

FORTSCHRITT-
BERICHTE

VDI

Dipl.-Ing. Jörg Schuler, Stuhr

**Flugregelung und aktive
Schwingungsdämpfung
für flexible
Großraumflugzeuge**

Modellbildung und Simulation

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik Nr. **688**

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
Kurzfassung	XV
Abstract	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Diskussion der Literatur	3
1.2 Zielsetzung der Arbeit und Lösungsweg	6
1.3 Gliederung der Arbeit	8
2 Flugmechanik	10
2.1 Modellierung der Flugzeugdynamik	10
2.1.1 Aufstellen der nichtlinearen Bewegungsgleichungen	13
2.1.2 Gleichungen der Längsbewegung	15
2.1.3 Starrkörper–Bewegungsformen der Längsbewegung	19
2.1.4 Gleichungen der Seitenbewegung	21
2.1.5 Starrkörper–Bewegungsformen der Seitenbewegung	23
2.2 Grundlagen der Flugregelung	25
3 Aeroelastik	28
3.1 Modellierung der Strukturdynamik	29
3.2 Modellierung der Aerodynamik	32
3.2.1 Grundlagen der Doublet–Lattice–Methode	34
3.2.2 Grundgleichungen zur Berechnung der stationären Luftkräfte	36
3.2.3 Grundgleichungen zur Berechnung der instationären Luftkräfte	37
3.3 Grundlagen der aktiven Schwingungsdämpfung	39
4 Integrale Modellbildung	41
4.1 Defizite des bisher verwendeten Modells für die Aeroelastik	42
4.2 Modellierung der Strukturdynamik	44
4.2.1 Entkoppeln der Starrkörper–Eigenformen	44
4.2.2 Einführen der Steuerformen	46
4.3 Modellierung der Aerodynamik	47
4.3.1 Berechnung der stationären Luftkräfte	47
4.3.2 Berechnung der instationären Luftkräfte	48

4.3.3 Berechnung der Böenluftkräfte	48
4.4 Herleitung der zusätzlichen Kräfte in Analogie zur Flugmechanik	50
4.4.1 Berechnung der Triebwerksschubkräfte infolge Triebwerksbewegungen	50
4.4.2 Berechnung der aerodynamischen Kräfte	54
4.5 Modellierung der Stellglieder	61
4.5.1 Aktuatorkräfte infolge Ruderansteuerungen	61
4.5.2 Triebwerksschubkräfte infolge Drehzahländerungen	63
4.6 Aufstellen der gesamten Bewegungsgleichung im Frequenzbereich	65
4.7 Transformation der Bewegungsgleichung in den Zeitbereich	66
4.7.1 Approximation der instationären Luftkräfte	66
4.7.2 Aufstellen der Zustandsgleichung	69
4.7.3 Aufstellen der Meßgleichung	71
4.7.4 Vollständige Zustandsraumdarstellung mit Dryden–Böenmodell	72
4.8 Systemreduktion des Modells im Zeitbereich	72
4.9 Transformation in das flugzeugfeste Koordinatensystem	74
5 Modellvalidierung	78
5.1 Eigenverhalten des Flugzeugs	79
5.1.1 Lösung der Bewegungsgleichung im Frequenzbereich	79
5.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung im Zeitbereich	82
5.1.3 Vergleich der Frequenzbereichs– und der Zeitbereichslösungen	82
5.2 Referenzmodell für die Aeroelastik	84
5.2.1 Längsbewegung	84
5.2.2 Seitenbewegung	84
5.3 Referenzmodell für die Flugmechanik	85
5.3.1 Längsbewegung	85
5.3.2 Seitenbewegung	87
5.4 Integrales Gesamtmodell	87
5.4.1 Längsbewegung	88
5.4.2 Seitenbewegung	92
5.4.3 Reduziertes System	95
5.5 Übertragungsverhalten des Flugzeugs	96
5.5.1 Übertragungsfunktion des Frequenzbereichsmodells	96
5.5.2 Übertragungsfunktion des Zeitbereichsmodells	97
5.5.3 Vergleich der Übertragungsfunktionen	97

6 Integraler Reglerentwurf für ein SAS/CAS	100
6.1 Definition der Entwurfsziele	100
6.2 Dynamik der offenen Regelstrecke	103
6.2.1 Analyse des ungeregelten Flugzeugs	103
6.2.2 Definition eines Störmodells	107
6.2.3 Einführen der Aktuatorübertragungsfunktionen	107
6.3 Sensorpositionierung, Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit	108
6.4 Auswahl eines geeigneten Reglerentwurfsverfahrens	111
6.5 Grundlagen des H_∞ – Verfahrens	112
6.5.1 Problemformulierung	113
6.5.2 Wichtungsfunktionen	115
6.5.3 Modellierung von Unsicherheiten	116
6.6 Optimierung der Reglerauslegung	117
6.7 Anwendung des H_∞ – Verfahrens auf ein SAS/CAS	119
6.7.1 Entwurfsstruktur für die Reglersynthese	119
6.7.2 Vorarbeiten und Auswahl der Wichtungsfunktionen	120
6.7.3 Entwurfskriterien für die Optimierung	122
6.7.4 Wichtungsfunktionen und Regler	123
7 Analyse und Simulation	124
7.1 Sensitivität und Komplementäre Sensitivität	124
7.2 Amplituden– und Phasenrand	126
7.3 Übertragungsverhalten des Flugzeugs mit und ohne Regler	126
7.4 Dynamik des geschlossenen Regelkreises	128
7.5 RMS–Werte der Beschleunigung	130
7.6 Führungsverhalten	131
7.7 Normierte Nickratenantwort und C^* – Kriterium	132
7.8 Simulation von Flugversuchen	132
7.9 Ruderausschläge und Ruderstellgeschwindigkeiten	134
7.10 Flatterrechnungen mit Regler	135
7.11 Industrielle Gesichtspunkte und Implementierungsfragen	137
8 Zusammenfassung, Bewertung und Ausblicke	139
Anhang	143
Literatur	149