

Eine Methode zur optimalen Redundanzallokation im Vorentwurf fehlertoleranter Flugzeugsysteme

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing.
Christian Raksch

aus Neumünster

2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke
Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Luckner
Fachgebiet Flugmechanik, Flugregelung
und Aeroelastizität
Institut für Luft- und Raumfahrt
Technische Universität Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Februar 2013

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2013

Christian Raksch

**Eine Methode zur optimalen Redundanzallokation
im Vorentwurf fehlertoleranter Flugzeugsysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2039-7

ISSN 1861-5279

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Safety is built in, not added on.

DUANE KRITZINGER [61]

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entstanden.

Für die Betreuung und die Freiheiten bei der Erstellung dieser Dissertation, die Erfahrungen in der Forschung, Lehre und im Projektmanagement, die unzähligen Dialoge und die Zeit am Institut für Flugzeug-Systemtechnik danke ich Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke. Für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des zweiten Gutachtens danke ich Prof. Dr.-Ing. Robert Luckner. Meine andauernde Faszination an der Systemtechnik bleibt Prof. Dr.-Ing. Udo B. Carl geschuldet, vielen Dank.

Für die Impulse und Dialoge zu dieser Arbeit danke ich allen ehemaligen Projektpartnern aus den Forschungsprojekten MOET, SIMKAB und BRINKS. Besonders für die Erfahrungen im Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse der Airbus Operations GmbH danke ich Dr.-Ing. Michael Oppermann und Dr.-Ing. Uwe Wiezcorek. Für Ihre Anteile an dieser Dissertation möchte ich zudem allen meinen ehemaligen Studenten danken, die Ihre Arbeit bei mir geschrieben haben. Zudem gilt mein Dank jenen, die durch kritische Nachfragen und Anregungen auf Konferenzen oder während der Doktorandendialoge meine Arbeit unterstützt und vorangebracht haben.

Die Zeit am Institut für Flugzeug-Systemtechnik war nicht nur von herausfordernden und interessanten Projekten geprägt, sondern auch von einzigartigen Kollegen. Ich bedanke mich herzlich bei allen ehemaligen Kollegen während meiner Zeit dort und besonders bei Dipl.-Ing. Martin Halle, Dipl.-Ing. Torben Pielburg, Dr.-Ing. Malte Pfennig und Dr.-Ing. Dominick Rehage.

Diese Arbeit und die vorherige Ausbildung wären ohne die Unterstützung meiner Eltern und meiner Familie so nicht möglich gewesen, hierfür werde ich Ihnen stets dankbar sein. Ganz besonders bin ich meiner Frau Franca zu Dank verpflichtet: sie hat mich seit der Konstruktionsaufgabe im dritten Semester immer unterstützt. Diese Arbeit ist ihr, unserem Sohn Lasse und unserer wachsenden Familie gewidmet.

Boostedt im Juli 2013

Christian Raksch

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Nomenklatur	xvii
Formelzeichen	xvii
Indizes	xix
Abkürzungen	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Vorentwurfsmethoden für Flugzeugsysteme	4
1.2 Ziele der Arbeit	11
1.3 Gliederung der Arbeit	13
2 Entwicklung von Flugzeug-Systemarchitekturen	15
2.1 Entwicklungsprozess von Flugzeugsystemen	19
2.2 Integrierte Entwicklung von Systemarchitekturen	26
3 Sicherheits- und zuverlässigkeitstechnische Bewertungsverfahren	31
3.1 Hybride Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse	31
3.1.1 Zuverlässigkeitsblockdiagramme	34
3.1.2 Zustandsdiskretes Systemmodell	39
3.1.3 Hybrides Systemmodell	42
3.2 Methoden der Redundanzallokation	48
3.2.1 Übersicht bestehender Methoden	50
3.2.2 Zusammenfassender Vergleich und Diskussion	53
3.3 Konzept zur Redundanzallokation komplexer Flugzeug- Systemarchitekturen	54

4	Hybride Systemmodellierung variabler Strukturen	61
4.1	Beschränkung binärer Entscheidungsbäume durch Nebenbedingungen	62
4.2	Ermittlung der Systemfunktionen variabler Strukturen	67
4.2.1	Zuverlässigkeitsblockdiagramme variabler Strukturen	68
4.2.2	Hybride Systemmodelle variabler Strukturen	70
4.3	Variation serieller Strukturen	73
4.3.1	Serielle Strukturen von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen	74
4.3.2	Serielle Strukturen von hybriden Systemmodellen	78
4.4	Ableitung degradierteter Systemzustände	79
4.5	Berücksichtigung summativer Zielgrößen	81
5	Optimale Redundanzallokation variabler Strukturen	83
5.1	Formulierung und Klassifizierung des Optimierungsproblems	83
5.2	Diskussion der Optimierungsverfahren	85
5.2.1	Vollständige Enumeration	89
5.2.2	Branch & Bound Verfahren	91
5.2.3	Genetischer Algorithmus	99
5.3	Vergleichende Bewertung der Optimierungsverfahren	108
6	Unterstützung der Architekturauswahl und Implementierung	113
6.1	Visualisierung mehrdimensionaler Zielwerte	113
6.2	Hierarchische Architekturauswahl	117
6.3	Integration in den Entwicklungsprozess	121
6.4	Illustratives Anwendungsbeispiel	123
6.5	Implementierung der Redundanzallokation	134
7	Anwendung der Methode zur optimalen Redundanzallokation	139
7.1	Modellbildung	142
7.2	Lösungsinterpretation	147
7.2.1	Diskussion der Systemarchitekturen und Optimierungsergebnisse	147
7.2.2	Diskussion des Genetischen Algorithmus	155
8	Zusammenfassung und Ausblick	159

A Illustratives Beispiel	165
B Industrielles Beispiel	171
Literaturverzeichnis	175