschlussbetrieb	131
6	Versuchsdurchführung und Verifikation der Systemanforderungen	135
6.1	Nachweis der Betriebsfunktionen	135
6.1.1	Regulärer Betrieb	135
6.1.2	Signalumkehr	139
6.1.3	Notausfahren	140

6.2	Systemüberwachung und Zuverlässigkeitsanalyse	143
6.2.1	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	144
6.2.2	Systemüberwachung	149
6.2.3	Zuverlässigkeitsanalyse	155
7	Klemmtolerante Lösungskonzepte und Gesamtbeurteilung	159
7.1	Lösungsoptionen bezüglich der Blockiergefahr des EMA	160
7.1.1	Verringerung der Schlepplast	160
7.1.2	Klemmtolerante EMA-Architekturen	161
7.1.3	Bewertung	166
7.2	Gegenüberstellung der Aktuatorprinzipien	168
7.2.1	Systemvergleich	168
7.2.2	Gesamtbewertung	177
7.3	Übertragbarkeit des Konzepts (Skalierung)	179
7.3.1	Veränderte Betätigungslasten	180
7.3.2	Anwendung auf andere Fahrwerksysteme	182
8	Zusammenfassung und Ausblick	187
A	FMEA-Tabellen	193
B	Zuverlässigkeitsblockdiagramme	197
	Literatur	203