

Ein Beitrag zur Entwicklung  
semiaktiver Flugzeugfahrwerksysteme

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

von

M.Sc. Ximing Wang

aus Shaanxi, China

2000

**ULB Darmstadt**



**17534661**

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Flugzeugfahrwerksysteme . . . . .	1
1.2 Anforderung an Fahrwerkstoßdämpfer . . . . .	2
1.3 Stand der Technik . . . . .	5
1.3.1 Konventionelle Flugzeugfahrwerkstoßdämpfer . . . . .	5
1.3.2 Bisherige Untersuchungen . . . . .	7
1.4 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	10
<b>2 Modellbildung für Flugzeug- und Fahrwerksystemdynamik</b>	<b>13</b>
2.1 Überblick über die Modellbildung . . . . .	13
2.2 Dynamik des Vertikalteilsystems . . . . .	16
2.2.1 Vertikaldynamik der Flugzeugstruktur . . . . .	17
2.2.2 Vertikaldynamik der Räder . . . . .	20
2.2.3 Interaktion zwischen Flugzeugstruktur und Fahrwerke . . . . .	21
2.3 Dynamik des Horizontalteilsystems . . . . .	23
2.4 Radachsenkräfte und Reifen/Boden-Kräfte . . . . .	25
2.4.1 Darstellung der Radachsenkräfte . . . . .	25
2.4.2 Schwingung der Fahrwerkstruktur . . . . .	25
2.4.3 Reifen/Bodenkräfte . . . . .	27
2.5 Aerodynamische Kräfte und Momente . . . . .	31
2.5.1 Darstellung aerodynamischer Kräfte und Momente . . . . .	31
2.5.2 Bestimmung aerodynamischer Beiwerte . . . . .	33
2.6 Modellierung der Flugzeugfahrwerkstoßdämpfer . . . . .	36
2.6.1 Allgemeine Beschreibung . . . . .	36
2.6.2 Hauptfahrwerkstoßdämpfer . . . . .	39

2.6.3	Bugfahrwerkstoßdämpfer . . . . .	43
2.7	Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	45
2.7.1	Anfangsbedingungen . . . . .	45
2.7.2	Randbedingungen . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Strategie zur Verminderung der Strukturlast beim Landestoß</b>	<b>48</b>
3.1	Zwei-Massen-Fahrwerkmodell . . . . .	50
3.2	Stoßenergie des Flugzeugs . . . . .	51
3.3	Minimierung der Strukturlast mit der Energiebedingung . . . . .	54
3.3.1	Idealer Verlauf der Strukturlast . . . . .	54
3.3.2	Optimierungsstrategien der Strukturlast . . . . .	56
3.3.3	Optimaler Strukturlastverlauf bei weicher Landung . . . . .	61
3.3.4	Dämpfungskraft nach dem ersten Stoß . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Optimierungsstrategien für die Bodenbewegung</b>	<b>65</b>
4.1	Zielsetzung und allgemeine Darstellung . . . . .	65
4.2	Optimierung nach Strukturbelastung und Passagierkomfort . . . . .	67
4.2.1	Ideale Strukturlast beim Rollen am Boden . . . . .	67
4.2.2	Optimierung des Passagierkomforts . . . . .	69
4.3	Kompromiß zwischen Passagierkomfort und Radlastschwankung . . . . .	70
4.3.1	Inhärente Eigenschaften des Fahrwerksystems . . . . .	70
4.3.2	Adaptierungsstrategie gegen Radlastschwankungen . . . . .	73
4.4	Optimierungsstrategie für semiaktive Fahrwerksysteme . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Konzept semiaktiver Flugzeugfahrwerksysteme</b>	<b>78</b>
5.1	Realisierung semiaktiver Optimierungsstrategien . . . . .	78
5.2	Bestimmung der Drosselgeometrien im Stoßdämpfer . . . . .	80
5.3	Adaptive pneumatische Feder . . . . .	82
5.3.1	Flugzeugmassenabhängig adaptive Feder . . . . .	83
5.3.2	Stoßenergieabhängig adaptive Feder . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Regelung semiaktiver Flugzeugfahrwerksysteme</b>	<b>87</b>
6.1	Auswahl der Regelungsmethode . . . . .	87
6.2	Einführung in die Fuzzy-Regelung . . . . .	88
6.3	Auslegung des Fuzzy-Reglers für den Landestoß . . . . .	93
6.3.1	Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen . . . . .	93

6.3.2	Konfigurierung der Regelkreisstruktur . . . . .	93
6.3.3	Struktur des Fuzzy-Reglers . . . . .	95
6.3.4	Erstellung der Regelbasis . . . . .	98
6.3.5	Skalierungsfaktoren der Ein- und Ausgangsgrößen . . . . .	99
6.3.6	Validierung des Fuzzy-Reglers durch Simulation . . . . .	100
6.4	Auslegung des Fuzzy-Reglers für die Bodenbewegung . . . . .	103
6.4.1	Auslegung des Fuzzy-Reglers . . . . .	103
6.4.2	Fuzzy-Korrektur . . . . .	107
6.4.3	Vergleich des Fuzzy-Reglers mit einem On-Off-Regler . . . . .	108
6.5	Erweiterung der Regelung . . . . .	111
6.5.1	Erweiterung der Regelung für die Bodenbewegung . . . . .	111
6.5.2	Erweiterung der Regelung beim Landestoß . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Flugzeugdynamische Bewertung semiaktiver Fahrwerksysteme</b>	<b>119</b>
7.1	Minderung der Strukturlast beim Landestoß . . . . .	119
7.2	Verbesserung des Passagierkomforts bei der Bodenbewegung . . . . .	124
7.3	Verbesserung der Flugzeugdynamik beim Bremsen . . . . .	131
7.4	Sensitivität semiaktiver Fahrwerksysteme . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>138</b>
<b>A</b>	<b>Definitionen der Vektoren, Matrizen und Variablen</b>	<b>142</b>
A.1	Orientierungswinkel der Fahrwerkfederbeine . . . . .	142
A.2	Vektoren und Matrizen der Flugzeugdynamik . . . . .	143
A.3	Variablen der aerodynamischen Beschreibung . . . . .	145
A.4	Äquivalente Drosselfläche der Stoßdämpfer . . . . .	145
<b>B</b>	<b>Daten des Beispielflugzeugs</b>	<b>146</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>