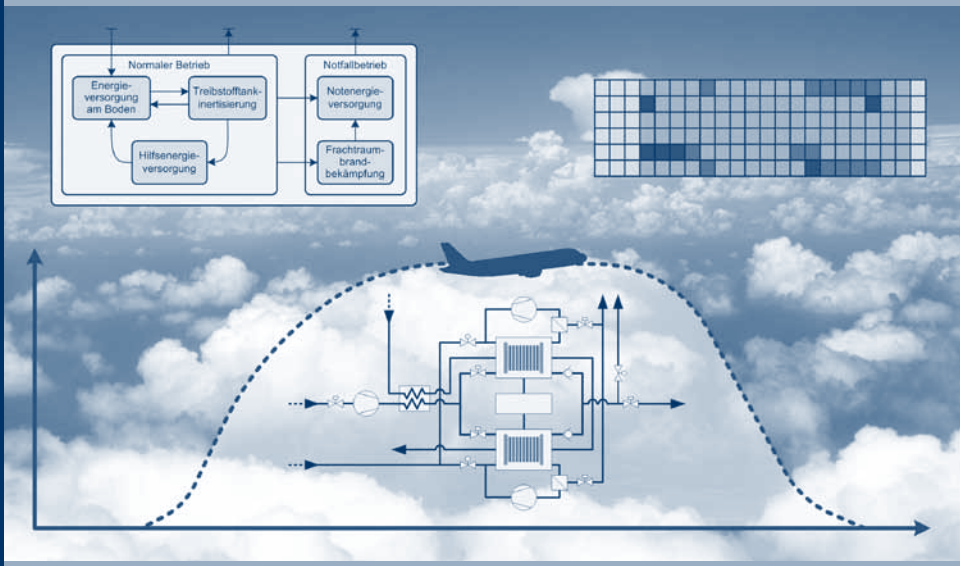
SCHRIFTENREIHE FLUGZEUG-SYSTEMTECHNIK

Jan Grymlas
Hamburg

Systemautomatisierung für den multifunktionalen Betrieb von Brennstoffzellen in Verkehrsflugzeugen



03-2017

Systemautomatisierung für den multifunktionalen Betrieb von Brennstoffzellen in Verkehrsflugzeugen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing.
Jan Grymlas

aus Hamburg

2017

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. Oktober 2017

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 3/2017

Jan Grymlas

Systemautomatisierung für den multifunktionalen Betrieb von Brennstoffzellen in Verkehrsflugzeugen

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5635-8
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

Für Jennifer

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Das bearbeitete Thema wurde im Rahmen des Forschungsprojektes FUCHS (FUel Cell and Hydrogen Systems) vom Bundeswirtschaftsministerium durch das Luftfahrtforschungsprogramm IV gefördert.

Mein erster und ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen und die von ihm geschaffenen Rahmenbedingungen am Institut haben diese Dissertation erst möglich gemacht. Darüber hinaus haben seine Unterstützung, die mir gewährten wissenschaftlichen Freiräume und die zugestandene Selbstständigkeit wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann für die freundliche Bereitschaft, das Zweitgutachten für diese Arbeit zu verfassen.

Weiterhin möchte ich mich bei allen beteiligten Partnern im Forschungsprojekt FUCHS bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Barnaby Law und Jörg Tappermann von der Airbus Operations GmbH, die den Austausch und die Zusammenarbeit im Projekt immer gefördert haben.

Herzlich danken möchte ich auch allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen, die mich während meiner Zeit am Institut für Flugzeug-Systemtechnik begleitet haben. Neben den fachlichen Diskussionen werden mir die gemeinsamen Aktivitäten und die freundschaftliche Atmosphäre in guter Erinnerung bleiben. Besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Hauke Lüdders, Dr.-Ing. Enno Vredenborg, Hendrik Strummel und Robert Doering für die Zusammenarbeit in den Bereichen Modellierung und Brennstoffzellensysteme. Ein großer Dank geht auch an Tobias Kreitz für die Diskussionen und die gemeinsame Arbeit im Bereich der virtuellen Integration. Weiterhin möchte ich mich für die freundschaftliche Verbundenheit bedanken, insbesondere bei Mike Montel, Matthias Krings und Tim Schlottbohm.

Ein großer Dank gilt auch meinen ehemaligen Studenten. Besonders hervorheben möchte ich die Unterstützung durch Sascha Lehmann sowie die Arbeiten von Kristin Knöll und Nicolas Sedlmair.

Abschließend gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Familie. Insbesondere meine Frau Jennifer hat mich immer unterstützt und mir die nötigen Freiräume geschaffen, um diese Arbeit abzuschließen. Zudem erinnert mich mein Sohn Johann durch sein Lachen jeden Tag aufs Neue daran, was im Leben wirklich wichtig ist. Vielen Dank dafür!

Marbach am Neckar, im Oktober 2017 Jan Grymlas

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **xiii**

Tabellenverzeichnis **xvii**

Nomenklatur **xix**
Formelzeichen xix
Indizes xxiv
Abkürzungen xxvii

1 Einleitung **1**
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik 4
1.1.1 Brennstoffzellen in der Luftfahrt 5
1.1.2 Integrierte Entwicklung von Automatisierungssystemen 9
1.1.3 Modellierung von Brennstoffzellensystemen 18
1.2 Problemstellung und Inhalte der Arbeit 21
1.3 Gliederung der Arbeit 24

2 Automatisierter Betrieb multifunktionaler Brennstoffzellensysteme **27**
2.1 Beschreibung von Systemen und Komponenten 28
2.1.1 Grundlagen der PEM-Brennstoffzelle 28
2.1.2 Systemarchitektur und Teilsysteme 32
2.2 Multifunktionale Betriebsstrategie 36
2.3 Automatisierungskonzept 40
2.3.1 Modularisierung und hierarchische Struktur 41
2.3.2 Rückkopplungskonzept und Schnittstellen 45

3 Modellbildung von Komponenten und Systemen **49**
3.1 Physikalischer Modellierungsansatz 50
3.1.1 Generalisierte Leistungs- und Energiegrößen 51

3.1.2 Generalisierte physikalische Modellierungselemente . . . 54
3.1.3 Aufbau physikalischer Netzwerke 58
3.2 Verwendete physikalische Domänen 62
3.3 Beispiele umgesetzter Komponentenmodelle 64
3.3.1 Rohrleitung 65
3.3.2 Kompressor 69
3.3.3 Regelventil 71
3.3.4 PEM-Brennstoffzellenstack 71
3.3.5 Abgasentfeuchtung 78

4 Entwicklung ereignisdiskreter Automatisierungssysteme 83
4.1 Modellierung ereignisdiskreter Systeme 83
4.1.1 Endliche deterministische Automaten 84
4.1.2 Statecharts 86
4.2 Beispiele implementierter Automatisierungsmodule 90
4.2.1 Übergeordneter Funktionsmanager 90
4.2.2 Steuerung und Überwachung der Luftversorgung 97
4.3 Formale Verifikation separater Module 106
4.3.1 Modellprüfung und temporale Logik 106
4.3.2 Eigenschaften für formale Korrektheit 109
4.3.3 Umsetzung der Modellprüfung 111
4.3.4 Erzeugung und Darstellung von Ergebnissen 114

5 Modellbasierter Entwurf dynamischer Regelungen 119
5.1 Entwurf optimaler Mehrgrößenregler 120
5.1.1 Erweitertes Zustandsraummodell 121
5.1.2 Definition und Minimierung eines Gütefunktionals . . . 122
5.2 Massenstrom- und Druckregelung in der Luftversorgung 124
5.2.1 Systemmodell für Reglerentwurf 124
5.2.2 Verhalten der Regelstrecke 126
5.2.3 Struktur und Parametrisierung der Regelung 130
5.2.4 Validierung der Regelung in der Simulation 134
5.3 Regelung der Abgastrocknung 138
5.3.1 Modell und Verhalten der Regelstrecke 138

5.3.2 Aufbau der Regelung 141
5.3.3 Validierung der Regelung in der Simulation 142

6 Virtuelle Integration und szenariobasiertes Testen 145
6.1 Virtuelle Integration auf Flugzeugebene 146
6.2 Automatisierte Erzeugung von Testszenarien 149
6.2.1 Modellierung von Testszenarien 149
6.2.2 Algorithmen für die Pfaderzeugung 153
6.2.3 Beispiel für vollständige Menge erzeugter Pfade 157
6.3 Analyse und Auswertung durch Agenten 158
6.3.1 Validierung von Gesamtsystemfunktionen 159
6.3.2 Überdeckungsanalyse 163
6.4 Simulation von Testszenarien 165
6.5 Reduzierung der Menge an Testszenarien 167

7 Umsetzung und exemplarische Ergebnisse 169
7.1 Implementierung als Software-Werkzeug 169
7.1.1 Allgemeiner Aufbau 170
7.1.2 Umsetzung der Funktionen 171
7.2 Ergebnisse ausgewählter Testszenarien 175
7.2.1 Nominale Flugmission 175
7.2.2 Flugmission mit einem parallelen Ereignis 183
7.2.3 Flugmission mit zwei sequentiellen Ereignissen 190
7.3 Virtuelle Demonstration 192
7.3.1 Aufbau des virtuellen Demonstrators 192
7.3.2 Exemplarische Flugmission 195

8 Zusammenfassung und Ausblick 199

A Anhang 203
A.1 Schnittstellen der Automatisierungsmodule 203
A.2 Wertemengen für Kommandosignale und Rückmeldungen . . . 211
A.3 Zusammenfassung der multifunktionalen Betriebsstrategie . . . 218

Literaturverzeichnis 219