

# 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 Meilesteine der Methode . . . . .	31
2.2 Stabilitätsanalyse nach der direkten Methode von Lyapunov . . . . .	33
2.3 Interne Dynamik, Minimalphasigkeit und Definition der Nulldynamik . . . . .	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 eingegebetteter 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 Approximators . . . . .	137

<b>5 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 Stellgrößenbegrenzungen	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 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>180</b>
<b>A 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 Rotorwinkel	194
A.3.2 Parametrisiertes Zustandsraummodell mit Drehbeschleunigungen 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