

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	1
1.1 Pilot oder Autopilot? .....	2
1.1.1 Der Autopilot als Flugschüler .....	2
1.1.2 Der Pilot als Flugmanager .....	4
1.2 Physikalische Grundlagen .....	7
1.2.1 Schreibweisen .....	9
1.2.2 Auftrieb und Widerstand .....	9
1.2.3 Momentengleichgewicht .....	11
1.2.4 Flugzeugsteuerung .....	13
1.2.5 Antrieb .....	16
1.2.6 Wind und Turbulenz .....	18
1.3 Mathematisches Prozeßmodell .....	22
1.3.1 Gleichungen der symmetrischen Bewegung (Längsbewegung) .....	23
1.3.2 Näherungsansatz .....	25
1.3.3 Gleichungsanalyse .....	27
1.3.4 Flugbahngleichungen .....	29
1.4 Randbedingungen zur Flugreglerauslegung .....	30
1.4.1 Besonderheiten der Regelstrecke .....	30
1.4.2 Regelungsaufgaben .....	34
1.4.3 Auslegungskriterien .....	37
1.5 Aufbau von Flugregelungssystemen .....	37
1.5.1 Dämpfer (stability augmentation system) .....	38
1.5.2 Lageregler .....	40
1.5.3 Höhenregler .....	42
1.5.4 Automatische Führung auf gekrümmter Flugbahn .....	43
1.5.5 Vorgaberegelung (Fly-by-Wire) .....	44
1.5.6 Gesamt-Regelungssystem .....	45
Literaturverzeichnis zu Kapitel 1 .....	51

## PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

<b>2 Definition der Bewegungsgrößen</b> .....	53
2.1 Bezeichnungen .....	54
2.2 Flugmechanische Größen .....	56
2.2.1 Festlegung der Flugzeuglage gegenüber der Erde .....	56
2.2.2 Festlegung des Bahngeschwindigkeitsvektors .....	58
2.2.3 Festlegung der aerodynamischen Größen .....	60
2.2.4 Winkel zur Beschreibung des Windeinflusses .....	64
2.2.5 Vereinfachte Darstellung der kinematischen Zusammenhänge .....	65
2.2.6 Die Geschwindigkeitsgleichung .....	65
2.2.7 Die Drehgeschwindigkeitsgleichung .....	67
2.2.8 Stellausschläge .....	68
2.3 Differentiation von Vektoren .....	71
2.3.1 Differentiation eines Vektors nach der Zeit .....	71
2.3.2 Räumliche Differentiation in einem Feld .....	72
2.3.3 Zeitliche Ableitung bei Bewegung durch ein Feld .....	74
2.3.4 Beziehungen zwischen Eulerwinkeln und Drehgeschwindigkeiten .....	74
2.4 Größen zur Bestimmung der Flugzeugposition .....	75
2.4.1 Position relativ zu einem erdfesten Punkt .....	77
2.4.2 Position relativ zu einer Sollflugbahn .....	80
2.4.3 Vereinfachte Darstellung einer Anflugbahn .....	84
2.5 Flugzeuggeometrie .....	86
2.6 Einfluß der Sensorposition .....	89
2.6.1 Fehlausrichtung von Sensoren .....	90
2.6.2 Einfluß der Flugzeugrotation .....	91
2.6.3 Beschleunigungsvektor an einem beliebigen Punkt am Flugzeug .....	92
2.7 Vorzeichendefinition .....	93
Literaturverzeichnis zu Kapitel 2 .....	95
<b>3 Äußere Kräfte und Momente</b> .....	97
3.1 Die Erzeugung aerodynamischer Kräfte .....	97
3.1.1 Auftriebserzeugung .....	100
3.1.2 Der aerodynamische Widerstand .....	105
3.2 Bedingungen für stationären Flug .....	108
3.2.1 Federkonstante der Längsbewegung („statische Stabilität“) .....	108
3.2.2 Leitwerksauftrieb und -moment .....	111
3.2.3 Auftrieb und Moment des Gesamtflugzeugs .....	114
3.2.4 Federkonstante („statische Stabilität“) der Seitenbewegung .....	116
3.2.5 Flugzeugsteuerung .....	117

3.3	Aerodynamische Wirkungen bei symmetrischem Flug . . . . .	121
3.3.1	Einfluß der Nickgeschwindigkeit (Nickdämpfung) . . . . .	124
3.3.2	Einfluß der Anstellwinkeländerung . . . . .	125
3.3.3	Einfluß der Fahrtänderung . . . . .	127
3.3.4	Einfluß des Höhenruderausschlags . . . . .	127
3.4	Aerodynamische Wirkungen bei unsymmetrischem Flug . . . . .	129
3.4.1	Einfluß des Schiebewinkels . . . . .	129
3.4.2	Einfluß einer Schiebewinkeländerung . . . . .	133
3.4.3	Einfluß der Rollgeschwindigkeit . . . . .	133
3.4.4	Einfluß der Giergeschwindigkeit . . . . .	135
3.4.5	Einfluß eines Querruderausschlags . . . . .	136
3.4.6	Einfluß des Seitenruderausschlags . . . . .	137
3.5	Ergänzung und Zusammenfassung des aerodynamischen Modells . . . . .	138
3.5.1	Aerodynamische Kopplung von Längs- und Seitenbewegung . . . . .	138
3.5.2	Bodeneffekt . . . . .	139
3.5.3	Einfluß elastischer Verformung . . . . .	139
3.5.4	Triebwerkseinfluß . . . . .	142
3.5.5	Zusammenstellung der Beiwerte und Derivative . . . . .	142
3.6	Der Prozeß Luftstrahltriebwerk . . . . .	143
3.6.1	Schuberzeugung . . . . .	148
3.6.2	Modellierung des dynamischen Triebwerksverhaltens . . . . .	155
3.6.3	Triebwerksregelung . . . . .	156
3.6.4	Das Triebwerk als Stellglied für die Flugzeugbewegung . . . . .	158
3.6.5	Einfaches Triebwerksmodell für flugdynamische Untersuchungen . . . . .	160
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 3 . . . . .	165
<b>4</b>	<b>Wind und Turbulenz . . . . .</b>	<b>167</b>
4.1	Windmodelle . . . . .	169
4.1.1	Die Entstehung von Wind . . . . .	169
4.1.2	Die Modellierung von Wind . . . . .	174
4.1.3	Die Entstehung von Turbulenz . . . . .	176
4.1.4	Die Modellierung von Turbulenz . . . . .	178
4.2	Kopplung von Wind- und Flugzeugbewegung . . . . .	180
4.2.1	Wirkung des Windfeldes auf das Flugzeug als Punktmasse . . . . .	182
4.2.2	Wirkung der Windgradienten auf das Flugzeug endlicher Ausdehnung . . . . .	188
4.2.3	Orts- und Zeitabhängigkeit der auf das Flugzeug wirkenden Turbulenz . . . . .	191

4.2.4	Das Dryden-Spektrum . . . . .	195
4.2.5	Simulation von Turbulenz . . . . .	198
4.2.6	Instationäre Wirkung der Turbulenz . . . . .	200
Literaturverzeichnis zu Kapitel 4 . . . . .		202
<b>MATHEMATISCHES PROZESSMODELL</b>		
<b>5 Nichtlineare Bewegungsgleichungen</b> . . . . .		205
5.1	Zusammenstellung der Kräfte- und Momentengleichungen . . . . .	206
5.1.1	Wahl des Koordinatensystems . . . . .	207
5.1.2	Gleichungsansatz . . . . .	208
5.2	Die Zustandsgleichungen der Flugzeugbewegung . . . . .	210
5.2.1	Differentialgleichung für die Translationsgeschwindigkeit . . . . .	210
5.2.2	Beschleunigung und Lastvielfaches . . . . .	213
5.2.3	Differentialgleichung für die Position (Flugbahn) . . . . .	214
5.2.4	Differentialgleichung für die Drehgeschwindigkeit . . . . .	215
5.2.5	Differentialgleichung für die Lagewinkel . . . . .	216
5.3	Diskussion des Gleichungssystems . . . . .	216
5.4	Stationäre Flugzustände . . . . .	221
5.4.1	Vorüberlegung zur Berechnung eines ausgetrimmten Flugzustandes . . . . .	221
5.4.2	Der symmetrische Geradeausflug . . . . .	222
5.4.3	Der horizontale, koordinierte Kurvenflug . . . . .	224
Literaturverzeichnis zu Kapitel 5 . . . . .		227
<b>6 Verhalten des Flugzeugs als Punktmasse</b> . . . . .		229
6.1	Reduzierte Differentialgleichungen . . . . .	229
6.1.1	Bahnbewegung in drei Freiheitsgraden . . . . .	229
6.1.2	Bahnbewegung in zwei Freiheitsgraden . . . . .	231
6.2	Energiebetrachtungen und Korhammer-Diagramm . . . . .	234
6.3	Reaktion des Flugzeugs auf Stellkommandos . . . . .	239
6.3.1	Verhalten unterhalb der Fahrt minimalen Widerstandes . . . . .	240
6.3.2	Reaktion des Flugzeugs auf Schubänderungen . . . . .	242
6.4	Reaktion des Flugzeugs im Windfeld . . . . .	246
6.4.1	Rückenwind . . . . .	246
6.4.2	Seitenwind . . . . .	247
6.4.3	Abwind . . . . .	248
6.4.4	Verhalten bei variablem Wind . . . . .	250
Literaturverzeichnis zu Kapitel 6 . . . . .		252

<b>7 Linearisierte Zustandsgleichungen</b> .....	253
7.1 Einschränkende Annahmen .....	254
7.1.1 Vereinfachung von Euler-Termen und Transformationsmatrizen .....	255
7.1.2 Weitere Vereinfachungen .....	257
7.1.3 Stabilitätsachsensystem .....	257
7.1.4 Zusammenstellung der getroffenen Annahmen .....	258
7.1.5 Differentialgleichungen für Geschwindigkeit und Position .....	259
7.1.6 Differentialgleichungen für Drehgeschwindigkeit und Lagewinkel .....	259
7.1.7 Wind-Differentialgleichung .....	260
7.2 Aufspaltung und Umformung des Gleichungssystems .....	261
7.2.1 Wechsel einiger Zustandsgrößen .....	261
7.2.2 Zustandsgleichungen für Längs- und Seitenbewegung .....	263
7.3 Linearisierung des Gleichungssystems .....	265
7.3.1 Methode der linearen Variationsgleichungen .....	265
7.3.2 Linearisierung der Gleichungen der Längsbewegung .....	268
7.3.3 Zustandsgleichungen der Längsbewegung .....	275
7.3.4 Linearisierung der Gleichungen der Seitenbewegung .....	277
7.3.5 Zustandsgleichungen der Seitenbewegung .....	278
7.3.6 Numerische Umformung der Gleichungen .....	280
7.3.7 Numerische Linearisierung der Gleichungen .....	280
7.4 Darstellung der Gleichungen durch Signalflußdiagramme .....	282
Literaturverzeichnis zu Kapitel 7 .....	286
<b>8 Analyse des dynamischen Flugzeugverhaltens</b> .....	289
8.1 Lösung der Zustandsgleichungen .....	289
8.1.1 Lösung der Zustandsgleichungen im Zeitbereich .....	290
8.1.2 Numerische Simulation .....	293
8.1.3 Lösung der Zustandsgleichung im Laplacebereich .....	296
8.1.4 Stabilität .....	300
8.1.5 Lösung linearer Gleichungssysteme .....	304
8.2 Das Eigenverhalten des Flugzeugs .....	307
8.2.1 Typische Verteilung der Wurzeln der charakteristischen Gleichung .....	307
8.2.2 Sprungantworten von Längs- und Seitenbewegung .....	308
8.2.3 Typische Bewegungsformen von Längs- und Seitenbewegung .....	309
8.3 Das Übertragungsverhalten des Flugzeugs .....	313
8.3.1 Berechnung von Übertragungsfunktionen .....	313
8.3.2 Grenzwertbetrachtungen .....	316

8.4	Näherungsansätze . . . . .	319
8.4.1	Näherung für die Anstellwinkelschwingung . . . . .	320
8.4.2	Näherung für die Phygoidbewegung . . . . .	323
8.4.3	Näherungen für die Seitenbewegung . . . . .	326
8.4.4	Weitere Charakterisierung der Seitenbewegung . . . . .	331
8.4.5	Zusammenfassung . . . . .	336
8.5	Regelbarkeitsbetrachtungen . . . . .	338
8.5.1	Stellverhalten in der Längsbewegung . . . . .	339
8.5.2	Allpaßverhalten in der Längsbewegung . . . . .	343
8.5.3	Stellverhalten in der Seitenbewegung . . . . .	346
8.5.4	Reaktion des Flugzeugs auf Störsignale . . . . .	347
8.5.5	Zusammenfassung . . . . .	355
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 8 . . . . .	357

## RANDBEDINGUNGEN ZUR REGLERAUSLEGUNG

9	Meßverfahren und Sensoren . . . . .	359
9.1	Meßbarkeit von Zustands- und Ausgangsgrößen . . . . .	362
9.1.1	Aufstellung meßbarer Größen . . . . .	362
9.1.2	Meßfehler . . . . .	363
9.1.3	Meßdynamik . . . . .	365
9.1.4	Sicherheitsaspekte . . . . .	366
9.2	Strömungsmechanische Größen . . . . .	368
9.2.1	Barometrische Höhe . . . . .	369
9.2.2	Vertikalgeschwindigkeit . . . . .	370
9.2.3	Fahrt und Machzahl . . . . .	371
9.2.4	Anstellwinkel und Schiebewinkel . . . . .	372
9.2.5	Luftwerterechner (Air Data Computer, ADC) . . . . .	373
9.3	Inertialgrößen . . . . .	373
9.3.1	Beschleunigung . . . . .	375
9.3.2	Wirkungsweise von Kreiseln . . . . .	376
9.3.3	Winkelgeschwindigkeitskreisel . . . . .	379
9.3.4	Lotkreisel (Kreiselhorizont) . . . . .	381
9.4	Azimutmessung . . . . .	382
9.4.1	Magnetkompaß, Fluxvalve . . . . .	383
9.4.2	Kurskreisel, magnetfeldgestützte Kurskreiselanlage . . . . .	383
9.5	Positionsbestimmung . . . . .	385
9.5.1	Ortungsprinzipien . . . . .	387
9.5.2	Radio- und Radar-Höhenmessung . . . . .	390
9.5.3	Funk-Entfernungsmessung (DME) . . . . .	390
9.5.4	Automatische Funkpeilung (Radiokompaß) . . . . .	391
9.5.5	UKW-Drehfunkfeuer (VOR und TACAN) . . . . .	392
9.5.6	Langstrecken-Ortungsverfahren . . . . .	393
9.5.7	Satellitenortung . . . . .	394

9.6	Navigationssysteme . . . . .	396
9.6.1	Trägheitsnavigation (INS) . . . . .	396
9.6.2	Satellitennavigation . . . . .	397
9.6.3	Integrierte Navigation . . . . .	397
9.6.4	Landesysteme . . . . .	398
9.6.5	Neuere Entwicklungen . . . . .	400
9.7	Schätzfilter zur Meßwertkonsolidierung . . . . .	401
9.7.1	Kalman-Filter . . . . .	401
9.7.2	Komplementäre Filterung . . . . .	403
9.7.3	Pseudointegration, Pseudodifferentiation . . . . .	406
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 9 . . . . .	406
<b>10</b>	<b>Flugzeugsteuerungen</b> . . . . .	409
10.1	Stellglieder . . . . .	410
10.1.1	Zusammenstellung konventioneller Stellglieder . . . . .	411
10.1.2	Stellglieder für besondere Aufgaben . . . . .	413
10.2	Stellantriebe . . . . .	417
10.2.1	Elektrische Stellantriebe . . . . .	419
10.2.2	Hydraulische Stellantriebe . . . . .	422
10.2.3	Elektrohydraulisches Ventil . . . . .	424
10.3	Steuerungssysteme . . . . .	426
10.3.1	Grundprinzipien . . . . .	426
10.3.2	Manuelle Steuerung mit Dämpferunterstützung . . . . .	429
10.3.3	Steuerung bei Autopilotenbetrieb . . . . .	430
10.3.4	Elektrische Steuerungen (Fly-by-Wire) . . . . .	432
10.3.5	Sicherheitsaspekte . . . . .	433
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 10 . . . . .	439
<b>11</b>	<b>Regelungsaufgaben und Auslegungsziele</b> . . . . .	441
11.1	Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	442
11.1.1	Flugeigenschaften . . . . .	442
11.1.2	Beurteilungskriterien . . . . .	446
11.1.3	Aufgabenspektrum . . . . .	448
11.1.4	Pilot-in-the-Loop Oscillation . . . . .	452
11.1.5	Richtlinien und Standards . . . . .	453
11.2	Flugeigenschaftskriterien . . . . .	458
11.2.1	Längsbewegung . . . . .	461
11.2.2	Seitenbewegung . . . . .	470
11.2.3	Forderungen zur Regelgenauigkeit . . . . .	474
11.3	Flugbahnkriterien . . . . .	475
11.3.1	Regelgrößen und Reglerarchitektur . . . . .	475
11.3.2	Standard-Flugrouten . . . . .	479
11.3.3	Führung im Flughafennahbereich . . . . .	481
11.3.4	Endanflug-Verfahren . . . . .	484
	Neue Entwicklungen . . . . .	487

11.4	Mathematische Formulierung von Güteforderungen . . . . .	491
11.4.1	Flugdynamik . . . . .	492
11.4.2	Störunterdrückung . . . . .	495
11.4.3	Bahnführung . . . . .	496
11.4.4	Zusammenfassung . . . . .	499
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 11 . . . . .	500

## REGELUNGSVERFAHREN

<b>12</b>	<b>Regler zur Modifikation der Prozeßdynamik . . . . .</b>	<b>503</b>
12.1	Zustandsregler-Strukturen . . . . .	505
12.1.1	Zustandsvektorrückführung . . . . .	506
12.1.2	Ausgangsrückführung . . . . .	511
12.1.3	Der dynamische Regelfaktor . . . . .	516
12.1.4	Einfluß von Allpaßverhalten . . . . .	520
12.1.5	Zustandsrückführung mit Beobachter . . . . .	523
12.2	Mehrgrößen-Regelungsstrukturen . . . . .	525
12.2.1	Grundgleichungen des Mehrgrößensystems . . . . .	526
12.2.2	Übertragungsfunktionen des Mehrgrößensystems . . . . .	529
12.2.3	Besonderheiten des Reglerentwurfs . . . . .	532
12.3	Auslegung von Zustandsreglern . . . . .	537
12.3.1	Riccati-Entwurf . . . . .	538
12.3.2	Polvorgabe . . . . .	540
12.3.3	Polgebietsvorgabe . . . . .	541
12.3.4	Eigenstrukturvorgabe . . . . .	543
12.3.5	Dynamische Inversion . . . . .	551
12.3.6	Robuste Regelung . . . . .	553
12.4	Regleranpassung . . . . .	561
12.4.1	Strukturvariable Regler . . . . .	562
12.4.2	Adaptive Regelung . . . . .	563
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 12 . . . . .	567
<b>13</b>	<b>Reglerstrukturen zur Prozeßführung . . . . .</b>	<b>571</b>
13.1	Regelungsstruktur für stationäre Führungsgenauigkeit . . . . .	571
13.1.1	Stationärverhalten des Regelkreises mit Zustandsvektorrückführung . . . . .	572
13.1.2	Einführung einer Vorsteuermatrix . . . . .	574
13.1.3	Erweiterung der ZVR durch einen I-Regler . . . . .	577
13.1.4	Störgrößenaufschaltung . . . . .	581
13.1.5	Kaskadenregelung . . . . .	582
13.2	Auslegung von Führungsreglern . . . . .	585
13.2.1	Globaler Riccati-Entwurf . . . . .	585
13.2.2	Numerische Optimierung . . . . .	587

13.2.3	Gütekriterien . . . . .	591
13.2.4	Mehrzielige Entwurfsoptimierung . . . . .	598
13.3	Lineare Modellfolgeregelung . . . . .	600
13.3.1	Modellfolge-Bedingungen . . . . .	602
13.3.2	Modellfolge als Verallgemeinerung der Zustandsvektorrückführung . . . . .	607
13.3.3	Auswirkung von Parameterschwankungen . . . . .	608
13.3.4	Modellfolge für einen Teilprozeß bei singulärer Stellmatrix . . . . .	610
13.3.5	Pragmatische Entwurfsstrategie . . . . .	612
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 13 . . . . .	617

## FLUGREGLERSTRUKTUREN

<b>14</b>	<b>Verbesserung der Flugeigenschaften</b> . . . . .	619
14.1	Auswahl wirksamer Rückführungen . . . . .	620
14.1.1	Modifizierung der Anstellwinkelschwingung . . . . .	621
14.1.2	Modifizierung der Phygoidschwingung . . . . .	623
14.1.3	Modifizierung der Taumelschwingung . . . . .	625
14.1.4	Modifizierung der Rollbewegung . . . . .	627
14.2	Basisregler für die Längsbewegung . . . . .	629
14.2.1	Nickdämpfer . . . . .	630
14.2.2	Anpassung eines Nickdämpfers an den Flugzustand . . . . .	632
14.2.3	Maßnahmen zur Störunterdrückung . . . . .	635
14.2.4	Nick-Lageregelung . . . . .	638
14.2.5	Längs-Trimmung . . . . .	639
14.3	Basisregler für die Seitenbewegung . . . . .	641
14.3.1	Gierdämpfer . . . . .	642
14.3.2	Kurvenkoordinierung . . . . .	644
14.3.3	Kurvenkompensation . . . . .	645
14.3.4	Maßnahmen zur Störunterdrückung . . . . .	645
14.3.5	Roll-Lageregelung . . . . .	647
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 14 . . . . .	650
<b>15</b>	<b>Erweiterung der Einsatzgrenzen</b> . . . . .	651
15.1	Charakterisierung neuer Regelungsaufgaben . . . . .	651
15.2	Abminderung von Böenlasten . . . . .	653
15.2.1	Erweiterung der Dämpferfunktion . . . . .	654
15.2.2	Modellerweiterung . . . . .	655
15.2.3	Störgrößenaufschaltung . . . . .	658
15.2.4	Schwingungsdämpfung . . . . .	660
15.3	Höhere Manövrierbarkeit durch direkte Kraftsteuerung . . . . .	662
15.3.1	Nachteile der Momentensteuerung . . . . .	662

15.3.2	Steuerstrategien mit direkter Kraftsteuerung . . . . .	665
15.3.3	Regelung mit Hilfe direkter Kraftsteuerung . . . . .	670
15.4	Reduzierte Stabilität . . . . .	672
15.4.1	Flugmechanische Zusammenhänge . . . . .	672
15.4.2	Lösungen für Transportflugzeuge . . . . .	675
15.4.3	Lösungen für Kampfflugzeuge . . . . .	676
15.5	Betriebsgrenzen-Regelung . . . . .	677
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 15 . . . . .	679
<b>16</b>	<b>Stabilisierung der Flugbahn . . . . .</b>	<b>681</b>
16.1	Regelung von Höhe und Vertikalgeschwindigkeit . . . . .	682
16.1.1	Struktur der Höhenregelung . . . . .	683
16.1.2	Auslegung eines Höhenreglers mit Zustandsrückführung . . . . .	686
16.1.3	Höhenregler-Betriebsarten . . . . .	687
16.1.4	Regelung der Vertikalgeschwindigkeit . . . . .	688
16.2	Regelung des aerodynamischen Zustandes . . . . .	689
16.2.1	Fahrtregelung mit dem Höhenruder als Stellglied . . . . .	689
16.2.2	Fahrtregelung mit Hilfe des Schubes (Vortriebsregler) . . . . .	690
16.2.3	Kopplungen zwischen Fahrt- und Höhenregelung . . . . .	694
16.2.4	Der Anstellwinkel als Regelgröße . . . . .	695
16.3	Regelung des Flugwegs über Grund . . . . .	698
16.3.1	Kursregelung unter Windeinfluß . . . . .	698
16.3.2	Steuerkursregler . . . . .	702
16.3.3	Anfliegen von VOR-Stationen . . . . .	703
16.3.4	Standlinienregelung . . . . .	705
16.4	Regelungssystem für die automatische Landung . . . . .	710
16.4.1	Das ILS-Landeverfahren . . . . .	710
16.4.2	Regelung der Endphase des Anfluges . . . . .	714
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 16 . . . . .	716
<b>17</b>	<b>Führung auf wechselnden Flugbahnen . . . . .</b>	<b>717</b>
17.1	Integrierte Bahnregler für die Längsbewegung . . . . .	718
17.1.1	Aufbau eines Bahnregelungssystems . . . . .	720
17.1.2	Schubvorsteuerung . . . . .	724
17.1.3	Steillanderegler . . . . .	726
17.1.4	Regelung des Energiezustandes . . . . .	729
17.1.5	Robuste Regelung für die automatische Landung . . . . .	736
17.1.6	Energieregler in variablen Windfeldern . . . . .	738
17.2	Intelligente Führungsregler . . . . .	742
17.2.1	Generierung von Führungsprozessen . . . . .	744
17.2.2	Nichtlineare Vorsteuerung . . . . .	747
17.2.3	Sollzustandsgenerierung . . . . .	749
17.2.4	Bahnführung mit nichtlinearer Vorsteuerung . . . . .	750
17.2.5	Konfliktfreie Grenzregelung . . . . .	753

17.3	Generierung von Solltrajektorien . . . . .	755
17.3.1	Modelltrajektorien für einfache Bahnmanöver . . . . .	755
17.3.2	Horizontale Bahnmanöver . . . . .	759
17.3.3	Verbindung von Wegpunkten . . . . .	761
17.3.4	4D-Bahnregelung . . . . .	764
17.4	Flugmanagement . . . . .	767
17.4.1	Flugmanagement-Funktionen . . . . .	768
17.4.2	Flugmanagementaufgaben aus der Sicht der Flugregelung . . . . .	770
17.4.3	Entwicklungsprobleme . . . . .	773
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 17 . . . . .	774
<b>18</b>	<b>Manuelle Führung mit Reglerunterstützung . . . . .</b>	<b>777</b>
18.1	Anzeigen als Schnittstelle zwischen Pilot und Regler . . . . .	780
18.1.1	Standardisierte Zentralanzeigen . . . . .	781
18.1.2	Anzeigen für Bahn- und Energiewinkel . . . . .	785
18.1.3	Flight-Director Prinzip . . . . .	788
18.2	Vorgaberegelung . . . . .	790
18.2.1	Grundprinzipien . . . . .	790
18.2.2	Entwurfsbeispiel . . . . .	794
18.3	In-flight-Simulation . . . . .	803
18.3.1	Aufgabenstellung . . . . .	804
18.3.2	Ansätze und Randbedingungen . . . . .	805
18.3.3	Projekte und Ergebnisse . . . . .	809
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 18 . . . . .	814

## AKTUELLE BEISPIELE FÜR DAS GESAMTSYSTEM

<b>19</b>	<b>Regelungssysteme für Kampfflugzeuge . . . . .</b>	<b>817</b>
19.1	Auslegung von Basisreglern . . . . .	817
19.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	817
19.1.2	Besonderheiten von Basisreglern . . . . .	819
19.1.3	Basisregler für die Längsbewegung . . . . .	820
19.1.4	Basisregler für die Seitenbewegung . . . . .	822
19.1.5	Anforderungen an die Längsbewegung bei instabiler Basisauslegung . . . . .	825
19.1.6	Anforderungen an die Seitenbewegung . . . . .	829
19.2	X31-A Regelungssystem . . . . .	830
19.2.1	Regelungskonzept . . . . .	831
19.2.2	Nichtlineare Sollzustandsgenerierung . . . . .	832
19.2.3	Reglerstruktur . . . . .	835
19.3	Eurofighter Typhoon Regelungssystem . . . . .	837
19.3.1	Regelungskonzept . . . . .	839

19.3.2	Realisierung der Proportionalrückführungen mittels differentiellem PI-Algorithmus .....	842
19.3.3	Längsbewegung .....	843
19.3.4	Seitenbewegung .....	844
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 19 .....	847
<b>20</b>	<b>A320-Regelungssystem .....</b>	<b>849</b>
20.1	Steuerungskonzept und Rechnerarchitektur .....	850
20.1.1	Überblick .....	850
20.1.2	Steuerungskonzept .....	853
20.1.3	Sicherheitsfunktionen .....	855
20.1.4	Automatischer Betriebsartenwechsel .....	856
20.2	Fly-by-Wire-Regelgesetze .....	857
20.2.1	Nickachse .....	857
20.2.2	Rollachse .....	859
20.2.3	Gierachse .....	860
20.2.4	Betriebsgrenzenregelung in der Längsbewegung .....	861
20.2.5	Betriebsgrenzenregelung in der Seitenbewegung .....	865
20.2.6	Lastabminderung am Flügel .....	865
20.3	Autopilotenfunktionen .....	865
20.3.1	Autopilotenfunktionen in der Längsbewegung .....	866
20.3.2	Vortriebsregelung .....	869
20.3.3	Autopilotenfunktionen für die Seitenbewegung .....	872
20.3.4	Autopilotenfunktionen für Start und Landung .....	875
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 20 .....	880

## ENTWICKLUNGSPROZESS

<b>21</b>	<b>Entwicklungsprozeß für Flugregelungssysteme .....</b>	<b>881</b>
21.1	Entwicklungsprozeß in der Luftfahrt .....	881
21.1.1	Systementwicklungsprozeß .....	882
21.1.2	Prozeß zur Sicherheitsbewertung .....	884
21.2	Entwicklungsprozeß für ein Flugregelungssystem .....	887
21.2.1	Systementwicklungsprozeß nach V-Modell .....	887
21.2.2	Entwicklungsprozeß für die Regelgesetze .....	890
	Literaturverzeichnis zu Kapitel 21 .....	893

<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>895</b>
A.1	Mathematisches Modell der Flugzeugbewegung .....	895
A.1.1	Lineare Zustandsgleichungen .....	895
A.1.2	Nichtlineares Gleichungssystem in sechs Freiheitsgraden .....	900
A.1.3	Transformationsmatrizen .....	904

A.2	Flugmechanische Daten	906
A.3	Größen und Konstanten	910
A.4	Tabelle der Abkürzungen	912
	Literaturverzeichnis zum Anhang	915
	<b>Zeichenerklärung</b>	917
	<b>Sachverzeichnis</b>	921