
Robuste Spaltregelung der Hochdruckturbine im Flugtriebwerk

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Otto Lindenborn
aus Mainz

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer

Tag der Einreichung: 04.05.2010

Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2010

Forschungsberichte Mechatronik & Maschinenakustik

Otto Lindenborn

**Robuste Spaltregelung der Hochdruckturbinen
im Flugtriebwerk**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9558-5

ISSN 1616-5470

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

Vorwort

Die vorgestellte Arbeit wurde an der Technischen Universität Darmstadt innerhalb des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Graduiertenkollegs „Instationäre Systemmodellierung von Flugtriebwerken“ in enger Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland erstellt. Meinen Dank möchte ich an alle richten, die mich direkt oder indirekt bei der Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann als Initiator, Referent und Fachgebietsleiter möchte ich für die Ermöglichung dieser Arbeit, die fachliche Betreuung, die kreativen Freiräume und die zahlreichen Diskussionen danken. Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht danke ich für die reibungslose und hilfreiche Unterstützung als Nachfolger von Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann. Für die Übernahme des Korreferats, die technischen Diskussionen und den regen Kontakt mit Rolls-Royce möchte ich Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer danken. Ohne die enge Zusammenarbeit mit Rolls-Royce wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern von Rolls-Royce für die freundliche Unterstützung und die spannenden Diskussionen rund um den Spalt. Besonders bei Herrn Dr. Ivo Szarvasy als direkten Ansprechpartner von Rolls-Royce möchte ich mich für den schnellen und unkomplizierten Austausch von Informationen und Daten, sowie für die zahlreichen Gespräche und Hilfestellungen hinsichtlich SC03 und Fortran bedanken.

Allen Kollegen und Kolleginnen am Fachgebiet und im Graduiertenkolleg möchte ich für die nette Atmosphäre, den fachlichen Austausch und die kreativen Diskussionen danken. Die freundschaftliche Zusammenarbeit mit meinen langjährigen Bürokollegen Bernd Hasch und Markus Marszolek hat auch nach Feierabend immer viel Spaß gemacht und sich mitunter in einigen Veröffentlichungen ausgedrückt. Für die Korrektur der Arbeit möchte ich besonders Mareike Lindenborn, Eva Truelsen, Marek Kowalczyk, Bernd Riemann und Dr. Ivo Szarvasy danken. Den Studenten, die meine Arbeit mit vorangetrieben haben, gilt auch mein Dank, insbesondere Junli Fan, Johannes Tschesche, Vasco Arnold und Marek Kowalczyk.

Nicht zuletzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern, Familie und Freunden für die Hilfe und Unterstützung bedanken. Nur durch euren Rückhalt war es mir möglich den eingeschlagenen Weg zu gehen.



Inhaltsverzeichnis

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMATIK.....	3
1.1.1 Auswirkungen von Spaltänderungen	4
1.1.2 Einflussfaktoren auf den Spalt.....	7
1.2 AKTUELLE SPALTHALTUNGSSYSTEME	18
1.3 ZIELSETZUNG	20
2 SYSTEMKOMPONENTEN	23
2.1 SENSORIK	24
2.1.1 Anforderungen.....	25
2.1.2 Direkte Spaltmessung.....	26
2.1.3 Indirekte Spaltbestimmung	27
2.1.4 Sensormodell	29
2.2 AKTORIK.....	30
2.2.1 Anforderungen.....	31
2.2.2 Thermische Aktoren	32
2.2.3 Mechanische Aktoren	33
2.2.4 Aktormodell.....	35
2.3 PROZESS.....	40
2.3.1 Theoretisches Spaltmodell.....	41
2.3.2 Identifiziertes Spaltmodell.....	43
3 REGELUNG	53
3.1 ANFORDERUNGEN	55
3.2 REGELUNGSKONZEPTE	57
3.3 REGLERSYNTHESE	58
3.3.1 Modellbildung mit Unsicherheiten.....	59

3.3.2	<i>Spezifikation der Regelgüte</i>	66
3.3.3	<i>μ-Synthese</i>	72
3.3.4	<i>Reduktion der Reglerordnung</i>	75
4	VALIDIERUNG	79
4.1	VALIDIERUNG MIT LINEAREN ZUSTANDSRAUMMODELLEN	80
4.2	VALIDIERUNG MIT NICHTLINEAREN THERMO-MECHANISCHEN FE-MODELLEN	81
4.2.1	<i>SCO3 Plug-In für Zustandsraumregler</i>	82
4.2.2	<i>Numerische Effekte</i>	86
4.2.3	<i>Validierung des thermischen Systems</i>	94
4.2.4	<i>Validierung des mechanischen Systems</i>	96
4.3	VALIDIERUNG MIT QUASI-NICHTLINEAREN ZUSTANDSRAUMMODELLEN UND REALEN EINGANGSDATEN	98
4.3.1	<i>Aufbau der quasi-nichtlinearen Modelle</i>	99
4.3.2	<i>Validierung des thermischen Systems</i>	102
4.3.3	<i>Validierung des mechanischen Systems</i>	103
5	POTENZIAL	105
5.1	POTENZIALBERECHNUNG	105
5.2	VERGLEICH DER SYSTEME	108
5.3	SCHLUSSFOLGERUNGEN	119
5.4	AUSBLICK	119
5.4.1	<i>Fehlerdiagnose – Spaltregelung Turbine</i>	121
5.4.2	<i>Thermische Fluid-Struktur-Interaktion – Spaltregelung Turbine</i>	123
6	ZUSAMMENFASSUNG	125
7	LITERATURVERZEICHNIS	129

Abkürzungsverzeichnis

Symbole	Einheit	Beschreibung
A	—	Zustandsmatrix
ALT	m	Flughöhe (altitude)
B	—	Eingangsmatrix
$B(s)$	—	Begrenzungsfunktion
C	—	Ausgangsmatrix
$C(s)$	—	Übertragungsfunktion des Reglers
D	—	Durchgangsmatrix
$D(j\omega)$	—	frequenzabhängige Skalierungsmatrix
$DTAMB$	K	Differenz zur Umgebungstemperatur nach ISA (ambient temperature deviation from ISA)
EPR	—	Triebwerkdruckverhältnis (engine pressure ratio)
$G(s)$	—	Übertragungsfunktion der Regelstrecke
I	—	Einheitsmatrix
I	$\frac{1}{s}$	Integrationsfaktor eines Reglers
M	—	Gewichtungsmatrix
MN	—	Flug-Machzahl (mach number)
N	—	Anzahl
$P(s)$	—	Matrix der gesamten Regelkreis Übertragungsfunktionen
P	—	Verstärkungsfaktor eines Reglers
$S(s)$	—	Empfindlichkeitsübertragungsfunktion
$T(s)$	—	Führungsübertragungsfunktion
TET	K	Turbineneintrittstemperatur (turbine entry temperature)

Symbole	Einheit	Beschreibung
$W(s)$	—	Gewichtungsfunktion
d	—	Störgröße
e	—	Regelabweichung
$error$	—	Identifikationsfehler zwischen Eingangsdaten und Modell
f	—	Betriebszustände ($EPR, MN, ALT, DTAMB$)
i, h, k, v	—	Laufvariablen
j	—	$\sqrt{-1}$
l	m	Länge einer HPT-Komponente
m, n	—	Dimensionen einer Matrix
$\dot{m}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
$\dot{m}\sqrt{T}/p$	$\frac{(\text{kg}\cdot\sqrt{\text{K}})}{(\text{s}\cdot\text{Pa})}$	Durchsatz, reduzierter Massenstrom
r	m	radiale Koordinate
s	—	Laplace Variable
sp	m	Spalt zwischen Schaufelspitze und Gehäuse der HPT
t	s	Zeit
u	—	Stellgröße
w	—	Führungsgröße
x	—	Zustandsvektor
y	—	Regelgröße
z	m	axiale Koordinate
α	—	Relaxationsfaktor
γ	—	Skalare begrenzte Unsicherheit
δ	—	Differenz zweier Werte
η	—	Wirkungsgrad in %
μ	—	Strukturierter Singulärwert

Symbole	Einheit	Beschreibung
τ	s	Zeitkonstante
φ	°	Winkel Koordinate
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Kreisfrequenz
$\mathcal{H}_2, \mathcal{H}_\infty$	—	Hardy Räume (Mengen stabiler Übertragungsfunktionen für $\mathcal{H}_2, \mathcal{H}_\infty$ -Regelung)
$\mathbb{R}\mathcal{H}_\infty$	—	Unterraum von $\mathcal{H}_\infty$ der nur reelle rationale Übertragungsfunktionen enthält
Δ	—	Perturbation
$\mathbb{C}$	—	Menge der komplexen Zahlen
$\mathbb{R}$	—	Menge der reellen Zahlen

Operatoren Beschreibung

$\det(\mathbf{A})$	Determinante von $\mathbf{A}$
$\bar{\sigma}(\mathbf{A})$	größter Singulärwert von $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^{-1}$	Inverse von $\mathbf{A}$
$\mathcal{F}_L(P, C)$	LFT Verknüpfung von P und C (lower LFT)
$P \star C$	LFT Verknüpfung von P und C (Redheffer Star Product)
$\mathcal{F}_U(P, C)$	LFT Verknüpfung von P und C (upper LFT)
$\ \mathbf{A}\ _\alpha$	Norm α von $\mathbf{A}$
$\text{diag}(\mathbf{a})$	Umformung des Vektors $\mathbf{a}$ in die Diagonaleinträge einer Matrix

Index	Beschreibung
$\square_{\Delta}$	unsicher
$\square_{\Delta a}$	additiv unsicher
$\square_{\Delta m}$	multiplikativ unsicher
$\square_0$	Anfangswert
$\square_{Br}$	Brennstoff
$\square_D$	diskretisiert
$\square_{RMS}$	quadratisch gemittelt
$\square_{RP}$	robuste Regelgüte (robust performance)
$\square_a$	Aktorik
$\square_b$	Turbinenschaufel (blade)
$\square_{ca}$	Turbinengehäuse (casing)
$\square_d$	Turbinenscheibe (disk)
$\square_{d1}$	Störgröße 1
$\square_e$	Regelabweichung
$\square_l$	Gehäusesegment des Turbinengehäuses (liner)
$\square_{max}$	maximal
$\square_{nom}$	nominell
$\square_{oca}$	äußeres Turbinengehäuse (outer casing)
$\square_p$	Prozess
$\square_{ro}$	Rotor (alle rotierenden Komponenten der Turbine)
$\square_s$	Sensorik
$\square_{st1}, \square_{st2}$	HPT-Stufe 1, HPT-Stufe 2
$\square_{str}$	Strukturiteration
$\square_u$	Stellgröße
$\square_w$	Führungsgröße

Akronyme	Beschreibung
ACARE	A dvisory C ouncil for A eronautics R esearch in E urope
ARMAX	autoregressiv mit gleitendem Mittel und exogenen Variablen (A uto R egressive M oving A verage with e Xternal input)
ARX	autoregressiv mit exogenen Variablen (A uto R egressive with e Xternal input)
CO ₂	Kohlendioxid
EEC	Triebwerksregler (E lectronic E ngine C ontrol)
FADEC	Betriebssystem für Turboflugtriebwerke (F ull A uthority D igital E ngine C ontrol)
FE	Finite Element
HPT	Hochdruckturbine (H igh P ressure T urbine)
ISA	Internationale S tandard A tmosphäre
LFT	gebrochen lineare Transformation (L inear F raction T ransformation)
LTI	linear zeitinvariante Systeme (L inear T ime I nvariant)
MIMO	lineares Mehrgrößensystem (M ulti I nput M ulti O utput)
NO _x	Stickoxide
PID	P roportional, I ntegral, D ifferential Anteil einer Regelung
PT ₁ , PT ₂	Verzögerungsglied erster, zweiter Ordnung
RMS	quadratisch gemittelt (R oot M ean S quare)
SC03	Rolls-Royce internes FE-Programm zur thermo-mechanischen Berechnung
SISO	lineares Eingößensystem (S ingle I nput S ingle O utput)