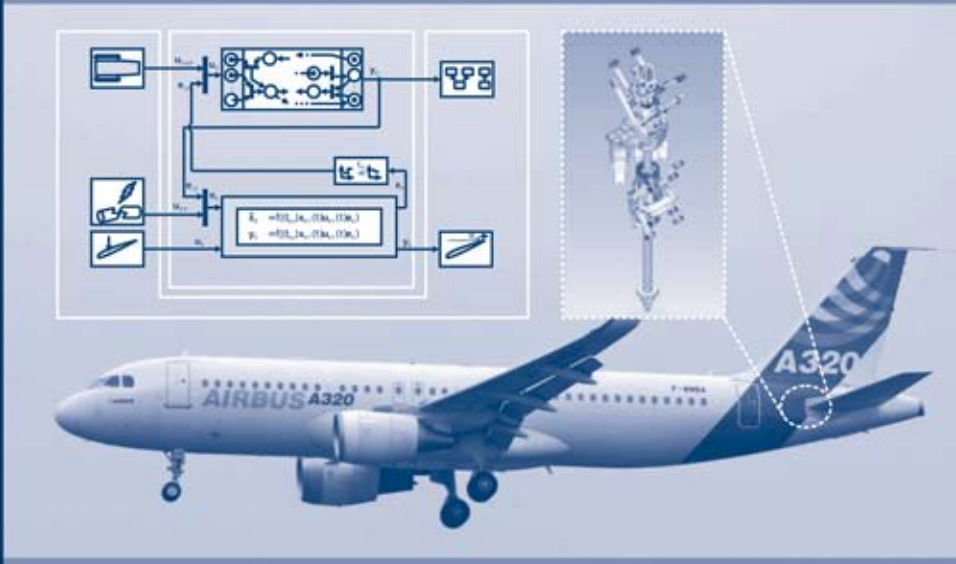
SCHRIFTENREIHE FLUGZEUG-SYSTEMTECHNIK

Swantje Johnsen
Reinbek

Modellbasierter Entwurf und virtuelle Validierung eines Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker



01-2017

Modellbasierter Entwurf und virtuelle Validierung eines Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker

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

von

Diplom-Ingenieurin
Swantje Johnsen

aus Reinbek

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:	29. Mai 2017

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2017

Swantje Johnsen

Modellbasierter Entwurf und virtuelle Validierung eines Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker

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 978-3-8440-5569-6
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

Diese Doktorarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Ich möchte meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für sein mir entgegengebrachtes Vertrauen und seine Unterstützung danken. Die mir gewährte wissenschaftliche Freiheit hat mir erst die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben. Weiterhin möchte ich meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann für die freundliche Bereitschaft danken, im Rahmen des Promotionsverfahrens sich der Verfassung des Zweitgutachtens anzunehmen.

Die inhaltlichen Grundlagen für diese Dissertation entstanden im vom Bundesministerium geförderten Forschungsprojekt „THSA Plus“. Einen großen Dank möchte ich der Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, insbesondere Thomas Epple, für die sehr gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit aussprechen.

Die Zeit am Institut für Flugzeug-Systemtechnik war nicht nur von Herausforderungen und interessanten Projekten geprägt, sondern auch von einzigartigen Kollegen. An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen und sehr guten Freund Dr.-Ing. Dennis Doberstein bedanken, der mich in allen Lebenslagen unterstützt. Stellvertretend für alle ehemaligen Kollegen möchte ich mich auch bei Mike Montel und Michael Neumann bedanken. Weiterhin danke ich meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Nils Wachendorf für die hervorragende Einarbeitung und Tobias Kreitz für die gewinnbringende Zusammenarbeit. Darüber hinaus geht ebenso mein Dank an meine ehemaligen Studenten, insbesondere Johannes Chodura, für den wertvollen Beitrag an dieser Arbeit.

Die Ausbildung und die Dissertation wären ohne die Unterstützung meiner Eltern nicht möglich gewesen, hierfür bin ich ihnen dankbar. Meinem Bruder und meinen Freunden, insbesondere Cornelia Sternberg, möchte für ihren großartigen Rückhalt und uneingeschränkte Nachsicht danken. Mein besonderer Dank gilt meinem Mann, der mich gerade die letzten arbeitsreichen Jahre immer unterstützt hat. Die Arbeit ist ihm und unser wachsenden Familie gewidmet.

Münster, im September 2017 Swantje Bashiri (Geb. Johnsen)

Zusammenfassung

Konventionelle Höhenflossenstellsysteme heutiger Verkehrsflugzeuge bestehen aus einer komplexen fail-safe Konstruktion, deren Lastpfade nicht oder nur eingeschränkt auf Fehlerfreiheit testbar sind. Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung eines neuen Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker, das in Zusammenarbeit mit Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH konzipiert wurde und sich durch einen testbaren Zuganker sowie einem redundanten Antrieb mit zwei Motoren im aktiv/standby Betrieb vom konventionellen System unterscheidet. Anstelle der Rücklaufbremse auf der Spindel wird eine speziell für den Anwendungsfall entwickelte, ausfallsichere Bremse am Zuganker verwendet. Des Weiteren kommen neue Sensorsysteme zum Einsatz.

Auf Basis eines entwickelten Entscheidungskatalogs wird das Höhenflossenstellsystem mit testbarem Zuganker im Vergleich zum konventionellen System sowie alternativen Systemlösungen bewertet. Der vorgestellte Bewertungsprozess bietet Bewertungshilfen, welche sich allgemein auf die Bewertung anderer mechatronischer Systeme anwenden lassen. Aus der Bewertung geht das Potential des neuen Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker deutlich hervor.

Der Aufbau eines hybriden Systemmodells des neuen Höhenflossenstellsystems dient als Basis der Entwurfs- und Analyseverfahren. Das dynamische Verhalten der elektromechanischen Komponenten und des Reglers wird als kontinuierlicher Teil modelliert. Die Modellierung der Steuerung und der Überwachung erfolgt durch ereignisdiskrete Teile in Form von Petri-Netzen.

Zur Regelung des Höhenflossenstellsystems wird ein Kaskadenregler entworfen, der aus drei ineinander verschachtelten Regelkreisen besteht. Zur Erfüllung der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Sicherheit ist zusätzlich zur eigentlichen Steuerung eine Systemüberwachung zur Erkennung aller Fehlerfälle im System sowie das Herbeiführen entsprechender Fehlerreaktionen erforderlich. Insbesondere die Bestimmung der Grenzwerte zur Merkmalerzeugung und Fehlererkennung sowie die Erreichbarkeitsanalyse mithilfe der auf der *Zonotopen Approximation* basierenden Iteration (*Level Set* Methode bei

Systemordnung $n \leq 4$) stellen neue Anwendungen dar und bieten neue Entwurfshilfen, deren Anwendung sich auch auf andere mechatronische Systeme übertragen lassen.

Um alle Anforderungen an das Höhenflossenstellsystem mit testbarem Zuganker, insbesondere das Verhalten nach einem Fehlerfall, zu überprüfen, wird das Konzept der virtuellen Validierung als Unterstützung der Qualifikations- und Zulassungsverfahren vorgestellt. Das Vorgehen ist nicht an spezielle Anwendungen gebunden und für alle Flugzeugsysteme allgemeingültig. Die Testsequenzen, die das gesamte Funktionsspektrum des Testobjektes inklusive Nominal- und Fehlerverhalten abdecken, werden systematisch aus den an das System gestellten Anforderungen mithilfe von Erreichbarkeitsanalysen erzeugt. Ziel ist dabei die Reduzierung der Testsequenzen und damit die Verringerung der Anzahl an virtuellen Tests. Für die Anwendung auf Systeme höherer Ordnung hat sich die *Zonotope Approximation* sowie die auf der *Zonotopen Approximation* basierende Iteration durchgesetzt. Die *Level Set* Methode ist bei Systemen kleiner Ordnung $n \leq 4$ vorzuziehen. Die Identifikation der für das System kritischen Betriebspunkte unter Verwendung von Erreichbarkeitsanalysen stellt eine neue Anwendung der Erreichbarkeitsanalysen dar und lässt sich auf andere mechatronische Systeme - auch im Rahmen anderer Anwendungsszenarien - übertragen. Durch die in dieser Arbeit beschriebene und durchgeführte virtuelle Validierung ist der modellbasierte Nachweis der Umsetzbarkeit des Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker erbracht.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **xiii**

Tabellenverzeichnis **xvii**

Nomenklatur **xix**

1 Einleitung **1**
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik 3
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit 7

2 Integrationsaspekte und Technologiebewertung **11**
2.1 Prinzip des Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker . 12
2.2 Erprobte Neuentwicklungen von Höhenflossenstellsystemen . . 16
2.2.1 Höhenflossenstellsystem mit redundanten selbstsynchronisierenden Lastpfaden 16
2.2.2 Höhenflossenstellsystem mit zwei getrennten Hydraulikzylindern 18
2.3 Technologiebewertung von Höhenflossenstellsystemen 21
2.3.1 Kriterien 21
2.3.2 Bewertung 22
2.4 Integrationsaspekte 26
2.4.1 Zwei primäre Lastpfade 26
2.4.2 Ein Primär- und ein Sekundärlastpfad 32
2.4.3 Integrationsbeispiele neuer Höhenflossenstellsysteme . . 33
2.5 Bewertung des Konzeptes mit testbarem Zuganker 34
2.5.1 Kriterienausprägungen der Architekturen 34
2.5.2 Bewertung anhand eines Entscheidungskataloges 36
2.5.3 Fazit 40

3 Hybride Systemmodellierung des THSA **43**
3.1 Kontinuierliches Teilsystem 44
3.1.1 Grundelemente des mechanischen Modellteils 47
3.1.2 Permanentmagneterregter Elektromotor 51
3.1.3 Getriebeeinheit 59
3.1.4 Spindelaktuator 62
3.1.5 Höhenflosse 69
3.1.6 Elektromechanisches Gesamtsystem 71
3.2 Ereignisdiskretes Teilsystem 73
3.2.1 Modellierung über Petri-Netze 75
3.3 Hybrides Gesamtsystem 77

4 Steuerung und Überwachung des THSA **83**
4.1 Entwurf der Regelung 84
4.1.1 Stromregelkreis 85
4.1.2 Drehzahlregelkreis 89
4.1.3 Positionsregelkreis 92
4.2 Entwurf der Fehlerüberwachung und Systemsteuerung 103
4.2.1 Fehlereingrenzung und Sensorik 105
4.2.2 Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse 106
4.2.3 Merkmalerzeugung und Fehlererkennung 108
4.2.4 Fehlerdiagnose und Systemreaktion 118
4.2.5 Erreichbarkeitsanalyse des hybriden Systems 123
4.3 Vorflugtest 139
4.4 Zusammenfassung 142

5 Konzept der virtuellen Validierung **145**
5.1 Definition 146
5.2 Methodik 148
5.2.1 Testgenerierung mithilfe von Erreichbarkeitsanalysen . . 150
5.2.2 Testauswertung und -dokumentation 161
5.3 Fazit 162

6 Virtuelle Erprobung des neuen THSA **165**
6.1 Testgenerator 167

6.2 Testergebnisse 170
6.2.1 Normalbetrieb 173
6.2.2 Klemmfall im aktiven Getriebe 173
6.2.3 Fehlerhaftes Setzen der Zugankerbremse 175
6.2.4 Bruch des belasteten Spindelteils 177
6.2.5 Zusammenfassung 181

7 Zusammenfassung und Ausblick 183

A Anhang 189
A.1 Paarvergleichsmatrizen der Forderungsprofile 189
A.2 FMEA des Systems 204
A.3 Fehlergruppen 209

Literaturverzeichnis 211

Abbildungsverzeichnis

1.1 Höhenleitwerk 1
1.2 Konventionelles Höhenflossenstellsystem [Car04] 4

2.1 Prinzip des Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker . . . 13
2.2 Aufbau des Höhenflossenstellsystems mit redundanten selbstsynchronisierenden Lastpfaden [Car04],[Wac11] 17
2.3 Aufbau des Höhenflossenstellsystems mit zwei getrennten Hydraulikzylindern [Kli06] 19
2.4 Anbindungen der verschiedenen Lastpfadanordnungen 27
2.5 Krafteinleitung in den Flugzeugrumpf bei einem defekten Lastpfad 28
2.6 Triebwerksausfall nach dem Startvorgang 29
2.7 Geometrische Verhältnisse der Lastpfade 31
2.8 Spinnennetzdiagramm der Kriterienausprägungen 35
2.9 Spinnennetzdiagramm der Technologiebewertungsergebnisse 39
2.10 Prototyp des Höhenflossenstellsystems mit testbarem Zuganker . . 41

3.1 Übersicht über die Systemklassen nach [Mün06] 44
3.2 Modell eines erweiterten, kontinuierlichen Teilsystems nach [Gei09], [Mül02] 45
3.3 Schnittgrößen am Wellenabschnitt nach [Pe08] 47
3.4 Ein- und Ausgänge der Übersetzung 49
3.5 Aufbau eines permanentmagneterregten Synchronmotors mit $Z_p = 1$ nach [Sch07] 53
3.6 Ein- und Ausgänge des Motormodells 54
3.7 Aufbau eines drehzahlgeregelten, permanentmagneterregten Synchronmotors nach [Neu02] 56
3.8 Ausgangsbegrenzter PI-Regler mit *Anti-Windup* nach [Gei09] . . . 57
3.9 Teilmodelle der Getriebeeinheit 60

3.10 Teilmodelle des Spindelaktuators 64
3.11 Teilmodelle der torsionsbelasteten Spindeleinheit 65
3.12 Freikörperbild der Höhenflosse 69
3.13 Signalflussdiagramm des kontinuierlichen Teilsystems 72
3.14 Modell des ereignisdiskreten Teilsystems nach [Gei09] 74
3.15 Graphische Darstellung eines Petri-Netzes 76
3.16 Modell des hybriden Gesamtsystems 80
3.17 Ablaufdiagramm des Petri-Netz-Zustandsraummodells nach [Mül02] und [Gei09] 81

4.1 Kaskadenregelungsstruktur des kontinuierlichen Gesamtsystems . . 84
4.2 Bodediagramm des geschlossenen Stromregelkreises 88
4.3 Sprungantwort des Stromregelkreises - Nichtlineares Modell 88
4.4 Bodediagramm der offenen Kette 91
4.5 Führungsübertragungsverhalten des geschlossenen Drehzahlregelkreises 91
4.6 Bodediagramm der Regelstrecke 94
4.7 Regelkreisstruktur 95
4.8 Bodediagramm der offenen Kette und Wurzelortskurve des geschlossenen Positionsregelkreises 97
4.9 Sprungantworten des positionsgeregelten Stellsystems 97
4.10 Bodediagramm des geschlossenen Positionsregelkreises 99
4.11 Rekonfigurierte Regelkreisstruktur 100
4.12 Bodediagramm der offenen Kette und Wurzelortskurve des geschlossenen rekonfigurierten Positionsregelkreises 101
4.13 Sprungantworten des rekonfigurierten positionsgeregelten Stellsystems 102
4.14 Bodediagramm des geschlossenen rekonfigurierten Positionsregelkreises 102
4.15 Angepasster Überwachungskreis nach [Ise94], [Wac11] 104
4.16 Erreichbare Menge für den Zustand 2Mot und 1Mot mit intaktem SPS 113
4.17 Bestimmung der maximalen Werte für die Winkeldifferenzen . . . 115
4.18 Aufbau des Petri-Netzes zur Realisierung der Steuerung und Überwachung 122

4.19 Algorithmus zur Konstruktion des Erreichbarkeitsgraphen nach [Abe90] . . . 129
4.20 Beispiele für Konfliktsituationen . . . 130
4.21 Kondensierter Erreichbarkeitsgraph des Petri-Netzes . . . 132
4.22 Erreichbare Menge der ersten Positionsdifferenz des Symptoms 8 . 135
4.23 Erreichbare Menge der zweiten Positionsdifferenz und des Stroms i_d des Symptoms 8 . . . 135
4.24 Erreichbare Menge der zweiten Positionsdifferenz des Symptoms 2 und der Winkelgeschwindigkeit des Symptoms 3 . . . 137
4.25 Erreichbare Menge zur Überprüfung der Solldrehzahl des Symptoms 12 und der Drehzahlregelabweichung des Symptoms 13 . . . 138
4.26 Erreichbare Menge der Motordrehzahl im Stillstand (links) und während des Verfahrens (rechts) . . . 139
4.27 Erreichbare Menge der Verfahrrichtung des Symptoms 13 und der Drehgeschwindigkeit ω_{SPS} des Symptoms 9 . . . 139
4.28 Simulationsergebnisse zum Verspannen des Systems . . . 142

5.1 Testebenen [Kre13] . . . 145
5.2 Erweiterter V-Prozess [Kre13] . . . 147
5.3 Ablauf des virtuellen Tests [Kre13] . . . 149
5.4 Bestimmung der Fehlergrenzwerte für die Systemsteuerung in Anlehnung an [Gei09] . . . 152
5.5 Testgenerierung mithilfe von Erreichbarkeitsanalysen . . . 153
5.6 Übergang der Randbewegung zum Anfangswertproblem [Set05] . . 155
5.7 Beispiel eines Zonotops . . . 156
5.8 Überapproximation eines Zonotops $\mathbf{Z}$ mithilfe der $\mathcal{S}$-Band Schnittpunkte nach [GLGM06] . . . 158
5.9 Iteration basierend auf der *Zonotopen Approximation* . . . 159
5.10 Beispiel für eine mögliche Visualisierung der Ergebnisse . . . 161

6.1 Virtuelle Erprobung des neuen THSA . . . 165
6.2 Ablauf des virtuellen Testens . . . 166
6.3 Erreichbare Menge für Spindel- $M_{L,SUS}$ und Zugankerdrehmoment $M_{L,TR}$ des Systems . . . 169

6.4 Übersicht über die Testergebnisse 171
6.5 Testergebnisse für den Normalbetrieb 172
6.6 Testergebnisse des Klemmfalls im aktiven Getriebe 174
6.7 Testergebnisse des fehlerhaften Setzens der Zugankerbremse 176
6.8 Testergebnisse des Spindelbruchs 178
6.9 Testergebnisse des Spindelbruchs mit deaktiviertem Beschleunigungstrigger 180

Tabellenverzeichnis

2.1 Betriebszustände und deren dazugehörige Ventilstellungen [Kli06] 20
2.2 Skala zur Bestimmung der Kriteriengewichte [Loo97] 24
2.3 RI-Werte [SK85] 24
2.4 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 1 37
2.5 Entscheidungskatalog 38

4.1 Ergebnisse der Sprungantworten 92
4.2 Einträge der FMEA 107
4.3 Aufteilung der Betriebszustände in Subzustände 108
4.4 Symptome für die Fehlererkennung 110
4.5 Grenzwerte zur Fehlererkennung 115
4.6 Diagnosetabelle 119
4.7 Beispiele für Anforderungen an Knoten des Graphens 134

6.1 Anforderungen an das THSA-System 168
6.2 Parameter für die Testsequenzen des fehlerfreien Zustandes 168
6.3 Parameter für die Testsequenzen zum Klemmfall im aktiven Getriebe 175
6.4 Parameter für die Testsequenzen zum Fehlerhaften Setzen der Zugankerbremse 177
6.5 Parameter für die Testsequenzen zum Spindelbruch 179
6.6 Parameter für die Testsequenzen zum Spindelbruch mit deaktiviertem Beschleunigungstrigger 180

A.1 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 1 189
A.2 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 2 190
A.3 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 3 190
A.4 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 4 191
A.5 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 5 191

A.6 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 6 192
A.7 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 7 192
A.8 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 8 193
A.9 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 9 193
A.10 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 10 194
A.11 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 11 194
A.12 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 12 195
A.13 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 13 195
A.14 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 14 196
A.15 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 15 196
A.16 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 16 197
A.17 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 17 197
A.18 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 18 198
A.19 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 19 198
A.20 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 20 199
A.21 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 21 199
A.22 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 22 200
A.23 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 23 200
A.24 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 24 201
A.25 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 25 201
A.26 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 26 202
A.27 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 27 202
A.28 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 28 203
A.29 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 29 203
A.30 Paarvergleichsmatrix - Forderungsprofil 30 204
A.31 FMEA für 2Mot mit intaktem SPS 205
A.32 FMEA für 1Mot mit intaktem SPS 206
A.33 FMEA für 2Mot mit defekten SPS 207
A.34 FMEA für 1Mot mit defektem SPS 208
A.35 Zuordnung der Fehlerarten zur Fehlergruppe 210

Nomenklatur

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	[m]	Abstand des Kraftangriffspunktes von der Symmetrieachse
a	[−]	Einstellfaktor des Phasenrandes des Symmetrischen Optimums
a	[−]	Knoten
b	[m]	Abstand zwischen Lastpfadaufhängung und Drehpunktaufhängung der Höhenflosse
b	[−]	Boolesche Variable
c	[Nm/rad]	Torsionssteifigkeit
c	[N/m]	Dehnsteifigkeit
d	[m]	Abstand
d	[Nms/rad]	Torsionsdämpfung
d	[Ns/m]	Strukturdämpfung
d_c	[Nm]	Coulombsche Reibkoeffizient
d_v	[Nms/rad]	viskose Reibkoeffizient
dt	[s]	Zeitschritt
e	[m]	Abstand zwischen Lastpfaden
f	[Hz]	Frequenz
g	[−]	Gewichtung
h	[m]	Hebelarm
i	[−]	Verhältnis
i	[−]	Übersetzung

Zeichen	Einheit	Bedeutung
i	[A]	Strom
j	[−]	Stellsignal
k	[−]	Anzahl der Bauteile
k	[−]	Korrekturfaktor
k	[−]	Proportionalanteil
k	[−]	relative Wichtigkeit
k_R	[−]	Konstante zur Beeinflussung der Übergangsschärfe
k_t	[Nm/A]	magnetische Verstärkungskonstante
l	[−]	Anzahl der Vektoren der Vektormenge $\mathcal{S}$
l	[m]	Länge/Hub
m	[kg]	Masse
n	[−]	Systemordnung
p	[−]	Anzahl der Erzeugervektoren
p	[m/U]	Steigung
r	[−]	maximale Anzahl der Zustände
r	[m]	Radius der Flossenanbindung
s	[Hz]	komplexe Frequenz
t	[s]	Zeit
Δt	[s]	Zeitschritt
u	[V]	Spannung
u_0	[−]	Amplitude des Eingangssignals
v	[m/s]	Geschwindigkeit
w_{ij}	[−]	Priorität des Konzeptes A_i zum Kriterium K_j
x	[m]	Position
z	[−]	Testbarkeitsgrad
A	[dB]	Dämpfung des Regelkreises
A	[−]	Konzept
A	[m^2]	Querschnittsfläche
A_R	[dB]	Amplitudenrand
CI	[−]	Konsistenzindex
CR	[−]	Konsistenzverhältnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
D	$[-]$	LEHRsche Dämpfungsmaß
E	$[\mathrm{N/m^2}]$	Elastizitätsmodul
F	$[\mathrm{N}]$	Kraft
G	$[\mathrm{N/m^2}]$	Schubmodul
GM	$[-]$	geometrisches Mittel
I	$[\mathrm{m^4}]$	Torsionsträgheitsmoment
J	$[\mathrm{kgm^2}]$	Massenträgheit
K	$[-]$	Kriterium
L	$[\mathrm{m}]$	Länge des Lastpfades
L	$[\mathrm{H}]$	Induktivität
M	$[-]$	Anzahl der Kriterien
M	$[\mathrm{Nm}]$	Moment
M_D	$[-]$	Markierung einer Stelle im Petri-Netz
N	$[-]$	Anzahl der Konzepte
R	$[\Omega]$	Ohmscher Widerstand des Motors
RI	$[-]$	stochastischer Index
T	$[\mathrm{Nm}]$	Torsionsmoment
T	$[\mathrm{s}]$	Zeitkonstante/Zeitdauer
T_{tot}	$[\mathrm{s}]$	Totzeit
Z_P	$[-]$	Polpaarzahl

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	$[\mathrm{rad}]$	Einstellwinkel
β	$[\mathrm{rad}]$	Winkel
β	$[-]$	Boolescher Ausdruck
γ	$[\mathrm{rad}]$	Winkel zwischen Gerade durch Lastpfadaufhängung und Höhenflossendrehachse und der Horizontalen
λ	$[-]$	Eigenwert
η	$[-]$	Wirkungsgrad
κ	$[-]$	Kapazität

Zeichen	Einheit	Bedeutung
σ	$[-]$	Stelle eines Petri-Netzes
σ	$[-]$	HANKELeigenwerte
τ	$[\mathrm{s}]$	Auswertezeit
τ	$[-]$	Transition eines Petri-Netzes
φ	$[\mathrm{rad}]$	Winkelposition
ϕ	$[^\circ]$	Phasenverschiebung
ϕ_R	$[^\circ]$	Phasenrand
χ	$[-]$	Kantengewicht eines Petri-Netzes
ω	$[\mathrm{rad/s}]$	Winkelgeschwindigkeit
ω_{tast}	$[1/\mathrm{s}]$	Abtastrate
ω_B	$[1/\mathrm{s}]$	Bandbreite
ω_0	$[\mathrm{Hz}]$	Kreisfrequenz
Ψ	$[\mathrm{Vs}]$	Magnetischer Fluss

Matrizen und Vektoren

Zeichen	Bedeutung
$\mathbf{c}$	Zentrumsvektor
$\mathbf{e}$	Ereignisvektor
$\mathbf{g}$	Erzeugervektor
$\mathbf{m}$	Vektor zur Darstellung des $\mathcal{S}$-Band Schnittpunktes
$\mathbf{s}$	Vektor der Vektormenge $\mathcal{S}$
$\mathbf{u}$	Eingangsvektor
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor
$\mathbf{y}$	Ausgangsvektor
$\mathbf{z}$	Beschreibungsvektor eines Zonotops
$\mathbf{A}$	Systemmatrix
$\mathbf{B}$	Eingangsmatrix
$\mathbf{C}$	Ausgangsmatrix
$\mathbf{D}$	Durchgangsmatrix
$\mathbf{G}$	Prioritätsvektor
$\mathbf{I}$	Vektor aus sich nicht überschneidenden Intervallen

Zeichen	Bedeutung
$\mathbf{K}$	Paarvergleichsmatrix
$\mathbf{M}$	Vektor zur Darstellung des $\mathcal{S}$-Band Schnittpunktes
$\mathbf{W}$	Entscheidungsmatrix
$\mathbf{W}_C$	GRAMsche Steuerbarkeitsmatrix (*engl.* Controllability Gramian)
$\mathbf{W}_O$	GRAMsche Beobachtbarkeitsmatrix (*engl.* Observability Gramian)
$\mathbf{Z}$	Zonotop
Λ	Koppelmatrix zur Festlegung der Verbindungen der einzelnen Teilsysteme miteinander

Funktionen

Zeichen	Bedeutung
f_{Dx}	ereignisdiskrete Zustandsübergangsfunktion
f_{Dy}	ereignisdiskrete Ausgangsfunktion/Abbildung der aus den Marken der Stellen gebildeten ereignisdiskreten Ausgangsgrößen
f_{DK}	ereignisdiskret-kontinuierliche Verknüpfungsfunktion zur Erzeugung von internen Ereignissen für den kontinuierlichen Modellteil
f_{Kx}	kontinuierliche Zustandsübergangsfunktion
f_{Ky}	kontinuierliche Ausgangsfunktion
f_{KD}	kontinuierliche-ereignisdiskrete Verknüpfungsfunktion zur Erzeugung der von dem kontinuierlichen Zustand abhängigen Ereignisse
f_x	Zustandsübergangsfunktion
f_y	Ausgangsfunktion
f_β	Abbildung des zu jeder Transition entsprechend den diskreten Eingängen zugeordneten booleschen Ausdrucks
f_κ	Abbildung der zu jeder Stelle festgelegten Kapazität
f_χ	Abbildung des zu jeder Kante zugeordneten Gewichts
f_0	Abbildung der Anfangsmarkierung

Zeichen	Bedeutung
g_K	Initialisierungsfunktion bei diskreten Ereignissen
u	Eingangssignal
y	Ausgangssignal
F	Allgemeines Differentialgleichungssystem
G	Übertragungsfunktion
K_P	Proportionale Reglerfunktion
T	Funktion der Durchtrittszeit
ϕ	Level Set Funktion
ϕ_{uy}	Kreuzkorrelationsfunktion

Mengen

Zeichen	Bedeutung
$\mathcal{A}$	Knotenmenge der erreichbaren Markierungen eines Petri-Netzes
$\mathcal{B}$	Kantenmenge der schaltfähigen Transitionen eines Petri-Netzes
$\mathcal{B}_D$	boolesche Ausdrucksmenge des interpretierten Petri-Netzes
$\mathcal{E}_D$	endliche Ereignismenge
$\mathcal{E}_K$	endliche Ereignismenge (auf den kontinuierlichen Systemteil wirkend)
$\mathcal{K}$	endliche Kantenmenge
$\mathbb{N}$	Menge natürlichen Zahlen
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathcal{R}_{PN}$	Erreichbarkeitsmenge des ereignisdiskreten Systems
$\mathcal{S}$	endliche Stellenmenge
$\mathcal{S}$	Menge von Vektoren
$\mathcal{T}$	endliche Transitionsmenge
$\mathcal{T}_K$	Zeitbasis
$\mathcal{U}_D$	endliche Menge der ereignisdiskreten Eingangsgrößen
$\mathcal{U}_K$	Menge der kontinuierlichen Eingänge
$\mathcal{X}_h$	Menge der kontinuierlichen und ereignisdiskreten Zustände

Zeichen	Bedeutung
$\mathcal{X}_D$	endliche Menge der ereignisdiskreten Zustände
$\mathcal{X}_K$	Menge der kontinuierlichen Zustände
$\mathcal{Y}_D$	endliche ereignisdiskrete Ausgangsmenge
$\mathcal{Y}_K$	Menge der kontinuierlichen Ausgangsgrößen
ς	Schaltsequenz/Transitionsfolge
Γ_{KD}	Menge der kontinuierlichen-ereignisdiskreten Verknüpfungsfunktionen
Π_F	fehlerhafte Menge
Π_R	erreichbare Menge
Σ_{EK}	Menge erweiterter kontinuierlicher Teilsysteme
Σ_{IPN}	Menge der interpretierten Petri-Netze
Ω	durch die Zonotope Methode überapproximierte erreichbare Menge des kontinuierlichen Systems

Tupel

Zeichen	Bedeutung
E_{PN}	Erreichbarkeitsgraph
ED	ereignisdiskretes Modell
EK	erweitertes, kontinuierliches Modell
HDM	hybrides dynamisches Modell
PN	Petri-Netz
PNZ	Petri-Netz-Zustandsraummodell

Indizes

Index	Bedeutung
a	Ausgang
a,b,c	Achsen des dreiphasigen Statorsystems
akt	aktuelle

Index	**Bedeutung**
akt	aktiv
bet	Betätigungszeitpunkt
br	Bremswirkung durch Zähne
cl	geschlossen (*engl.* closed)
con	konventionell (*engl.* conventional)
d,q	Achsen des zweiphasigen Rotorsystems
e	Eingang
el	elektrisch
error	Fehler (*engl.* error)
ges	gesamt
grenz	Grenzwert
h	hybrid
hub	Hub
i	integral
i	intern
i	Strom-Regler
jam	Klemmen (*engl.* jam)
klemm	Klemmfall
max	maximal, Maximum
mD	Zähler für Transitionsmenge
n	normal
n	Zähler für endliche Menge diskreter Zustände
nD	Zähler für Stellenmenge
p	Zähler für endliche diskrete Eingangsmenge
p	Positionsregler
p	proportional
pce	Motorregler (*engl.* power control electronic)
q	Zähler für endliche diskrete Ausgangsmenge
r	Zähler für endliche Ereignismenge
re	Rekonfiguration
s	Seite in Bereitschaft (*engl.* standby)
s	Strecke
soll	Sollwert

Index	**Bedeutung**
still	Stillstand
sys	System
t	tagential
tol	Toleranz
x,y,z	Koordinatenachsen
Anb	Anbindung
Ans	Anschlag
AP	Autopiloten-/Pilotenvorgabe
Asym	Asymmetrie
BS	torsionsbelasteter Teil der Spindeleinheit
BT	Balanced Truncation
D	ereignisdiskret
E	nachfolgende Element des mechanischen Spiels
EG	Eingangsgetriebe
EGa	aktives Eingangsgetriebe
EGs	passives Eingangsgetriebe
F	Fehlerinjektion
F	Flug
F	voranstehendes Element
G	Getriebeeinheit
G	Glättung
H	Höhenflosse
IB	invariant behavior
K	kontinuierlich
L	Last/Luftlast
La	langsam
$\dot{L}$	Verfahrgeschwindigkeit auf dem Lastpfad
M	Motor
MG	Momentensummiergetriebe
Ms	Motor im Standby-Betrieb
MS	mechanisches Spiel
NK	Kabelschneider der Spindelmutter (*engl.* Nut Kabelschneider)

Index	**Bedeutung**
PI	PI-Regler
PM	Permanentmagnet
POB	ausfallsichere Bremse (*engl.* power off brake)
PWM	Pulsweitenmodulation
R	Flugzeugrumpf
R	Reibung
Res	Koordinatenwandler (*engl.* Resolver)
Richtg	Richtung
S	Seitenleitwerk
S	Spindel-/aktuator
S	Symptom
$\mathcal{S}$	Vektormenge
Sp	Spiel
SAB	Spindel unter Axialbelastung
SM	Spindelmutter
SPS	Positionssensor der Spindel (*engl.* Screw Position Sensor)
ST	Spindel unter Torsionsbelastung
SUS	unbelasteter Spindelteil
T	Torsion
TR	Zuganker (*engl.* Tie Rod)
TRB	Zugankerbremse (*engl.* Tie Rod Brake)
TRK	Kabelschneider des Zugankers (*engl.* Tie Rod Kabelschneider)
TRPS	Positionssensor des Zugankers (*engl.* Tie Rod Position Sensor)
UE	Übersetzung
WA	Wellenabschnitt
ω	Drehzahl-Regler
0	Start/Anfang
$+$	vorwärts
$-$	rückwärts

Abkürzungen

Abk.	**Bedeutung**
dR	diskreter Regler
kR	kontinuierlicher Regler
Abs	Absolutpositionssensor der Höhenflosse
ACE	Regelungs- und Überwachungselektronik (*engl.* actuator control electronics)
ACT	Aktuator (*engl.* actuator)
AHP	Analytische Hierarchie Prozess (*engl.* Analytic Hierarchy Process)
ArsS	Architektur mit redundanten selbstsynchronisierenden Spindeln
AtZ	Architektur mit testbarem Zuganker
AzgH	Architektur mit zwei getrennten Hydraulikzylindern
BLV	Sperrventil (*engl.* blocking valve)
BPV	Bypassventil (*engl.* bypass valve)
BR	Balanced Residualization
BT	Balanced Truncation
C	Verbraucher (*engl.* consumer)
CC	Steuerungseinheit (*engl.* control channel)
CG	Schwerpunkt (*engl.* center of gravity)
CrCM	Kreuzkommunikation (*engl.* Cross Communication)
CrCMpd	Kreuzkommunikation: passive Seite defekt
CrCMpi	Kreuzkommunikation: passive Seite intakt
CSB	Bremse der Verbindungswelle (*engl.* Cross Shaft Brake)
DG	Differentialgetriebe
EHSV	elektrohydraulisches Servoventil
FCPC	primäre Flugsteuerungsrechner (*engl.* flight control primary computer)
FMEA	Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (*engl.* Failure Modes and Effects Analyses)
FMES	Fehlerzustands- und auswirkungszusammenfassung (*engl.* Failure Modes and Effects Summary)
FTA	Fehlerbaumanalyse (*engl.* Fault Tree Anaylysis)

Zeichen	Bedeutung
G	Getriebe
Hyrd.	hydraulisches Energieversorgungssystem
I	Strom
IB-state	invariant behavior state
IPN	interpretiertes Petri-Netz
K	Knoten
K	Kriterium
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
KS	konventionelles System
M	Motor
MAHP	Multiplikative Analytische Hierarchie Prozess (*engl.* multiplicative analytic hierarchy process)
MC	Überwachungseinheit (*engl.* monitor channel)
MCPA	Verstellsteuerungsbaugruppe (*engl.* motion-control-providing assembly)
MG	Momentensummiergetriebe
MG-E	Eingang des Momentensummiergetriebes
MP	Verstellversorger (*engl.* motion provider)
MPPA	Baugruppe zur Verstellerlaubnis und zur Verstellverhinderung (*engl.* motion-permit-prevent assembly)
NB	Rücklaufbremse (*engl.* no back brake)
NK	Kabelschneider der Spindelmutter (*engl.* Nut Kabelschneider)
P	Hochdruckleitung (*engl.* pressure port)
PCE	Motorregler (*engl.* power control electronic)
PN	Petri-Netz
POB	ausfallsichere Bremse (*engl.* power off brake)
PTCE	Flugsteuerungsrechner der Höhenflosse (*engl.* Pitch Trim Control Electronic)
R	Niederdruckleitung (*engl.* return port)
Res	Koordinatenwandler (*engl.* Resolver)
S	Symptome
SB	Bremse der Antriebswelle (*engl.* Shaft Brake)
SOV	Magnetventil (*engl.* solenoid valve)

Zeichen	**Bedeutung**
SPS	Positionssensor der Spindel (*engl.* Screw Position Sensor)
THSA	Höhenflossenstellsystem (*engl.* Trimmable Horizontal Stabilizer Actuator)
TR	Zuganker (*engl.* Tie Rod)
TRB	Zugankerbremse (*engl.* Tie Rod Brake)
TRK	Kabelschneider des Zugankers (*engl.* Tie Rod Kabelschneider)
TRPS	Positionssensor des Zugankers (*engl.* Tie Rod Position Sensor)
U	Elektrische Spannung
UE	Übersetzungsstufe
VDHM	schwenkscheibengeregelter Hydraulikmotor (*engl.* variable displacement hydraulic motor)
VTR	virtueller Prüfstand (*virtual test rig*)
1Mot	ein intakter Motor
2Mot	zwei intakte Motoren