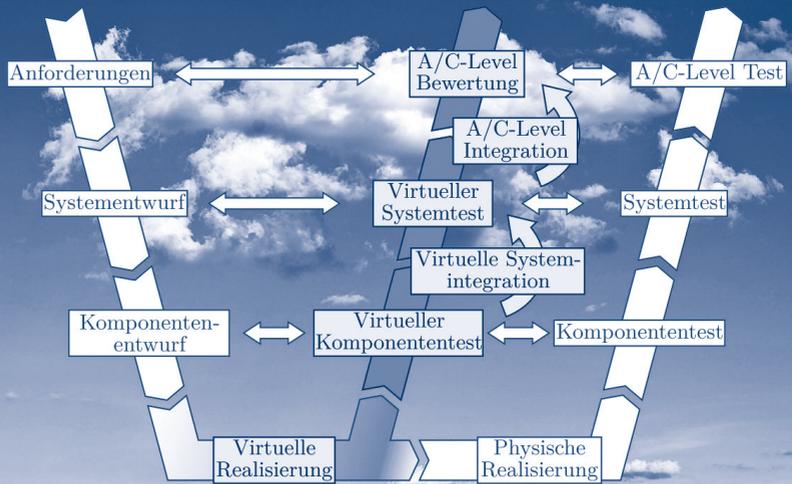


Tobias Kreitz
Wuppertal

Erweiterte Entwicklungsmethodik für die virtuelle Integration und den modellbasierten Test am Beispiel von elektro-mechanischen Flugzeug-Aktuatorssystemen



**Erweiterte Entwicklungsmethodik
für die virtuelle Integration
und den modellbasierten Test
am Beispiel von elektro-mechanischen
Flugzeug-Aktuatorssystemen**

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

von Dipl.-Ing.
Tobias Kreitz

aus Wuppertal

2019

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

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
Institut für Elektrische Energietechnik
Technische Universität Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 01. April 2019

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2019

Tobias Kreitz

**Erweiterte Entwicklungsmethodik für die virtuelle
Integration und den modellbasierten Test
am Beispiel von elektro-mechanischen
Flugzeug-Aktuatorsystemen**

Shaker Verlag
Düren 2019

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, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6927-3

ISSN 1861-5279

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg entstanden.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung sowie für die wissenschaftlichen Freiräume während meiner Zeit am Institut. Ebenfalls bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker für die freundliche Bereitschaft, das Zweitgutachten zu verfassen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Sehr herzlich danke ich allen aktuellen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen, die mich während meiner Arbeit am Institut begleitet haben. Neben den fachlichen Diskussionen werden mir die gemeinsamen Aktivitäten und die kollegiale Atmosphäre stets in guter Erinnerung bleiben. Es war eine sehr schöne Zeit, in der viele Freundschaften entstanden sind. Besonders danken möchte ich an dieser Stelle Christian Modest, Kevin Poole, Robert Doering, Riko Bornholdt, Jan Grymlas, Sergej Jäger, Tim Schlottbohm, Karsten Henning, Christoph Kupfer und David Arriola für ihre Freundschaft, die gemeinsame Arbeit, den wissenschaftlichen Austausch und die vielen konstruktiven Kommentare. Weiterhin möchte ich mich für die freundschaftliche Verbundenheit bedanken, insbesondere bei Matthias Krings, Enno Vredenburg und Mike Montel.

Ein ganz großer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für den Rückhalt, die Unterstützung und Ermutigung, dieses Vorhaben erfolgreich abzuschließen.

Hamburg, im August 2019

Tobias Kreitz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Nomenklatur	xv
Formelzeichen	xv
Indizes	xviii
Abkürzungen	xx
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	3
1.2 Struktur der Arbeit	4
2 Erweiterte Entwicklungsmethodik für Flugzeugsysteme	7
2.1 Begriffsdefinitionen	7
2.1.1 System- und Modelltheorie	7
2.1.2 Eigenschaftsabsicherung	10
2.1.3 Systemintegration	12
2.2 Vorgehensmodelle für den Entwicklungsprozess von Flugzeugsystemen	13
2.2.1 Das V-Modell nach VDI-Richtlinie 2206	13
2.2.2 SAE Aerospace Recommended Practice 4754a	16
2.2.3 Weitere Vorgehensmodelle	17
2.2.4 Zusammenfassender Vergleich und Diskussion	18
2.3 Stand der Wissenschaft und Technik	18
2.3.1 Einsatz von VI-/VT-Methoden in der Luftfahrt	19
2.3.2 Zusammenfassung und Abgrenzung der Methoden	23
2.4 Durchgängiger modellbasierter Systementwicklungsprozess	25
2.4.1 Prozess des virtuellen Testens	27
2.4.2 Modellmatrix	30
2.4.3 Virtuelles Forschungsflugzeug	32

3	Beschreibung von Flugzeug-Aktuatorssystemen	35
3.1	Aufbau von Flugsteuerungssystemen	35
3.2	Elektro-mechanische Flugsteuerungsaktuatoren	39
3.3	Herausforderungen im Integrations- und Testprozess	43
3.3.1	Herausforderungen auf Komponentenebene	43
3.3.2	Herausforderungen auf Systemebene	45
3.3.3	Herausforderungen auf Flugzeugebene	46
4	Virtueller Test auf Aktuatorebene	49
4.1	Anforderungen an elektro-mechanische Flugsteuerungsaktuatoren	49
4.2	Modellbildung auf Komponentenebene	51
4.2.1	Ansteuerelektronik	53
4.2.2	Leistungselektronik	54
4.2.3	Elektrischer Motor	54
4.2.4	Mechanische Transmission	55
4.3	Definition komponentenspezifischer Testfälle	57
4.4	Durchführung der virtuellen Testkampagne	60
4.5	Testauswertung auf Komponentenebene	62
4.6	Fazit des virtuellen Tests auf Komponentenebene	66
5	Systemintegration	69
5.1	Elektrisches Energieversorgungssystem	69
5.1.1	Leistungszeugung	69
5.1.2	Leistungsverteilung	71
5.1.3	Elektrische Verbraucher	73
5.1.4	Systemarchitektur des elektrischen Bordnetzes	74
5.2	Anforderungen an das elektrische Versorgungssystem	76
5.3	Aktuatorauswahl und Leistungsallokation für ein voll-elektrisches Flugsteuerungssystem	80
5.4	Modellbildung auf Systemebene	83
5.4.1	Synchrongenerator	84
5.4.2	Brennstoffzelle	85
5.4.3	Transformator-Gleichrichter	87

5.4.4	Wechselrichter	88
5.4.5	Gleichspannungswandler	88
5.4.6	Generalisiertes Lastmodell	89
5.4.7	Flugsteuerungsaktuatoren	90
6	Virtueller Integrationstest auf Systemebene	91
6.1	Beschreibung systemrelevanter Flugmissionsdaten	91
6.1.1	Definition der Referenzflugmission	91
6.1.2	Elektrische Lastanalyse	93
6.1.3	Elektrisches Energiemanagement	96
6.2	Definition systemspezifischer Testfälle	97
6.3	Durchführung und Auswertung virtueller Systemintegrationstests	100
6.4	Fazit des virtuellen Systemintegrationstests	108
7	Integration auf Flugzeugebene	111
7.1	Anforderungen an das Flugsteuerungssystem auf Flugzeugebene	111
7.1.1	Gesetzliche Richtlinien	112
7.1.2	Militärische Standards	113
7.2	Flugdynamische Bewertung	113
7.2.1	Einteilung der Flugeigenschaftskriterien	114
7.2.2	Charakteristisches Eigenverhalten des Flugzeuges	115
7.2.3	Flugeigenschaftskriterien	116
7.2.4	Flugleistungsbewertung	118
7.2.5	Missionsanalyse	122
7.3	Modellbildung auf Flugzeugebene	123
7.3.1	Flugmechanische Modellierung	124
7.3.2	Modellierung für SysFUEL ⁺	127
8	Bewertung auf Flugzeugebene	133
8.1	Prozess der Bewertung auf Flugzeugebene	133
8.2	Bewertung der Flugeigenschaften und -leistungen	135
8.2.1	Definition der Testfälle auf Flugzeugebene	137
8.2.2	Auswertung der Testfälle auf Flugzeugebene	140
8.3	Missionsbewertung auf Flugzeugebene	144
8.3.1	Definition der Referenzflugmission	146

8.3.2	Definition der Systemrandbedingungen	148
8.3.3	Auswertung auf Missionsebene	151
8.4	Fazit des virtuellen Gesamtintegrationstests	153
9	Zusammenfassung und Ausblick	157
A	Zusätzliche Testergebnisse auf Komponentenebene	161
B	Zusätzliche Testergebnisse auf Systemebene	163
C	Grenzwerte der Flugeigenschafts- und Flugleistungskriterien	165
	Literaturverzeichnis	171