

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur und Definitionen	11
1 Einführung	17
1.1 Allgemeine Problemstellung	17
1.2 Aktueller Forschungsstand	19
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	27
1.4 Übersicht zur Arbeit	29
2 Übersicht und Beschreibung des automatischen Landeverfahrens	31
3 Flugmechanische Grundlagen	35
3.1 Gleitflug eines Flugzeuges in der Längsbewegung	35
3.1.1 Bewegungsgleichungen für die Translation in der Längsbewegung	35
3.1.2 Gleitwinkel	36
3.1.3 Die Geschwindigkeitspolare	37
3.1.4 Gleitzustände in Abhängigkeit der Flugzeugmasse	38
3.2 Die Bremsklappen als Stellelement	39
3.2.1 Einfluss der Bremsklappen auf Widerstand und Auftrieb	40
3.2.2 Einfluss der Bremsklappen auf das Nickmoment	42
3.2.3 Bremsklappeneinfluss auf die Dynamik des ungeregelten Flugzeuges	44
3.3 Kraft, Energie und Leistung	46
3.3.1 Betrachtung der Gesamtenergie aus Sicht des Flugzeuges	49
3.3.1.1 Simulationsstudie zur Energieänderung bei konstantem Wind	53
3.3.1.2 Simulationsstudie zur Energieänderung in Windscherungen	54
3.3.1.3 Schlussfolgerungen für die Verwendung in den Reglerfunktionen	57
3.4 Simulation von Windscherungen	57
4 Flug bis zum Gleitpfad	59
4.1 Polare bei kontinuierlich verstellten Wölbklappen	59
4.2 Geschwindigkeit des besten Gleitens ohne Wind	61
4.3 Geschwindigkeit des besten Gleitens mit Wind	61
4.4 Berechnung der Windgeschwindigkeit	66
4.4.1 Berechnung des Horizontalwindes in Flugrichtung	66
4.4.2 Berechnung des Horizontalwindes in Landerichtung	68
4.4.3 Berechnung des Vertikalwindes	69
4.5 Reglerfunktion zur Berechnung der Windgeschwindigkeiten und der Geschwindigkeit des besten Gleitens	69
5 Vorgabe des Gleitpfades	73
5.1 Flugleistungen bei Windstille	73
5.2 Gleitpfad mit konstantem Gleitpfadwinkel	75
5.3 Gleitpfad mit variablem Gleitpfadwinkel	78

5.3.1	Anangepasster Gleitpfadwinkel und ausregelbare Windgeschwindigkeiten	78
5.3.2	Gleitpfadvorgabe und Übergang zwischen den Gleitpfaden	81
5.4	Vergleich mit einer manuellen Segelfluglandung	82
5.5	Auswahl des Verfahrens zur Gleitpfadvorgabe	84
5.6	Algorithmen zur Vorgabe und Regelung des Gleitpfades	85
5.6.1	Vorgabe der Fluggeschwindigkeit	86
5.6.1.1	Nominale Anfluggeschwindigkeit	86
5.6.1.2	Windzuschlag in der Anfluggeschwindigkeit	86
5.6.2	Vorgabe des Flugwindneigungswinkels	87
5.6.3	Berechnung des Gleitpfadwinkels	88
5.6.4	Berechnung des Gleitpfades	89
5.6.5	Konstanter Gleitpfadwinkel in Bodennähe	90
5.6.6	Der Regler zur Regelung der Höhe und des Gleitpfades	92
5.6.7	Umschaltbedingung zum Einschwenken auf den Gleitpfad	94
6	Vorgabe des Abfangbogens	95
6.1	Ziele und Kriterien für das Abfangen	96
6.2	Höhenverlauf im Abfangbogen	97
6.2.1	Vertikalgeschwindigkeit bei ortsabhängigem Höhenverlauf	97
6.2.2	Vertikalgeschwindigkeit bei zeitabhängigem Höhenverlauf	98
6.2.3	Übergang vom Gleitpfad zum Abfangbogen	98
6.2.3.1	Konstanter Gleitpfadwinkel, zeitlich definierter Abfangbogen	100
6.2.3.2	Konstanter Gleitpfadwinkel, ortsfest definierter Abfangbogen	100
6.2.3.3	Variabler Gleitpfadwinkel, zeitlich definierter Abfangbogen	104
6.2.4	Vergleich der Algorithmen für den Abfangbogen	105
6.2.5	Das Regelgesetz zur Regelung der Höhe im Abfangbogen	106
6.2.6	Korrektur des Sensorwertes für die Höhe im Abfangbogen	107
6.3	Geschwindigkeitsverlauf während des Abfangens	111
6.3.1	Ungeregelte Geschwindigkeitsänderung im Abfangbogen	111
6.3.2	Vorgabe des Geschwindigkeitsverlaufs beim Abfangen	115
7	Regelung der Bahn in der Längsbewegung	117
7.1	Anforderungen an den Regler für die Längsbewegung	117
7.2	Struktur des Reglers für die Längsbewegung	118
7.3	Regler zur Entkopplung der Zustände der Längsbewegung	120
7.3.1	<i>Das Total Energy Control System</i>	120
7.3.2	Energieregelung bezüglich der Luftmasse	123
7.3.3	Der modifizierte Entkopplungsregler	124
7.3.3.1	Prioritätenschaltung im Regelungspfad zur Energieverteilung	125
7.3.3.2	Auftriebskompensation bei Fluggeschwindigkeitsänderungen	127
7.3.3.3	Kompensation der Auftriebsänderung infolge des Bremsklappenverstellens	129

7.3.3.4	<i>Anti-Windup</i> -Schaltung im Regelungspfad zur Energieverteilung	130
7.3.3.5	Modifikationen im Pfad zur Regelung der Gesamtenergierate	130
7.3.4	Auslegung des Entkopplungsreglers	131
7.3.5	Überprüfung der Entkopplung	137
7.4	Die äußenen Regelkaskaden zur Regelung der Höhe und der Geschwindigkeit	139
7.4.1	Regelung der Höhe	139
7.4.2	Regelung der Geschwindigkeit	141
7.5	Berechnung der Verstellkommandos an den Motor und die Bremsklappen	145
7.5.1	Anforderungen an die Funktion zur Aufteilung des Vortriebskommandos	145
7.5.2	Möglichkeiten zur Aufteilung des Vortriebskommandos	146
7.5.3	Struktur der Funktion zur Verteilung des Vortriebskommandos	146
7.5.4	Berechnung der Stellkommandos an den Motor	147
7.5.5	Berechnung des Stellkommandos an die Bremsklappen	148
7.5.6	Verteilung des Kommandos zur Änderung der Schubkraft	150
7.6	Die gesamte Struktur des Bahnreglers	151
7.7	Berechnung und Filterung von Signalen für die Regelung	153
7.7.1	Die Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit	153
7.7.2	Die Berechnung der Längsbeschleunigung und der Fluggeschwindigkeit	154
8	Simulations- und Flugversuchsergebnisse	159
8.1	Flugversuchsergebnisse	159
8.1.1	Landeanflug auf dem Gleitpfad und Abfangen	159
8.1.2	Schubloser Anflug bis zum Gleitpfad	163
8.1.3	Statistische Auswertung für das Abfangen und das Aufsetzen	169
8.1.4	Zusammenfassung der Flugversuchsergebnisse	173
8.2	Simulation einer Landung bei extremen Windverhältnissen	174
8.2.1	Extremwind bei Anflug auf Gleitpfad und im Abfangen	174
8.2.2	Extremwind während des gesamten Landeanfluges	179
8.2.3	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	183
9	Zusammenfassung und Ausblick	185
9.1	Zusammenfassung	185
9.2	Ausblick	188
A	Versuchsfugzeug und Flugregelungssystem	191
A.1	Beschreibung des Versuchsfugzeuges	191
A.2	Beschreibung des Flugregelungssystems	193
A.3	Simulationsumgebung	196
B	Zeitkonstanten in Kaskadenregelungen	198
C	Filterung und Berechnung von Signalen	199
C.1	Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit	199
C.1.1	Beobachter zur Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit	199

C.1.2 Erweiterung des Beobachters um einen Integralanteil	201
C.1.3 Erweiterung um eine Filterung für die gemessene Höhe	202
C.1.4 Auslegung der Parameter des Beobachters zur Schätzung der Vertikalgeschwindigkeit und der Höhe	203
C.2 Filter zur Berechnung der Fluggeschwindigkeit und der Längsbeschleunigung	206
D Liste der Flugversuche	208
E Vergleich Flugversuch und Simulation	209
F Ausgewählte Simulationsstudien	213
F.1 Landung bei Windscherungen mit wechselndem Vorzeichen des Windschergradienten	213
F.2 Automatische Landung bei konstantem Wind	217
F.3 Automatische Landung bei Extremwind und ohne Schub während der gesamten Landung, Darstellung als Funktion der Zeit	220
F.4 Verwendung der Bremsklappen bei einer Landung mit Vorgabe eines konstanten Gleitpfadwinkels	222
G Höhenverlauf bei Absenkung der Zielhöhe im Abfangbogen	226
H Ausgewählte Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation	228
I Transformationsmatrizen, Koordinatensysteme	230
J Übersetzung der Begriffe aus den Blockschaltbildern	233
Literaturverzeichnis	234