

Rudolf Brockhaus



© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to [dandelion.com](http://dandelion.com) network.

# Flugregelung

Physikalische Grundlagen

Mathematisches Flugzeugmodell

Auslegungskriterien - Regelungsstrukturen

Entwurf von Flugregelungssystemen

Entwicklungslinien

Mit einem Geleitwort von Marc Pélegrin

Mit 536 Abbildungen

**Springer-Verlag**

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Pilot oder Autopilot ? .....	1
1.1.1	Der Autopilot als Flugschüler .....	3
1.1.2	Der Pilot als Flugmanager .....	4
1.2	Physikalische Grundlagen .....	7
1.2.1	Schreibweisen .....	8
1.2.2	Auftrieb und Widerstand .....	8
1.2.3	Momentengleichgewicht .....	10
1.2.4	Flugzeugsteuerung .....	12
1.2.5	Antrieb .....	14
1.2.6	Wind und Turbulenz .....	16
1.3	Mathematisches Prozeßmodell .....	20
1.3.1	Gleichungen der symmetrischen Bewegung .....	21
1.3.2	Näherungsansatz .....	22
1.3.3	Gleichungsanalyse .....	24
1.3.4	Flugbahngleichungen .....	25
1.4	Randbedingungen zur Flugreglerauslegung .....	27
1.4.1	Besonderheiten der Regelstrecke .....	27
1.4.2	Regelungsaufgaben .....	30
1.4.3	Auslegungskriterien .....	32
1.5	Aufbau von Flugregelungssystemen .....	33
1.5.1	Dämpfer .....	33
1.5.2	Lageregler .....	35
1.5.3	Höhenregler .....	36
1.5.4	Automatische Führung auf gekrümmter Flugbahn .....	37
1.5.5	Vorgaberegung .....	39
1.5.6	Gesamt-Regelungssystem .....	40

## Physikalische Grundlagen

<b>2</b>	<b>Definition der Bewegungsgrößen</b> .....	<b>46</b>
2.1	Bezeichnungen .....	46
2.2	Flugmechanische Größen .....	48
2.2.1	Festlegung der Flugzeuglage gegenüber der Erde .....	49
2.2.2	Festlegung des Bahngeschwindigkeitsvektors .....	49
2.2.3	Festlegung der aerodynamischen Größen .....	52
2.2.4	Winkel zur Beschreibung des Windeinflusses .....	54
2.2.5	Vereinfachte Darstellung der kinematischen Zusammenhänge .....	55
2.2.6	Die Geschwindigkeitsgleichung .....	57
2.2.7	Die Drehgeschwindigkeitsgleichung .....	58
2.2.8	Stellausschläge .....	58

2.3	Differentiation von Vektoren.....	61
2.3.1	Differentiation eines Vektors nach der Zeit .....	61
2.3.2	Räumliche Differentiation in einem Feld .....	62
2.3.3	Zeitliche Ableitung bei Bewegung durch ein Feld.....	63
2.3.4	Beziehungen zwischen Eulerwinkeln und Drehgeschwindigkeiten.....	64
2.4	Größen zur Bestimmung der Flugzeugposition .....	64
2.4.1	Position relativ zu einem erdfesten Punkt .....	65
2.4.2	Position relativ zu einer Sollflugbahn .....	68
2.5	Flugzeuggeometrie .....	71
2.6	Einfluß der Sensorposition .....	74
2.6.1	Fehlausrichtung von Sensoren.....	74
2.6.2	Einfluß der Flugzeugrotation .....	75
2.6.3	Beschleunigungsvektor an einem beliebigen Punkt am Flugzeug .....	76
2.7	Vorzeichendefinition.....	77
<b>3</b>	<b>Äußere Kräfte und Momente.....</b>	<b>79</b>
3.1	Die Erzeugung aerodynamischer Kräfte.....	79
3.1.1	Auftriebserzeugung .....	81
3.1.2	Der aerodynamische Widerstand.....	86
3.2	Bedingungen für stationären Flug.....	88
3.2.1	Federkonstante der Längsbewegung ("statische Stabilität") .....	89
3.2.2	Leitwerksauftrieb und -moment .....	91
3.2.3	Auftrieb und Moment des Gesamtflugzeugs.....	93
3.2.4	Federkonstante ("statische Stabilität") der Seitenbewegung.....	95
3.2.5	Flugzeugsteuerung .....	97
3.3	Aerodynamische Wirkungen bei symmetrischem Flug.....	100
3.3.1	Einfluß der Nickgeschwindigkeit .....	102
3.3.2	Einfluß der Anstellwinkeländerung .....	104
3.3.3	Einfluß der Fahrtänderung .....	105
3.3.4	Einfluß des Höhenruderausschlags .....	106
3.4	Aerodynamische Wirkungen bei unsymmetrischem Flug.....	107
3.4.1	Einfluß des Schiebewinkels.....	107
3.4.2	Einfluß einer Schiebewinkeländerung.....	110
3.4.3	Einfluß der Rollgeschwindigkeit .....	111
3.4.4	Einfluß der Giergeschwindigkeit.....	112
3.4.5	Einfluß des Querruderausschlags .....	114
3.4.6	Einfluß des Seitenruderausschlags .....	114
3.5	Ergänzung und Zusammenfassung des aerodynamischen Modells.....	115
3.5.1	Aerodynamische Kopplung von Längs- und Seitenbewegung .....	115
3.5.2	Bodeneffekt .....	116
3.5.3	Einfluß elastischer Verformung .....	117
3.5.4	Triebwerkeinfluß.....	118
3.5.5	Zusammenstellung der Beiwerte .....	119
3.6	Der Prozeß Luftstrahltriebwerk .....	121
3.6.1	Schuberzeugung .....	122
3.6.2	Triebwerksmodelle.....	127

3.6.3	Triebwerksregelung .....	128
3.6.4	Das Triebwerk als Stellglied für die Flugzeugbewegung .....	129
<b>4</b>	<b>Wind und Turbulenz .....</b>	<b>131</b>
4.1	Windmodelle .....	132
4.1.1	Die Entstehung von Wind .....	133
4.1.2	Die Modellierung von Wind .....	137
4.1.3	Die Entstehung von Turbulenz .....	139
4.1.4	Die Modellierung von Turbulenz .....	140
4.2	Kopplung von Wind- und Flugzeugbewegung .....	142
4.2.1	Wirkung des Windfeldes auf das Flugzeug als Punktmasse .....	143
4.2.2	Wirkung der Windgradienten auf das Flugzeug endlicher Ausdehnung .....	148
4.2.3	Orts- und Zeitabhängigkeit der auf das Flugzeug wirkenden Turbulenz .....	152
4.2.4	Das Dryden-Spektrum .....	155
4.2.5	Simulation von Turbulenz .....	157
4.2.6	Instationäre Wirkung der Turbulenz .....	158

## Mathematisches Prozeßmodell

<b>5</b>	<b>Nichtlineare Bewegungsgleichungen .....</b>	<b>161</b>
5.1	Zusammenstellung der Kraft- und Momentengleichungen .....	162
5.1.1	Wahl des Koordinatensystems .....	162
5.1.2	Gleichungsansatz .....	163
5.2	Die Zustandsgleichungen der Flugzeugbewegung .....	165
5.2.1	Differentialgleichung für die Translationsgeschwindigkeit .....	165
5.2.2	Beschleunigung und Lastvielfaches .....	167
5.2.3	Differentialgleichung für die Position (Flugbahn) .....	168
5.2.4	Vereinfachte Darstellung einer Anflugbahn .....	168
5.2.5	Differentialgleichung für die Drehgeschwindigkeit .....	170
5.2.6	Differentialgleichung für die Lagewinkel .....	171
5.3	Diskussion des Gleichungssystems .....	172
5.4	Stationäre Flugzustände .....	175
5.4.1	Vorüberlegung zur Berechnung eines ausgetrimmten Flugzustandes .....	175
5.4.2	Der symmetrische Geradeausflug .....	176
5.4.3	Der horizontale, koordinierte Kurvenflug .....	178
<b>6</b>	<b>Verhalten des Flugzeugs als Punktmasse .....</b>	<b>182</b>
6.1	Reduzierte Differentialgleichungen .....	182
6.1.1	Bahnbewegung in drei Freiheitsgraden .....	182
6.1.2	Bahnbewegung in zwei Freiheitsgraden .....	183
6.2	Energiebetrachtungen und Korhammer-Diagramm .....	186
6.3	Reaktion des Flugzeugs auf Stellkommandos .....	191
6.3.1	Veränderung des aerodynamischen Arbeitspunktes .....	191
6.3.2	Verhalten unterhalb der Fahrt minimalen Widerstandes .....	193
6.3.3	Reaktion des Flugzeugs auf Schubänderung .....	195
6.4	Reaktion des Flugzeugs im Windfeld .....	198

6.4.1	Rückenwind .....	198
6.4.2	Seitenwind .....	199
6.4.3	Abwind .....	200
6.4.4	Verhalten im beschleunigten Windfeld .....	201
<b>7</b>	<b>Linearisierte Zustandsgleichungen .....</b>	<b>203</b>
7.1	Einschränkende Annahmen .....	203
7.1.1	Vereinfachung von Euler-Termen und Transformationsmatrizen .....	204
7.1.2	Weitere Vereinfachungen .....	206
7.1.3	Zusammenstellung der getroffenen Annahmen .....	206
7.1.4	Differentialgleichungen für Geschwindigkeit und Position .....	206
7.1.5	Differentialgleichungen für Drehgeschwindigkeit und Lagewinkel .....	207
7.1.6	Wind-Differentialgleichung .....	208
7.2	Aufspaltung und Umformung des Gleichungssystems .....	208
7.2.1	Wechsel einiger Zustandsgrößen .....	209
7.2.2	Zustandsgleichungen für Längs- und Seitenbewegung .....	210
7.3	Linearisierung des Gleichungssystems .....	212
7.3.1	Grundsätzliches Vorgehen bei der Linearisierung .....	212
7.3.2	Linearisierung der Gleichungen der Längsbewegung .....	213
7.3.3	Zustandsgleichungen der Längsbewegung .....	217
7.3.4	Linearisierung der Gleichungen der Seitenbewegung .....	217
7.3.5	Zustandsgleichungen der Seitenbewegung .....	221
7.3.6	Numerische Umformung der Gleichungen .....	221
7.3.7	Numerische Linearisierung der Gleichungen .....	221
7.4	Darstellung der Gleichungen durch Signalflußdiagramme .....	223
7.4.1	Aufbau der Signalflußdiagramme .....	223
<b>8</b>	<b>Analyse des dynamischen Flugzeugverhaltens .....</b>	<b>228</b>
8.1	Lösung der Zustandsgleichungen .....	228
8.1.1	Lösung der Zustandsgleichungen im Zeitbereich .....	229
8.1.2	Numerische Simulation .....	231
8.1.3	Lösung der Zustandsgleichung im Laplacebereich .....	233
8.1.4	Stabilität .....	235
8.1.5	Lösung linearer Gleichungssysteme .....	238
8.2	Das Eigenverhalten des Flugzeugs .....	242
8.2.1	Typische Verteilung der Wurzeln der charakteristischen Gleichung .....	242
8.2.2	Sprungantworten von Längs- und Seitenbewegung .....	243
8.2.3	Typische Bewegungsformen von Längs- und Seitenbewegung .....	243
8.3	Das Übertragungsverhalten des Flugzeugs .....	247
8.3.1	Berechnung von Übertragungsfunktionen .....	247
8.3.2	Grenzwertbetrachtungen .....	250
8.4	Näherungsansätze .....	252
8.4.1	Näherung für die Anstellwinkelschwingung .....	253
8.4.2	Näherung für die Phygoidbewegung .....	256
8.4.3	Näherungen für die Seitenbewegung .....	259
8.4.4	Weitere Charakterisierung der Seitenbewegung .....	262
8.4.5	Zusammenfassung .....	267

8.5	Regelbarkeitsbetrachtungen .....	269
8.5.1	Stellverhalten in der Längsbewegung .....	269
8.5.2	Allpaßverhalten .....	272
8.5.3	Stellverhalten in der Seitenbewegung .....	275
8.5.4	Reaktion des Flugzeugs auf Störsignale .....	276
8.5.5	Zusammenfassung .....	283

## **Randbedingungen zur Reglerauslegung**

<b>9</b>	<b>Meßverfahren und Sensoren .....</b>	<b>286</b>
9.1	Meßbarkeit von Zustands- und Ausgangsgrößen .....	288
9.1.1	Aufstellung meßbarer Größen .....	289
9.1.2	Meßfehler .....	289
9.1.3	Meßdynamik .....	291
9.1.4	Sicherheitsaspekte .....	292
9.2	Strömungsmechanische Größen .....	294
9.2.1	Barometrische Höhe .....	295
9.2.2	Vertikalgeschwindigkeit .....	296
9.2.3	Fahrt und Machzahl .....	296
9.2.4	Anstellwinkel .....	297
9.2.5	Luftwerterechner .....	298
9.3	Inertialgrößen .....	299
9.3.1	Beschleunigung .....	300
9.3.2	Wirkungsweise von Kreiseln .....	301
9.3.3	Winkelgeschwindigkeitskreisel .....	304
9.3.4	Lotkreisel (Kreiselhorizont) .....	305
9.4	Azimutmessung .....	306
9.4.1	Magnetkompaß, Fluxvalve .....	307
9.4.2	Kurskreisel, magnetfeldgestützte Kurskreiselanlage .....	307
9.5	Positionsbestimmung .....	309
9.5.1	Ortungsprinzipien .....	311
9.5.2	Radio- und Radar- Höhenmessung .....	313
9.5.3	Funk-Entfernungsmessung (DME) .....	314
9.5.4	Automatische Funkpeilung (Radiokompaß) .....	314
9.5.5	UKW-Drehfunkfeuer (VOR und TACAN) .....	315
9.5.6	Langstrecken - Ortungsverfahren .....	317
9.5.7	Satellitenortung .....	318
9.6	Navigationssysteme .....	319
9.6.1	Trägheitsnavigation (INS) .....	320
9.6.2	Das Instrumenten - Landesystem (ILS, MLS) .....	321
9.6.3	Neuere Entwicklungen .....	323
9.7	Schätzfilter zur Meßwertkonsolidierung .....	323
9.7.1	Kalman - Filter .....	324
9.7.2	Komplementäre Filterung .....	326
<b>10</b>	<b>Flugzeugsteuerungen .....</b>	<b>329</b>
10.1	Stellglieder .....	330

10.1.1	Zusammenstellung konventioneller Stellglieder .....	330
10.1.2	Stellglieder für besondere Aufgaben .....	332
10.2	Stellantriebe .....	336
10.2.1	Elektrische Stellantriebe .....	338
10.2.2	Hydraulische Stellantriebe .....	340
10.2.3	Elektrohydraulisches Ventil .....	341
10.3	Steuerungssysteme .....	343
10.3.1	Grundprinzipien .....	343
10.3.2	Manuelle Steuerung mit Dämpferunterstützung .....	346
10.3.3	Steuerung bei Autopilotenbetrieb .....	347
10.3.4	Elektrische Steuerungen (Fly-by-Wire) .....	349
10.3.5	Sicherheitsaspekte .....	350
<b>11</b>	<b>Regelungsaufgaben und Auslegungsziele .....</b>	<b>356</b>
11.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	357
11.1.1	Beurteilungskriterien .....	357
11.1.2	Aufgabenspektrum .....	359
11.1.3	Richtlinien und Standards .....	363
11.2	Flugeigenschaftskriterien .....	367
11.2.1	Längsbewegung .....	368
11.2.2	Seitenbewegung .....	371
11.2.3	Forderungen zur Regelgenauigkeit .....	374
11.3	Flugbahnkriterien .....	376
11.3.1	Regelgrößen und Reglerarchitektur .....	376
11.3.2	Standard - Flugrouten .....	379
11.3.3	Führung im Flughafennahbereich .....	381
11.3.4	Endanflug-Verfahren .....	384
11.3.5	Neue Entwicklungen .....	387
11.4	Mathematische Formulierung von Güteforderungen .....	391
11.4.1	Flugdynamik .....	392
11.4.2	Störunterdrückung .....	394
11.4.3	Bahnführung .....	395
11.4.4	Zusammenfassung .....	398

## Regelungsverfahren

<b>12</b>	<b>Regler zur Modifikation der Prozeßdynamik .....</b>	<b>399</b>
12.1	Zustandsregler-Strukturen .....	401
12.1.1	Zustandsvektorrückführung .....	401
12.1.2	Ausgangsrückführung .....	406
12.1.3	Der dynamische Regelfaktor .....	410
12.1.4	Einfluß von Allpaßverhalten .....	413
12.1.5	Zustandsrückführung mit Beobachter .....	416
12.2	Mehrgrößen-Regelungsstrukturen .....	418
12.2.1	Grundgleichungen des Mehrgrößensystems .....	419
12.2.2	Übertragungsfunktionen des Mehrgrößensystems .....	421
12.2.3	Besonderheiten des Reglerentwurfs .....	424

12.3	Auslegung von Zustandsreglern .....	428
12.3.1	Riccati-Entwurf .....	429
12.3.2	Polvorgabe .....	430
12.3.3	Polgebietsvorgabe .....	432
12.3.4	Eigenstrukturvorgabe .....	433
12.3.5	Robuste Regelung .....	436
12.4	Regleranpassung .....	443
12.4.1	Strukturvariable Regler .....	443
12.4.2	Adaptive Regelung .....	444
<b>13</b>	<b>Reglerstrukturen zur Prozeßführung .....</b>	<b>448</b>
13.1	Regelungsstruktur für stationäre Genauigkeit .....	448
13.1.1	Stationärverhalten des Regelkreises mit ZVR .....	449
13.1.2	Einführung einer Vorsteuermatrix .....	451
13.1.3	Erweiterung der ZVR durch einen I-Regler .....	453
13.1.4	Störgrößenaufschaltung .....	457
13.1.5	Kaskadenregelung .....	458
13.2	Auslegung von Führungsreglern .....	460
13.2.1	Globaler Riccati - Entwurf .....	461
13.2.2	Numerische Optimierung .....	462
13.2.3	Gütekriterien .....	465
13.2.4	Sequentieller Regelschleifenentwurf .....	471
13.3	Lineare Modellfolgeregelung .....	477
13.3.1	Modellfolge-Bedingungen .....	478
13.3.2	Modellfolge als Verallgemeinerung der ZVR .....	483
13.3.3	Auswirkung von Parameterschwankungen .....	484
13.3.4	Modellfolge für einen Teilprozeß bei singulärer Stellmatrix .....	486
13.3.5	Pragmatische Entwurfsstrategie .....	487

## Flugregler-Strukturen

<b>14</b>	<b>Verbesserung der Flugeigenschaften .....</b>	<b>493</b>
14.1	Auswahl wirksamer Rückführungen .....	494
14.1.1	Modifizierung der Anstellwinkelschwingung .....	494
14.1.2	Modifizierung der Phygoidschwingung .....	497
14.1.3	Modifizierung der Taumelschwingung .....	499
14.1.4	Modifizierung der Rollbewegung .....	500
14.2	Basisregler für die Längsbewegung .....	503
14.2.1	Nickdämpfer .....	503
14.2.2	Anpassung eines Nickdämpfers an den Flugzustand .....	505
14.2.3	Maßnahmen zur Störunterdrückung .....	508
14.2.4	Nick-Lageregelung .....	510
14.2.5	Längs-Trimmmung .....	512
14.3	Basisregler für die Seitenbewegung .....	514
14.3.1	Gierdämpfer .....	514
14.3.2	Kurvenkoordinierung .....	516
14.3.3	Maßnahmen zur Störunterdrückung .....	517



14.3.4	Roll-Lageregelung .....	519
<b>15</b>	<b>Erweiterung der Flugbereichsgrenzen .....</b>	<b>523</b>
15.1	Charakterisierung neuer Regelungsaufgaben .....	523
15.2	Abminderung von Böenlasten .....	525
15.2.1	Erweiterung der Dämpferfunktion .....	526
15.2.2	Modellerweiterung .....	527
15.2.3	Störgrößenaufschaltung .....	529
15.2.4	Schwingungsdämpfung .....	531
15.3	Höhere Manövrierbarkeit durch direkte Kraftsteuerung .....	532
15.3.1	Nachteile der Momentensteuerung .....	533
15.3.2	Steuerstrategien mit direkter Kraftsteuerung .....	535
15.3.3	Regelung mit Hilfe direkter Kraftsteuerung .....	540
15.4	Reduzierte Stabilität .....	542
15.4.1	Flugmechanische Zusammenhänge .....	542
15.4.2	Lösungen für Transportflugzeuge .....	545
15.4.3	Lösungen für Kampfflugzeuge .....	546
15.5	Betriebsgrenzen-Regelung .....	547
<b>16</b>	<b>Stabilisierung der Flugbahn .....</b>	<b>549</b>
16.1	Regelung von Höhe und Vertikalgeschwindigkeit .....	550
16.1.1	Struktur der Höhenregelung .....	551
16.1.2	Auslegung eines Höhenreglers mit Zustandsrückführung .....	553
16.1.3	Höhenregler-Betriebsarten .....	555
16.1.4	Regelung der Vertikalgeschwindigkeit .....	556
16.2	Regelung des aerodynamischen Zustandes .....	557
16.2.1	Fahrtregelung mit dem Höhenruder als Stellglied .....	557
16.2.2	Fahrtregelung mit Hilfe des Schubes (Vortriebsregler) .....	557
16.2.3	Kopplungen zwischen Fahrt- und Höhenregelung .....	561
16.2.4	Der Anstellwinkel als Regelgröße .....	563
16.3	Regelung des Flugwegs über Grund .....	565
16.3.1	Kursregelung unter Windeinfluß .....	565
16.3.2	Steuerkursregler .....	568
16.3.3	Anfliegen von VOR-Stationen .....	570
16.3.4	Standlinienregelung .....	572
16.4	Regelungssystem für die automatische Landung .....	576
16.4.1	Das ILS-Landeverfahren .....	576
16.4.2	Regelung der Endphase des Anfluges .....	580
<b>17</b>	<b>Führung auf wechselnden Flugbahnen .....</b>	<b>583</b>
17.1	Integrierte Bahnregler für die Längsbewegung .....	584
17.1.1	Aufbau eines Bahnregelungssystems .....	586
17.1.2	Schubvorsteuerung .....	589
17.1.3	Steillandereger FRG 70 .....	591
17.1.4	Integriertes Bahnführungssystem VGR 76 .....	594
17.1.5	Energierregler in variablen Windfeldern .....	600

17.2	Intelligente Führungsregler .....	603
17.2.1	Generierung von Führungsprozessen .....	605
17.2.2	Nichtlineare Vorsteuerung .....	608
17.2.3	Sollzustandsgenerierung .....	610
17.2.4	Gesamtsystem .....	611
17.2.5	Regler SFB 212 .....	614
17.2.6	Konfliktfreie Grenzregelung .....	616
17.3	Generierung von Solltrajektorien .....	618
17.3.1	Modelltrajektorien für einfache Bahnmanöver .....	619
17.3.2	Horizontale Bahnmanöver .....	622
17.3.3	Verbindung von Wegpunkten .....	624
17.3.4	Vertikale Bahnmanöver .....	628
17.3.5	4D-Bahnregelung .....	629
17.4	Flugmanagement .....	632
17.4.1	Flugmanagement-Funktionen .....	632
17.4.2	Flugmanagementaufgaben aus der Sicht der Flugregelung .....	634
17.4.3	Entwicklungsprobleme .....	636
<b>18</b>	<b>Manuelle Flugbahnführung .....</b>	<b>639</b>
18.1	Anzeigen als Schnittstelle zwischen Pilot und Regler .....	642
18.1.1	Standardisierte Zentralanzeigen .....	643
18.1.2	Neue Anzeigen für Bahn- und Energiewinkel .....	646
18.1.3	Flight-Director-Prinzip .....	649
18.2	Vorgaberegeler .....	651
18.2.1	Grundprinzipien .....	651
18.2.2	Flugeigenschafts-Vorgaberegler .....	655
18.2.3	Bahnführungs-Vorgaberegler .....	664
18.3	In-flight-Simulation .....	671
18.3.1	Aufgabenstellung .....	671
18.3.2	Ansätze und Randbedingungen .....	673
18.3.4	Projekte und Ergebnisse .....	676

## Aktuelle Beispiele für das Gesamtsystem

<b>19</b>	<b>Regelungssysteme für Kampfflugzeuge .....</b>	<b>682</b>
19.1	Auslegung von Basisreglern .....	682
19.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	682
19.1.2	Besonderheiten von Basisreglern .....	684
19.1.3	Basisregler für die Längsbewegung .....	685
19.1.4	Basisregler für die Seitenbewegung .....	687
19.1.5	Anforderungen in der Längsbewegung bei instabiler Basisauslegung .....	689
19.1.6	Anforderungen in der Seitenbewegung .....	693
19.2	Autopilot des MRCA-Tornado .....	694
19.2.1	Autopilot für die Längsbewegung .....	695
19.2.2	Autopilot für die Seitenbewegung .....	697
19.3	Regler des CCV-F104-G .....	698
19.3.1	Ziele des Experimentalprogramms .....	698

19.3.2	Reglerstruktur .....	699
19.4	X31-A Regelungssystem .....	704
19.4.1	Regelungskonzept .....	704
19.4.2	Nichtlineare Sollzustandsgenerierung .....	706
19.4.3	Reglerstruktur .....	708
<b>20</b>	<b>A-320 - Regelungssystem .....</b>	<b>711</b>
20.1	Steuerungskonzept und Rechnerarchitektur .....	712
20.1.1	Überblick .....	712
20.1.2	Steuerungskonzept .....	715
20.1.3	Sicherheitsfunktionen .....	716
20.1.4	Automatischer Betriebsartenwechsel .....	717
20.2	Fly-by-Wire-Regelgesetze .....	718
20.2.1	Nickachse .....	718
20.2.2	Rollachse .....	720
20.2.3	Gierachse .....	722
20.2.4	Betriebsgrenzenregelung in der Längsbewegung .....	722
20.2.5	Betriebsgrenzenregelung in der Seitenbewegung .....	725
20.3	Autopilotenfunktionen .....	725
20.3.1	Autopilotenfunktionen in der Längsbewegung .....	726
20.3.2	Vortriebsregelung .....	729
20.3.3	Autopilotenfunktionen für die Seitenbewegung .....	732
20.3.4	Autopilotenfunktionen für Start und Landung .....	734
<b>Anhang</b>	.....	<b>739</b>
A.1	Mathematisches Modell der Flugzeugbewegung .....	739
A.1.1	Lineare Zustandsgleichungen .....	739
A.1.2	Nichtlineares Gleichungssystem .....	744
A.1.3	Transformationsmatrizen .....	747
A.1.4	Lineares Triebwerksmodell .....	749
A.2	Flugmechanische Daten .....	751
A.2.1	Flugzustände, Derivative und Ersatzgrößen .....	751
A.2.2	Zustandsmatrizen, Sprungantworten, Bodediagramme .....	757
A.3	Größen und Konstanten .....	788
A.4	Tabelle der Abkürzungen .....	790
<b>Zeichenerklärung</b>	.....	<b>792</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>795</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>814</b>