

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	21
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>25</b>
1.1 Die Anfänge des Motorflugs .....	26
1.2 Der Erste Weltkrieg .....	27
1.3 Entstehung der Passagierluftfahrt .....	28
1.4 Der Zweite Weltkrieg .....	31
1.5 Das Strahltriebwerk erobert die Luftfahrt .....	33
1.6 Der Traum vom Überschallflug .....	35
1.7 Die Expansion des Luftverkehrs .....	36
1.8 Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt .....	39
1.9 Hubschrauber .....	40
1.10 Was bringt die Zukunft? .....	41
Kommentierte Literatur- und Quellenhinweise .....	43
Bildquellen .....	43
<b>2 Aerodynamik .....</b>	<b>45</b>
2.1 Strömungsmechanische Grundgleichungen .....	47
2.1.1 Allgemeines .....	47
2.1.2 Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie .....	47
2.1.2.1 Prinzip der Bilanzbildung .....	47
2.1.2.2 Massenbilanz .....	48
2.1.2.3 Impulsbilanz .....	48
2.1.2.4 Energiebilanz .....	49
2.1.2.5 Generalisierte Schreibweise .....	50
2.1.3 Differenzielle Form .....	50
2.1.3.1 Streng konservative Differenzialform .....	51
2.1.3.2 Schwach konservative Differenzialform .....	51
2.1.3.3 Nicht-konservative Differenzialformen .....	51
2.1.4 Konstitutive Beziehungen .....	52
2.1.4.1 Thermodynamische Zustandsgleichungen .....	52
2.1.4.2 Molekulare Reibungsspannung .....	52
2.1.4.3 Molekulare Wärmeleitung .....	53
2.1.4.4 Transportkoeffizienten .....	53
2.1.4.5 Turbulente Strömungen .....	53
2.1.5 Kennzahlen .....	54
2.1.5.1 Machzahl .....	54
2.1.5.2 Reynoldszahl .....	54
2.1.5.3 Prandtlzahl .....	54
2.1.5.4 Strouhalzahl .....	55
2.1.6 Vereinfachungen .....	55
2.1.6.1 Potenzialgleichung .....	55
2.1.6.2 Inkompressible Strömungen .....	55
2.1.6.3 Grenzschichtgleichungen .....	56
Literatur .....	57
Bildquelle .....	57

<b>2.2 Grundlagen der Aerodynamik</b>	<b>57</b>
2.2.1 Grundbegriffe	57
2.2.1.1 Luftkräfte und -momente	58
2.2.1.2 Beiwerte und Kennzahlen	59
2.2.1.3 Nachrechnungs- und Entwurfsaufgaben	59
2.2.1.4 Beschränkung der Grundlagen	59
2.2.2 Grundlagen der Grenzschichten umströmter Körper	60
2.2.2.1 Lösung der Grenzschichtgleichungen	61
2.2.2.2 Verhalten turbulenter Grenzschichten	63
2.2.2.3 Transition von laminaren zu turbulenten Grenzschichten	64
2.2.3 Potenzialtheorie der nichtviskosen Umströmung eines Tragflügels	64
2.2.3.1 Potenzialgleichung und Affinitätsgesetz	64
2.2.3.2 Allgemeine Lösung der Potenzialgleichung	65
2.2.3.3 Berechnungsmethoden	66
2.2.3.4 Überschallströmungen	68
2.2.4 Ergebnisse der Profiltheorie	69
2.2.4.1 Skeletttheorie	69
2.2.4.2 Einflüsse der Dickenverteilung und der Grenzschichten	71
2.2.4.3 Einfluss der Machzahl und transsonische Strömungsphänomene	72
2.2.4.4 Schlanke Profile im Überschall	74
2.2.5 Ergebnisse der Tragflügeltheorie	75
2.2.5.1 Ungepfeilte Tragflügel mit großer Streckung bei inkompressibler Strömung	75
2.2.5.2 Tragflügel mit beliebigem Grundriss bei Unterschallgeschwindigkeit	77
2.2.5.3 Tragflügel bei Überschallgeschwindigkeit	81
Literatur	83
<b>2.3 Konfigurationsaerodynamik</b>	<b>83</b>
2.3.1 Transportflugzeuge	83
2.3.1.1 Aerodynamische Anforderungen an Verkehrs- und Transportflugzeuge	85
2.3.1.2 Flügel-Rumpf-Anordnungen	88
2.3.1.3 Triebwerksintegration	95
Literatur	113
Bildquellen	113
2.3.2 Kampfflugzeuge	113
2.3.2.1 Anforderungen an moderne Kampfflugzeuge	114
2.3.2.2 Tragflügel	115
2.3.2.3 Flügel-Rumpf-Integration	130
2.3.2.4 Integration der Leitwerke	133
2.3.2.5 Einlaufintegration	138
2.3.2.6 Außenlastenintegration	147
Literatur	150
Bildquellen	150
2.3.3 Hubschrauber	151
2.3.3.1 Grundbegriffe	151
2.3.3.2 Rotor-aerodynamik	155
2.3.3.3 Rumpfaerodynamik	166
2.3.3.4 Auslegung des Heckauslegers	168
Literatur	171
Bildquellen	172
<b>2.4 Flügelentwurf</b>	<b>173</b>
2.4.1 Allgemeine Entwurfsziele	173
2.4.2 Flügelpfeilung	174
2.4.3 Transsonische Profile	175

2.4.4	Transsonischer Pfeilflügel .....	177
2.4.4.1	Aerodynamischer Entwurf .....	177
2.4.4.2	Elastischer Flügel .....	178
2.4.5	Laminarflügel .....	179
2.4.6	Vorgepfeilter Flügel .....	181
2.4.7	Ausblick .....	183
	Literatur .....	183
	Bildquellen .....	184
2.5	Hochauftrieb .....	184
2.5.1	Grundlagen .....	184
2.5.2	Passive Hochauftriebssysteme .....	186
2.5.2.1	Passive Hochauftriebshilfen an der Vorderkante .....	187
2.5.2.2	Passive Hochauftriebshilfen an der Hinterkante .....	188
2.5.3	Aktive Auftriebssteigerung .....	189
2.5.3.1	Grenzschichtbeeinflussung durch Ausblasen und Absaugen .....	190
2.5.3.2	Zirkulationskontrolle und Superzirkulation .....	190
2.5.3.3	Ausnutzung des Triebwerksstrahls .....	191
	Literatur .....	192
	Bildquellen .....	192
2.6	Heck- und Leitwerksaerodynamik .....	192
2.6.1	Anforderungen, Grundformen und Positionierung .....	192
2.6.1.1	Einführung und Begriffsdefinitionen .....	192
2.6.1.2	Stabilität, Steuerung, Kraft- und Momentengleichgewicht .....	193
2.6.1.3	Grundgedanken zur Auslegung .....	193
2.6.1.4	Grundformen .....	193
2.6.2	Aerodynamik des Rumphecks .....	196
2.6.3	Höhenleitwerk .....	198
2.6.3.1	Grundlegende Anforderungen .....	198
2.6.3.2	Beitrag zur Luftkraft des Gesamtflugzeugs .....	198
2.6.3.3	Entwurfsaspekte .....	201
2.6.3.4	Profile für Höhenleitwerke .....	204
2.6.4	Seitenleitwerk .....	204
2.6.4.1	Grundlegende Anforderungen .....	204
2.6.4.2	Beitrag zur Luftkraft des Gesamtflugzeugs .....	205
2.6.4.3	Entwurfsaspekte .....	206
2.6.4.4	Profile für Seitenleitwerke .....	209
2.6.5	Ruder an Leitwerken .....	209
	Literatur .....	211
	Bildquellen .....	212
2.7	Aeroakustik .....	212
2.7.1	Grundlagen .....	212
2.7.1.1	Störungs- und Wellengleichungen .....	214
2.7.1.2	Lighthill-Gleichung - Aeroakustische Analogie .....	214
2.7.1.3	Ffowcs-Williams-&-Hawkins-Gleichung .....	215
2.7.2	Schallerzeugung an Flugzeugen .....	216
2.7.2.1	Propellergeräusch .....	217
2.7.2.2	Turbofaneräusch .....	217
2.7.2.3	Strahlgeräusch .....	219
2.7.2.4	Umströmungsgeräusch .....	220
2.7.3	Schallerzeugung an Hubschraubern .....	221
2.7.3.1	Hauptrotorgeräusch .....	222

2.7.3.2	Heckrotorgeräusch .....	223
2.7.4	Installation.....	223
2.7.4.1	Installationsschallquellen.....	223
2.7.4.2	Schallabstrahlung unter Installationsbedingungen.....	223
2.7.5	Lärmminderung.....	224
2.7.5.1	Entwurf lärmarmen aerodynamischer Komponenten.....	224
2.7.5.2	Lärmminderungstechnologien.....	224
	Literatur .....	225
	Bildquellen.....	226
2.8	Numerische Methoden der Strömungsmechanik .....	226
2.8.1	Allgemeines.....	226
2.8.2	Grundprinzipien der numerischen Verfahren .....	227
2.8.2.1	Netzgenerierung .....	227
2.8.2.2	Diskretisierung.....	228
2.8.2.3	Lösung der diskreten Gleichungen.....	229
2.8.3	Finite-Volumen-Verfahren zur Lösung der Euler-/Navier-Stokes-Gleichungen .....	229
2.8.3.1	Räumliche Diskretisierung.....	229
2.8.3.2	Lösungsverfahren .....	230
2.8.3.3	Beschleunigungstechniken.....	231
2.8.3.4	Instationäre Verfahren.....	231
2.8.3.5	Turbulente Strömungen.....	231
2.8.3.6	Beispielanwendungen .....	232
2.8.4	Multidisziplinäre Simulation .....	234
2.8.5	Entwurf und Optimierung.....	235
2.8.6	Perspektive .....	235
	Literatur .....	236
2.9	Versuchstechnik .....	237
2.9.1	Druckmessung .....	237
2.9.2	Geschwindigkeitsmessung .....	239
2.9.3	Temperaturmessung.....	244
2.9.4	Messung der Kräfte und Momente.....	245
2.9.5	Versuchsanlagen .....	247
	Literatur .....	252
	Bildquelle .....	253
3	Flugmechanik .....	255
3.1	Flugleistungen.....	255
3.1.1	Einleitung.....	255
3.1.2	Atmosphäre.....	256
3.1.2.1	Einleitung.....	256
3.1.2.2	Physikalische Zusammenhänge .....	256
3.1.2.3	Normatmosphäre.....	256
3.1.3	Aerodynamische Kräfte .....	257
3.1.3.1	Einleitung.....	257
3.1.3.2	Auftrieb.....	257
3.1.3.3	Widerstand .....	258
3.1.3.4	Flugzeugpolare.....	259
3.1.4	Antrieb .....	259
3.1.4.1	Definition von Schub und spezifischem Brennstoffverbrauch.....	259
3.1.4.2	Propellerantrieb.....	259
3.1.4.3	Strahltriebwerke .....	260

3.1.4.4	Raketenantrieb .....	260
3.1.4.5	Verallgemeinerte Triebwerksleistungsgröße .....	260
3.1.5	Stationäre Flugzustände .....	261
3.1.5.1	Gleitflug und seine Bedeutung für die aerodynamische Konfiguration des Flugzeugs .....	261
3.1.5.2	Horizontalflug .....	262
3.1.5.3	Maximale Flughöhe .....	263
3.1.5.4	Steigflug .....	264
3.1.5.5	Horizontaler Kurvenflug .....	265
3.1.5.6	Flugbereichsgrenzen .....	268
3.1.6	Flugabschnitte .....	269
3.1.6.1	Strecken- und Dauerflug .....	269
3.1.6.2	Steigflugverfahren .....	271
3.1.6.3	Abflug und Landung .....	272
3.2	Stabilität, Steuerung, Flugdynamik .....	276
3.2.1	Einleitung .....	276
3.2.2	Statische Stabilität und Steuerung der Längsbewegung .....	277
3.2.2.1	Längsbewegung des stationären Geradeausflugs .....	277
3.2.2.2	Manöverstabilität (Abfangbewegung) .....	285
3.2.2.3	Steuersysteme und Steuerkräfte .....	287
3.2.3	Seitenbewegung .....	289
3.2.3.1	Freiheitsgrade .....	289
3.2.3.2	Gierbewegung .....	289
3.2.3.3	Rollbewegung .....	293
3.2.3.4	Kopplungsmomente .....	295
3.2.3.5	Spezielle unsymmetrische Flugzustände .....	298
3.2.4	Dynamik der Längsbewegung .....	301
3.2.4.1	Bewegungsgleichungen .....	301
3.2.4.2	Dynamische Stabilität .....	302
3.2.4.3	Eigenwerte und Eigenbewegungsformen .....	303
3.2.5	Dynamik der Seitenbewegung .....	305
3.2.5.1	Bewegungsgleichungen .....	305
3.2.5.2	Dynamische Seitenstabilität .....	307
3.2.5.3	Eigenwerte und Eigenbewegungsformen .....	307
	Literatur .....	309
	Bildquellen .....	309
4	Luftfahrzeugstrukturen .....	311
4.1	Luftfahrtwerkstoffe .....	312
4.1.1	Metalle .....	312
4.1.2	Faserverbundwerkstoffe .....	315
4.1.2.1	Historie und Charakterisierung .....	315
4.1.2.2	Fasern, Matrix-Kunststoffe und Halbzeuge .....	317
4.1.2.3	Spannungsanalyse .....	320
4.1.2.4	Laminattypen .....	321
4.1.2.5	Fügetechniken .....	323
	Literatur .....	325
	Bildquellen .....	325
4.2	Strukturtheorie .....	325
4.2.1	Lineare Elastizitätstheorie .....	325
4.2.1.1	Grundlagen .....	325
4.2.1.2	Scheiben .....	327

4.2.1.3	Biegebalken .....	329
4.2.1.4	Dünnwandige Profile .....	333
4.2.1.5	Torsionsstäbe .....	339
4.2.1.6	Schubfeldtheorie .....	343
4.2.1.7	Platten .....	348
4.2.2	Plastizität .....	351
4.2.2.1	Ramberg-Osgood-Beziehung .....	351
4.2.2.2	v. Mises-Spannung .....	352
4.2.2.3	Verfestigung .....	353
4.2.3	Stabilität .....	354
4.2.3.1	Stabknicken .....	355
4.2.3.2	Plattenbeulen .....	357
4.2.3.3	Schalenbeulen .....	360
4.2.4	Schädigungsverhalten .....	362
4.2.4.1	Metalle .....	362
4.2.4.2	Faser-Kunststoff-Verbunde .....	367
4.2.5	Numerische Berechnungsmethoden .....	373
4.2.5.1	Strukturmechanische Grundlagen .....	374
4.2.5.2	Grundzüge des numerischen Verfahrens .....	375
4.2.5.3	Nachlaufrechnung .....	375
	Literatur .....	376
	Bildquellen .....	377
4.3	Lasten .....	377
4.3.1	Arten von Lasten .....	377
4.3.2	Bemessungslasten .....	377
4.3.3	Belastungsgrenzen .....	378
4.3.3.1	Manöverlasten .....	379
4.3.3.2	Böenlasten .....	382
	Literatur .....	385
4.4	Strukturkonstruktion .....	385
4.4.1	Konstruktionsphilosophien .....	386
4.4.1.1	Einführung .....	386
4.4.1.2	Safe-Life .....	387
4.4.1.3	Fail Safe .....	387
4.4.1.4	Damage Tolerance .....	387
4.4.2	Anforderungen .....	391
4.4.3	Bauweisen .....	391
4.4.3.1	Strukturelemente .....	391
4.4.3.2	Fachwerkbauweise .....	394
4.4.3.3	Schalenbauweise .....	395
	Literatur .....	399
	Bildquellen .....	399
4.5	Grundlagen der Aeroelastik .....	399
4.5.1	Einführung .....	399
4.5.2	Klassifizierung der aeroelastischen Probleme .....	400
4.5.3	Grundlagen der Elastomechanik .....	401
4.5.3.1	Strukturidealisierung .....	401
4.5.3.2	Statisches Deformationsverhalten des Tragflügels großer Streckung .....	403
4.5.3.3	Gepfeilte Auftriebsflächen kleiner Streckung .....	405
4.5.3.4	Schwingungen .....	405
4.5.4	Grundlagen der instationären Aerodynamik .....	406

4.5.4.1	Einleitende Bemerkungen .....	406
4.5.4.2	Tragflügel großer Streckung in inkompressibler Strömung .....	406
4.5.4.3	Tragflügel in kompressibler Unterschallströmung .....	409
4.5.4.4	Tragflügel in transsonischer Strömung .....	410
4.5.5	Statische aeroelastische Probleme .....	411
4.5.5.1	Stationäre Auftriebsverteilung am elastischen Pfeilflügel .....	412
4.5.5.2	Tragflügeltorsionsdivergenz .....	412
4.5.5.3	Ruderwirksamkeit .....	414
4.5.6	Dynamische aeroelastische Probleme .....	415
4.5.6.1	Klassisches Flattern mit einem Freiheitsgrad .....	415
4.5.6.2	Klassisches Flattern mit zwei und mehr Freiheitsgraden .....	416
4.5.6.3	Aeroservoelastische Stabilität .....	418
4.5.6.4	Transsonisches Flattern .....	419
4.5.6.5	Abreißflattern – Dynamic Stall .....	420
4.5.6.6	Kreiseffekte – Whirlflattern .....	421
4.5.6.7	Flattern von Turbomaschinenbeschaufelungen .....	422
4.5.6.8	Buffeting .....	423
4.5.7	Experimentelle aeroelastische Methoden und Verfahren .....	425
4.5.7.1	Standschwingungsversuch .....	425
4.5.7.2	Windkanalversuchstechnik .....	426
4.5.7.3	Flugschwingungsversuch .....	428
	Literatur .....	428
	Bildquellen .....	429
<b>4.6</b>	<b>Adaptive Strukturen .....</b>	<b>429</b>
4.6.1	Einführung und Übersicht .....	429
4.6.2	Adaptive Elastodynamik .....	430
4.6.2.1	Aktive Schwingungsdämpfung und Lastabminderung in Flugzeugstrukturen .....	430
4.6.2.2	Aktive Helikopterrotoren .....	431
4.6.2.3	Aktive Lärmreduktion in Flugzeugkabinen .....	431
4.6.3	Formvariable Tragflächen .....	431
4.6.4	Aktorik und Sensorik .....	432
4.6.4.1	Aktorik .....	433
4.6.4.2	Aktorpositionierung .....	433
4.6.4.3	Integration und Interaktion von Aktoren mit Strukturen .....	433
4.6.4.4	Sensoren und Messtechnik .....	434
4.6.5	Zur Modellbildung und Simulation .....	434
4.6.6	Strukturüberwachung und -monitoring .....	435
	Literatur .....	436
	Bildquellen .....	436
<b>4.7</b>	<b>Strukturversuche .....</b>	<b>437</b>
4.7.1	Einleitung .....	437
4.7.2	Testpyramide .....	438
4.7.3	Lastannahmen .....	438
4.7.4	Bestimmung von Schnittkraftverläufen und deren Diskretisierung .....	439
4.7.5	Lasteinleitung .....	440
4.7.6	Statischer Festigkeitsnachweis .....	441
4.7.7	Betriebsfestigkeitsnachweis .....	441
	Literatur .....	443
	Bildquellen .....	443

<b>5</b>	<b>Antriebe</b>	<b>445</b>
5.1	Propeller- und Turbopropantriebe	446
5.1.1	Grundlagen	446
5.1.1.1	Einleitung	446
5.1.1.2	Winkel am Propellerblatt, Fortschrittsgrad und darauf aufbauende Größen	447
5.1.1.3	Aerodynamische Kräfte am Propellerblatt und Propellerwirkungsgrad	449
5.1.2	Grundlagen zur Propellergeometrie	450
5.1.3	Propellercharakteristika und Schlupf	452
5.1.3.1	Propellerwirkung auf das Flugzeug	456
5.1.3.2	Asymmetrische Propellerbelastung (P-Effekt oder P-Faktor)	458
5.1.4	Einfache quantitative Propelleranalyse	459
5.1.5	Propellertheorie	464
5.1.5.1	Blattelementtheorie	464
5.1.5.2	Impulstheorie	469
5.1.6	Propellerauswahl und zugehöriges Leistungsverhalten	471
5.1.6.1	Leistungsverhalten eines Verstellpropeller bei konstanter Drehzahl	472
5.1.6.2	Leistungsverhalten eines Propellers mit festem Blattwinkel	473
5.1.6.3	Windmilling und Umkehrschub	474
5.1.7	Arten von Propellern	475
5.1.7.1	Festpropeller ( <i>Fixed-Pitch-Propeller</i> )	476
5.1.7.2	Einstellpropeller	476
5.1.7.3	Verstellpropeller ( <i>Variable-Pitch-Propeller</i> )	477
5.1.7.4	<i>Constant-Speed</i> -Propeller für Kolbenriebwerke	480
5.1.8	Turboprop-Propeller	483
5.1.8.1	Arbeitsdrehzahlen	483
5.1.8.2	Alpha- und Beta-Mode	483
5.1.8.3	Negative Torque	484
5.1.9	Synchronisieranlagen	485
5.1.9.1	<i>Synchronizer</i>	485
5.1.9.2	<i>Synchrophaser</i>	486
5.1.10	Propellerwuchtung und Propellerspur	486
5.1.10.1	Statische Wuchtung	486
5.1.10.2	Dynamische Wuchtung	487
5.1.10.3	Aerodynamische Wuchtung	489
5.1.10.4	Überprüfung der Propellerspur	489
5.1.11	Turboprop-Triebwerk	489
5.1.11.1	Optimale Düsenaustrittsgeschwindigkeit	490
5.1.11.2	Betrachtungen zum Turboprop-Kreisprozess	492
	Literatur	497
	Bildquellen	497
5.2	Strahltriebwerke	497
5.2.1	Aufbau und Wirkungsweise von Turbofan-Triebwerken	499
5.2.1.1	Hauptbauteile und Grundbegriffe	499
5.2.1.2	Fan und Nebenstromverhältnis	501
5.2.1.3	Wellenanzahl und Drehrichtung	502
5.2.1.4	Einlauf und Schubdüsen	504
5.2.1.5	Stand der Leistungsfähigkeit	505
5.2.1.6	Positionierung am Flugzeug	506
5.2.1.7	Gondel und Reverser	508
5.2.1.8	Wie viel Schub braucht ein Triebwerk?	513
5.2.2	Triebwerksschub	514
5.2.2.1	Schubgleichung	514



5.2.2.2	Schub und Schubdüse .....	516
5.2.2.3	Spezifischer Schub .....	518
5.2.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch .....	518
5.2.4	Wirkungsgrade.....	521
5.2.4.1	Thermischer Wirkungsgrad .....	521
5.2.4.2	Nutz-, Schub- und Verlustleistung und Vortriebs- und Gesamtwirkungsgrad.....	521
5.2.4.3	Zusammenhang zwischen spezifischem Schub, spezifischem Brennstoffverbrauch und thermischem Wirkungsgrad .....	523
5.2.5	Triebwerks-Kreisprozess.....	525
5.2.5.1	Synthesebasierte Kreisprozessberechnung.....	526
5.2.5.2	Parametrische Kreisprozessanalyse realer Turbofan-Triebwerke.....	545
5.2.5.3	Grenzen für das Nebenstrom- und das Fandruckverhältnis .....	549
5.2.6	Diffusoren und Düsen in Strahltriebwerken .....	550
5.2.6.1	Grundlegendes zu Diffusoren .....	551
5.2.6.2	Grundlegendes zu Düsen .....	552
5.2.6.3	Natürlicher und reduzierter Massenstrom.....	553
5.2.6.4	Subsonischer Triebwerkseinlauf.....	553
5.2.6.5	Rein konvergente Schubdüsen.....	560
	Literatur .....	563
	Bildquellen.....	563
5.3	Triebwerkssysteme .....	564
5.3.1	Hilfseinrichtungen und Hilfsgeräte .....	564
5.3.1.1	Zapfluft.....	564
5.3.1.2	Hilfsgeräteträger .....	566
5.3.1.3	Startermotor und Triebwerksstart .....	568
5.3.2	Elektronische Triebwerksregelung.....	572
5.3.2.1	Generelle Aufgaben und Eigenschaften von Triebwerksregelungen .....	572
5.3.2.2	Generelle Grundsätze für eine Triebwerksregelung.....	573
5.3.2.3	Komponenten eines Triebwerks-Regelungssystems .....	573
5.3.3	Triebwerk-Leistungssteuerung .....	584
5.3.3.1	Messung und Beurteilung der Triebwerksleistung im Flug .....	588
5.3.3.2	Maximal zulässige Abgastemperatur EGT .....	590
5.3.3.3	Triebwerksschonung im Alltagsbetrieb durch Flat-rated- und De-rated-Schub .....	590
5.3.3.4	FLX-Thrust und FLX-Temperature .....	591
5.3.4	Brennstoffsystem.....	592
5.3.4.1	Flugzeug-Brennstoffsystem .....	592
5.3.4.2	Triebwerks-Brennstoffsystem .....	596
5.3.5	Ölsystem.....	605
5.3.6	Wärmemanagementsystem .....	615
5.3.7	Internes Triebwerks-Luftsystem .....	617
5.3.7.1	Kühlung .....	618
5.3.7.2	Axialkraftausgleich.....	620
5.3.7.3	Aktive Spaltkontrolle .....	621
5.3.8	Verdichterluft-Regelsystem.....	624
5.3.8.1	Transiente Vorgänge.....	624
5.3.8.2	Verstellbare Verdichterleitschaufeln .....	627
5.3.8.3	Variable Abblaseventile am Niederdruckverdichter .....	628
5.3.8.4	Abblaseventile am Hochdruckverdichter .....	630
5.3.9	Triebwerksvereisungsschutz .....	632
5.3.9.1	Allgemeines zur Eisbildung und zur Enteisung .....	632
5.3.9.2	Vereisungsschutz für den Nasenkonus (Spinner) .....	633
5.3.9.3	Vereisungsschutz für die Gondel einlauf lippen.....	634
5.3.10	Gondelbelüftung und Schutz vor Überhitzung und Feuer.....	635

5.3.10.1	Kühlung und Belüftung .....	635
5.3.10.2	Prävention, Detektion und Löschung von Triebwerksfeuern .....	636
	Literatur .....	640
	Bildquellen .....	641
<b>6</b>	<b>Flugführung .....</b>	<b>643</b>
6.1	Koordinatensysteme .....	643
6.1.1	Flugmechanische Koordinatensysteme nach LN 9300 .....	644
6.1.1.1	Geodätisches Koordinatensystem .....	644
6.1.1.2	Flugzeugfestes Koordinatensystem .....	644
6.1.1.3	Bahnachsensystem .....	644
6.1.1.4	Aerodynamisches Koordinatensystem .....	645
6.1.1.5	Transformation zwischen den Koordinatensystemen .....	646
6.1.2	Erdbezogene Koordinatensysteme .....	647
6.1.2.1	ECEF-Koordinatensystem .....	647
6.1.2.2	Transformation von Polar- in kartesische Koordinaten .....	647
6.1.3	Beschreibung des Flugzustands .....	647
6.2	Flugzustandserfassung .....	648
6.2.1	Sensoren .....	648
6.2.1.1	Druckmessung .....	648
6.2.1.2	Statische Druckmessung .....	649
6.2.1.3	Barometrischer Höhenmesser .....	650
6.2.1.4	Totaldruckmessung .....	650
6.2.1.5	Windfahne .....	651
6.2.1.6	Beschleunigungssensor .....	652
6.2.1.7	Kreisel .....	652
6.2.2	Normatmosphäre .....	654
6.2.3	Fahrtmessung .....	655
6.2.4	Höhenmessung .....	656
6.2.5	Höhenänderung .....	658
6.2.6	Lageinstrumente .....	658
6.2.7	Navigationssysteme .....	659
6.2.7.1	Inertial Navigation System (INS) .....	659
6.2.7.2	VHF Omnidirectional Range (VOR) .....	662
6.2.7.3	Distance Measuring Equipment (DME) .....	664
6.2.7.4	Global Navigation Satellite System (GNSS) .....	665
6.2.7.5	Ephemeriden .....	665
6.2.7.6	Positionsbestimmung .....	667
6.2.7.7	Kopplung INS/GNSS .....	669
6.3	Systemarchitekturen .....	671
6.3.1	Systeme für Flächennavigationsverfahren .....	672
6.3.2	Bussysteme .....	674
6.3.2.1	Military Standard MIL-STD-1553 .....	674
6.3.2.2	Aeronautical Radio, Incorporated ARINC 429 .....	674
6.3.2.3	Aeronautical Radio, Incorporated ARINC 629 .....	675
6.3.2.4	Aeronautical Radio, Incorporated ARINC 664 .....	675
6.3.3	Integrated Modular Avionics .....	675
6.3.4	Flugmanagementsysteme .....	676
6.3.4.1	Auto Flight System (AFS) .....	676
6.3.4.2	Flight Management (FM) .....	677
6.3.4.3	Flight Guidance (FG) .....	679

6.3.4.4	Flight Envelope (FE)	679
6.4	Navigationsverfahren	681
6.5	Landesysteme	685
6.5.1	Anflüge	687
6.5.2	ILS	688
6.5.2.1	Erzeugung fester Standlinien (Leitlinien)	690
6.5.2.2	Marker	693
6.5.2.3	Bordgeräte	693
6.5.3	Satellitengestützte Landesysteme	694
6.5.3.1	GLS/GBAS	694
6.5.3.2	Berechnung der Winkelablagen	696
6.5.3.3	Fehlerberechnung	697
6.5.4	Politische und wirtschaftliche Aspekte	698
	Literatur	698
	Bildquellen	699
7	Flugzeugsysteme	701
7.1	Einführung	701
7.1.1	Einordnung der Flugzeugsysteme	701
7.1.2	Definitionen	702
7.1.3	Breakdown	703
7.1.4	Zulassung	705
7.1.5	Sicherheit und Zuverlässigkeit	705
7.1.6	Masse	710
7.1.7	Leistung	711
7.1.8	Kosten und Vergleichsstudien	712
7.2	Klimaanlagen	713
7.2.1	Grundlagen	713
7.2.1.1	Auswirkung von atmosphärischen Parametern	713
7.2.1.2	Belüftung	714
7.2.1.3	Temperaturregelung	714
7.2.1.4	Druckregelung	714
7.2.2	Heizsysteme	715
7.2.3	Kühlsysteme	715
7.2.4	Druckregelungssysteme	717
7.2.5	Beispiel: Airbus A321	717
7.3	Bordstromversorgung	719
7.3.1	Gliederung	719
7.3.2	Leistungserzeugung	719
7.3.3	Leistungsverteilung	720
7.3.4	Beispiel: Airbus A321	722
7.4	Ausrüstung	724
7.4.1	Ausstattungs-elemente	724
7.4.2	Kabinenauslegung	724
7.4.3	Passagiersitze	725
7.4.4	Notevakuierung	726
7.4.5	Beispiel: Airbus A321	727

<b>7.5</b>	<b>Feuerschutz</b>	<b>728</b>
7.5.1	Detektionsgrundlagen	728
7.5.2	Überhitzungsdetektion	728
7.5.3	Rauchdetektion	730
7.5.4	Grundlagen der Feuerlöschung	731
7.5.5	Triebwerks- und APU-Feuerlöschanlage	731
7.5.6	Feuerlöschanlage im Frachtraum	732
7.5.7	Löschmethoden in der Passagierkabine	732
7.5.8	Beispiel: Airbus A321	733
<b>7.6</b>	<b>Flugsteuerung</b>	<b>733</b>
7.6.1	Gliederung	733
7.6.1.1	Primäre und sekundäre Flugsteuerung	733
7.6.1.2	Reversible und irreversible Flugsteuerung	734
7.6.1.3	Funktionsprinzip und Energieversorgung	734
7.6.2	Steuern, Trimmen, Stabilität	735
7.6.3	Steuerflächen - primäre Flugsteuerung	736
7.6.3.1	Höhenruder	736
7.6.3.2	Querruder	737
7.6.3.3	Seitenruder	737
7.6.3.4	Trimmklappe, Hilfsklappe und Flettner-Klappe	738
7.6.4	Bedienorgane - primäre Flugsteuerung	739
7.6.5	Steuerflächen - sekundäre Flugsteuerung	740
7.6.5.1	Hochauftriebshilfen	740
7.6.5.2	Bremsklappen und Störklappen	744
7.6.6	Bedienorgane - sekundäre Flugsteuerung	745
7.6.7	Mechanische Signal- bzw. Kraftübertragungselemente	745
7.6.8	Elektrische Signalübertragung (Fly-by-Wire)	746
7.6.9	Aktuatoren	746
7.6.9.1	Hydraulische Aktuatoren mit mechanischer Ansteuerung	746
7.6.9.2	Integrated Actuator Package (IAP)	747
7.6.9.3	Fly-by-Wire Actuator	748
7.6.9.4	Electro-Hydrostatic Actuator (EHA)	748
7.6.9.5	Electro-Mechanical Actuator (EMA)	748
7.6.9.6	Redundanz der Ansteuerung	748
7.6.9.7	Ruderdrucksimulation	749
7.6.10	Beispiel: Airbus A321	749
<b>7.7</b>	<b>Kraftstoffsystem</b>	<b>751</b>
7.7.1	Allgemeines	751
7.7.2	Kraftstoffaufbewahrung	752
7.7.3	Kraftstoffförderanlage	753
7.7.4	Kraftstoff-Schnellablassanlage	755
7.7.5	Anzeigen von Kraftstoffparametern	756
7.7.6	Beispiel: Airbus A321	756
<b>7.8</b>	<b>Hydraulikversorgung</b>	<b>758</b>
7.8.1	Allgemeines	758
7.8.2	Wirkungsweise	758
7.8.3	Komponenten des Hydrauliksystems	759
7.8.4	Beispiel: Airbus A321	761
<b>7.9</b>	<b>Eis- und Regenschutz</b>	<b>762</b>
7.9.1	Gliederung	762

7.9.2	Grundlagen der Vereisung .....	763
7.9.3	Pneumatisch-mechanische Systeme .....	766
7.9.4	Heißluftsysteme .....	767
7.9.5	Elektrische Widerstandssysteme .....	767
7.9.6	Flüssigkeitssysteme .....	768
7.9.7	Eis- und Beschlagschutz bei Cockpitscheiben .....	768
7.9.8	Cockpitscheiben-Regenschutzanlagen .....	769
7.9.9	Eiserkennung und Eiswarnung .....	769
7.9.10	Beispiel: Airbus A321 .....	769
7.10	Fahrwerk .....	771
7.10.1	Allgemeines .....	771
7.10.2	Fahrwerkstypen .....	771
7.10.3	Anforderungen .....	773
7.10.4	Baugruppen und Komponenten .....	774
7.10.4.1	Bugfahrwerk .....	774
7.10.4.2	Hauptfahrwerk .....	774
7.10.4.3	Stoßdämpfer .....	776
7.10.4.4	Reifen, Räder und Bremsen .....	776
7.10.5	Fahrwerkssysteme .....	780
7.10.5.1	Betätigungssystem .....	780
7.10.5.2	Lenksystem .....	781
7.10.5.3	Bremssystem .....	782
7.10.5.4	Fahrwerksüberwachungs- und Warnanlage .....	784
7.10.6	Beispiel: Airbus A321 .....	785
7.10.6.1	Allgemein .....	785
7.10.6.2	Hauptfahrwerk .....	786
7.10.6.3	Bugfahrwerk .....	786
7.10.6.4	Betätigungssystem .....	786
7.10.6.5	Lenksystem .....	787
7.10.6.6	Bremssystem .....	787
7.11	Beleuchtung .....	788
7.11.1	Einleitung .....	788
7.11.2	Beispiel: Airbus A321 .....	788
7.12	Sauerstoffanlage .....	790
7.12.1	Der menschliche Sauerstoffbedarf .....	790
7.12.2	Gliederung .....	790
7.12.3	Atemregler .....	791
7.12.4	Masken .....	792
7.12.5	Sauerstoffquellen .....	792
7.12.6	Beispiel: Airbus A321 .....	794
7.13	Pneumatikversorgung .....	795
7.13.1	Pneumatische Hochdruckanlagen .....	795
7.13.2	Pneumatische Niederdruckanlagen .....	795
7.13.3	Beispiel: Airbus A321 .....	797
7.14	Wasser-/Abwasseranlage .....	798
7.14.1	Einteilung .....	798
7.14.2	Trinkwasseranlage .....	798
7.14.3	Abwasseranlage .....	799
7.14.4	Toilettenanlage .....	799

---

7.14.5 Beispiel: Airbus A321.....	799
7.15 Hilfstriebwerk .....	800
7.15.1 Grundlagen .....	800
7.15.2 Beispiel: Airbus A321.....	802
Literatur .....	802
Danksagung .....	805
Bildquellen.....	805
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>807</b>