

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>19</b>
1.1 Anforderungen an das Regelungssystem eines unbemannten Luftfahrzeugs . . . . .	19
1.2 Problemdefinitionen und Zielstellungen . . . . .	20
1.2.1 Adaptive Regelung zur Robustheitserhöhung . . . . .	22
1.2.2 Grundlage der automatischen Flugbereichserweiterung . . . . .	23
1.2.3 Vereinfachung der Stabilitätsanalyse bei Feedback Linearisierung mit Pseudo-Control Hedging . . . . .	24
1.2.4 Folgeregelungssystem auf Basis der Eingangs-Ausgangs Linearisierung . . . . .	25
1.3 Technologiedemonstrator ARTIS . . . . .	26
1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit . . . . .	27
<b>2 Grundlagen zur nichtlinearen Regelungsstrategie</b>	<b>29</b>
2.1 Literaturüberblick, Forschungsumfeld und ausgewählte Meilensteine der Methode . . . . .	31
2.2 Stabilitätsanalyse nach der direkten Methode von Lyapunov . . . . .	33
2.3 Interne Dynamik, Minimalphasigkeit und Definition der Nullodynamik . . . . .	35
2.4 Relativer Grad und Lie-Ableitungen . . . . .	36
2.5 Referenzgrößenvorgabe auf Basis eines linearen Referenzmodells . . . . .	38
2.6 Pseudo-Control Hedging . . . . .	40
2.7 Neuronale Netze als universelle Approximatoren . . . . .	44
2.8 Stabilitätsnachweis und Beschränktheit der Fehlergrößen der adaptiven Erweiterung . . . . .	54
2.9 Führungsregelung . . . . .	57

2.10 Folgeregelungssysteme . . . . .	58
<b>3 Mathematisches Modell zur Abbildung der Dynamik eines Helikopters</b>	<b>63</b>
3.1 Bewegungsgleichungen eines Starrkörpers . . . . .	64
3.1.1 Impulssatz und translatorische Bewegung . . . . .	64
3.1.2 Translation im Bahnachsensystem . . . . .	68
3.1.3 Drallsatz und rotatorische Bewegung . . . . .	69
3.1.4 Stabilitätsderivative des Starrkörpers . . . . .	71
3.1.5 Grenzen und Erweiterungen der Starrkörperdynamik . . .	72
3.1.6 Rotationsbeschleunigungen als alternative Darstellung der Rotor-Zelle Interaktion . . . . .	74
3.2 Dynamik von Systemkomponenten . . . . .	75
3.2.1 Stelldynamik . . . . .	75
3.2.2 Sensoren, Sensordynamik und Messfehler . . . . .	78
3.3 Zustandsraummodell für den Schwebeflug . . . . .	81
3.4 Festlegung von Flugbereichsbegrenzungen . . . . .	84
<b>4 Reglerauslegung für einen unbemannten Hubschrauber</b>	<b>87</b>
4.1 Überblick über die Reglerstruktur . . . . .	87
4.2 Stabilitätseinfluss eingebetteter Dynamiken im Referenzmodell .	90
4.3 Kombination von Referenzmodell und Feedback Linearisierung zu einem Folgeregelungssystem . . . . .	95
4.4 Referenzsystem für Rotations- und Lagedynamik . . . . .	100
4.5 Referenzsystem der translatorischen Bewegung . . . . .	107
4.5.1 Modell zur Beschreibung der Translationsdynamik . . . .	107
4.5.2 Bestimmung der erforderlichen Lagewinkeländerung . . .	109
4.5.3 Inversion der Schubdynamik . . . . .	111
4.5.4 Translationsdynamik in erdfesten Polarkoordinaten . . . .	113
4.5.5 Translationsdynamik in körperfesten Koordinaten . . . .	118
4.5.6 Translationsdynamik in erdfesten kartesischen Koordinaten	123
4.6 Auslegung der linearen und nichtlinearen Rückführungen . . . .	126
4.6.1 Dynamik bei linearer Fehlerrückführung . . . . .	128
4.6.2 Einflüsse von Modellunsicherheiten auf die Fehlerdynamik	133
4.6.3 Fehlerbeobachter zur Bestimmung von Fehlergrößen . . .	135
4.6.4 Anbindung und Abstimmung des nichtlinearen Approxima- tors . . . . .	137

<b>5</b>	<b>Bewertung des Regelungssystems</b>	<b>141</b>
5.1	Nominalverhalten in der Simulation . . . . .	143
5.1.1	Sprungvorgaben für Geschwindigkeiten und Gierwinkel .	143
5.1.2	Verhalten bei dem Erreichen der Flugbereichs- und Stell- größenbegrenzungen . . . . .	149
5.1.3	Auswirkungen bei Berechnungen mit fester Schrittweite auf Digitalrechnern . . . . .	152
5.2	Parametervariation in der Simulation . . . . .	157
5.2.1	Anpassung an Trimmfehler . . . . .	157
5.2.2	Auswirkung von Fehlern in der Zustandsschätzung . . . .	161
5.2.3	Parametervariation in Rotationsdynamik . . . . .	163
5.3	Ausgewählte Flugversuchsergebnisse . . . . .	164
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>173</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>180</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>189</b>
A.1	Koordinatensysteme . . . . .	189
A.1.1	Geodätische und flugzeugfeste Koordinaten . . . . .	189
A.1.2	Bahngeschwindigkeitsvektor in geodätischen Koordinaten	190
A.1.3	Bahngeschwindigkeitsvektor in flugzeugfesten Koordinaten	190
A.1.4	Aerodynamisches Koordinatensystem . . . . .	191
A.2	Transformationsmatrizen . . . . .	192
A.3	Parametrisierte Zustandsraummodelle . . . . .	194
A.3.1	Zustandsraumdarstellung unter Verwendung der Rotor- winkel . . . . .	194
A.3.2	Parametrisiertes Zustandsraummodell mit Drehbeschleu- nigungen als Zustände . . . . .	195
A.4	Differentiation eines Vektors nach der Zeit . . . . .	196
A.5	Winkelfehler zwischen Quaternionen . . . . .	196
A.6	Alias-Effekt . . . . .	198
A.7	Verhältnis von Sinkrate und Vorwärtsfluggeschwindigkeit . . . .	199