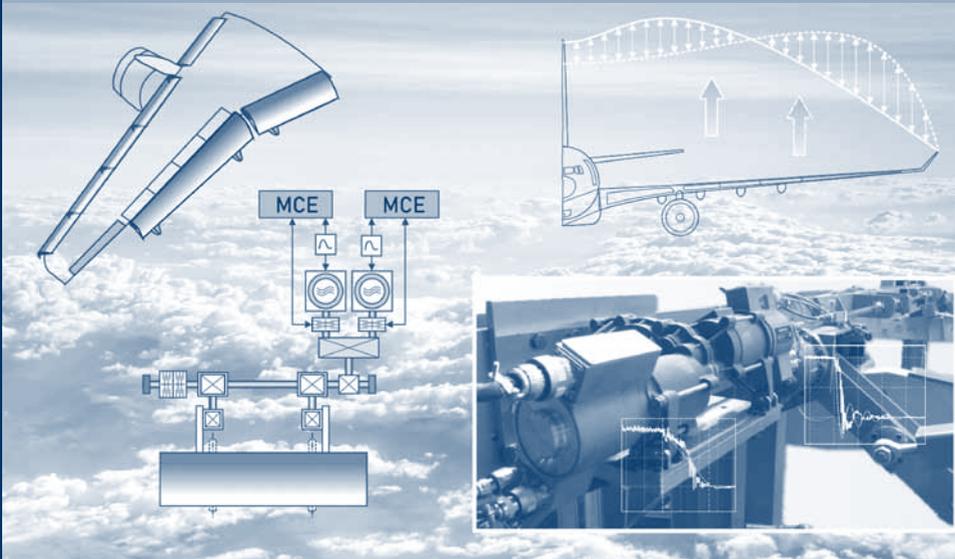


Stefan Benischke  
Hamburg

## Modellbasierte Entwicklung eines verteilten Antriebssystems für ein multifunktionales Landeklappensystem



01-2018

**Modellbasierte Entwicklung eines  
verteilten Antriebssystems für ein  
multifunktionales Landeklappensystem**

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

von Dipl.-Ing.  
**Stefan Benischke**

aus Hamburg

2018

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 münd-  
lichen Prüfung: 02. März 2018

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2018

**Stefan Benischke**

**Modellbasierte Entwicklung  
eines verteilten Antriebssystems  
für ein multifunktionales Landeklappensystem**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5997-7

ISSN 1861-5279

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)

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Rahmen der im Luftfahrtforschungsprogramm IV geförderten Projekte SysTAvio (System- und Avionik-Technologien der nächsten Generation) sowie HiLift-CentraTec.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Instituts Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für seine Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Die mir zugestandene Selbstständigkeit sowie die im Rahmen meiner Tätigkeit gewährten wissenschaftlichen Freiräume haben diese Dissertation erst möglich gemacht. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann für die freundliche Bereitschaft, das Zweitgutachten für diese Arbeit zu verfassen.

Mein weiterer besonderer Dank gilt meinen Kollegen am Institut für Flugzeug-Systemtechnik. Die freundschaftliche Atmosphäre, die gemeinsamen Aktivitäten sowie der fundierte fachliche Austausch sorgten für ein einzigartiges und motivierendes Arbeitsumfeld, das seinesgleichen sucht. Stellvertretend möchte ich an dieser Stelle Riko Bornholdt, Dr.-Ing. Carsten Dunker, Hendrik Strummel, Mike Montel sowie die Kollegen aus Raum 2011 erwähnen. Weiterhin danke ich Detlef Lehmann stellvertretend für alle Institutsmitarbeiter, welche mir jederzeit unterstützend zur Seite gestanden haben. Die Zeit des Prüfstandbaus behalte ich sowohl als lehrreich als auch äußerst positiv in Erinnerung.

Weiterhin möchte ich mich bei allen beteiligten Partnern der oben genannten Forschungsprojekte bedanken. Für die offene und konstruktive Zusammenarbeit danke ich insbesondere Martin Recksiek und Harald Rechter von der Airbus Operations GmbH in Bremen sowie Raimund Schumacher von der Diehl Aerospace GmbH.

Abschließend gilt mein ganz persönlicher Dank meinen Eltern, meinem Bruder und meiner Freundin Jil für die liebevolle Unterstützung. Ohne euren Rückhalt und Zuspruch wäre diese Arbeit nie entstanden.

Hamburg, im Mai 2018

*Stefan Benischke*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>xi</b>
Formelzeichen . . . . .	xi
Indizes . . . . .	xiii
Abkürzungen . . . . .	xv
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	4
1.1.1 Zentralantriebssysteme von Landeklappen . . . . .	4
1.1.2 Steuerung und Überwachung des Landeklappensystems	8
1.1.3 Entwurfswerkzeuge und Entwicklungsprozesse . . . . .	10
1.2 Ziel und Gliederung der Arbeit . . . . .	12
<b>2 Multifunktionale Landeklappensysteme</b>	<b>15</b>
2.1 Potenziale multifunktionaler Landeklappensysteme . . . . .	15
2.1.1 Aerodynamische Leistungssteigerung . . . . .	15
2.1.2 Erweiterte Funktionen des Landeklappensystems . . . . .	16
2.2 Konfiguration des Klappensystems . . . . .	17
2.2.1 Ausführungen von Landeklappen . . . . .	18
2.2.2 Führungsmechanismen von Landeklappen . . . . .	20
2.3 Konfiguration des Antriebssystems . . . . .	24
2.3.1 Anforderungen multifunktionaler Antriebssysteme . . . . .	24
2.3.2 Einzelklappensysteme . . . . .	27
2.3.3 Komponenten eines Antriebssystems . . . . .	28
2.4 Konzept eines verteilten Antriebssystems . . . . .	30
2.4.1 Architektur des Antriebssystems . . . . .	31
2.4.2 Steuerung, Regelung und Überwachung . . . . .	33
<b>3 Modellierung des Antriebssystems</b>	<b>39</b>
3.1 Beschreibung der Komponentenmodelle . . . . .	39
3.1.1 Komponenten der Wellentransmission . . . . .	39

3.1.2	Abtriebsstation . . . . .	43
3.1.3	Differential-Getriebe . . . . .	44
3.1.4	Elektrischer Antriebsstrang . . . . .	47
3.2	Nichtlineares Modell eines Einzelantriebssystems . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Methodik zur Durchführung von Systemstudien</b>	<b>53</b>
4.1	Entwurfs- und Auslegungsaspekte der Antriebssysteme . . . . .	53
4.1.1	Klemmfall im Antriebssystem . . . . .	57
4.1.2	Wellenbruch im Antriebssystem . . . . .	58
4.2	Anforderungen und Zielsetzung der Methodik . . . . .	61
4.2.1	Beschreibung des Prozesses . . . . .	62
4.3	Stationäre Auslegung . . . . .	64
4.4	Modellbildungsprozess . . . . .	65
4.4.1	Automatisierte Modellbildung . . . . .	66
4.4.2	Modellreduktion . . . . .	69
4.5	Implementierung von Fehlerszenarien . . . . .	71
4.5.1	Simulation von Klemmfällen . . . . .	72
4.5.2	Simulation von Wellenbrüchen . . . . .	74
4.6	Auslegung der Systemkomponenten . . . . .	78
4.6.1	Komponenten für Drehmomentübertragung . . . . .	78
4.6.2	Funktionsspezifische Komponenten . . . . .	80
4.7	Anwendung der Methodik . . . . .	84
4.7.1	Variation der Stellgliederübersetzungen . . . . .	84
4.7.2	Auslegung und Analyse eines verteilten Antriebssystems	85
4.7.3	Fazit und Bewertung . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Entwurf einer verteilten Antriebsregelung eines Einzelklappensystems</b>	<b>93</b>
5.1	Reglerspezifikation und Entwurf der Struktur . . . . .	93
5.1.1	Konzept zur Synchronisation eines Klappenpaares . . . . .	97
5.1.2	Regelkreisstruktur der Antriebsstränge . . . . .	100
5.1.3	Reglerentwurf anhand einer Kaskadenstruktur . . . . .	101
5.1.4	Diskretisierung der Reglergesetze . . . . .	102

5.2	Drehzahl geregelter Antriebsstrang . . . . .	104
5.2.1	Kontinuierliches Entwurfsmodell . . . . .	105
5.2.2	Auslegung der Reglerparameter . . . . .	106
5.2.3	Zeitdiskrete Realisierung des Drehzahlreglers . . . . .	107
5.3	Positionsgeregelte Antriebseinheit . . . . .	109
5.3.1	Zeitdiskretes Streckenmodell der Antriebseinheit . . . . .	114
5.3.2	Reglerauslegung anhand des zeitdiskreten Streckenmodells . . . . .	116
5.3.3	Bewertung und Auswahl einer Reglerstruktur . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Verifikation und experimentelle Untersuchungen</b>	<b>123</b>
6.1	Prüfstand eines verteilten Antriebssystems . . . . .	123
6.1.1	Experimentalsystem eines Einzelantriebssystems . . . . .	123
6.1.2	Echtzeit-Simulation der Antriebssysteme als Grundlage eines HiL-Simulators . . . . .	126
6.1.3	Aufbau des hybriden Prüfstands . . . . .	127
6.2	Anwendung modellbasierter Entwicklungsmethoden zur Verifikation der Software-Funktionen . . . . .	129
6.3	Verifikation des Steuerungs- und Reglerentwurfs . . . . .	130
6.3.1	Dynamikverhalten im Zeitbereich . . . . .	131
6.3.2	Dynamikverhalten im Frequenzbereich . . . . .	133
6.3.3	Positionier- und Fahrsequenz im Zeitbereich . . . . .	135
6.4	Nachweis ausgewählter Funktionen der Fehlerüberwachung . . . . .	140
6.4.1	Wellenbruch im Antriebssystem . . . . .	140
6.4.2	Klemmfall eines Einzelantriebssystems . . . . .	144
6.4.3	Degradation einer lokalen Antriebseinheit . . . . .	147
6.5	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	149
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
<b>A</b>	<b>Technische Daten und Modellparameter des Prüfstands</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>