

Inhaltsverzeichnis

Teil I

1 Einführung	3
1.1 Physikalisches Prinzip des Strahltriebs	3
1.2 Strahltriebwerke sind Wärmekraftmaschinen	8
1.3 Geschichtlicher Werdegang des Strahltriebs	8
1.3.1 Frühe Projekte	8
1.3.2 Sir Frank Whittle	13
1.3.3 Prof. Dr. Hans-Joachim Pabst von Ohain	16
1.3.4 Weitere wesentliche Entwicklungen des Strahltriebwerkbaus nach dem Zweiten Weltkrieg, aufbauend auf deutschem Knowhow . . .	18
1.3.5 Die ersten Schritte der Strahltriebwerksentwicklung in den USA .	21
1.4 Technische Methoden des Strahltriebs	21
1.5 Einteilung der Flugantriebe	28
1.6 Der Strahltrieb als bevorzugter Flugzeugantrieb	31
1.7 Welches Triebwerk bei welcher Geschwindigkeit?	34
1.8 Aufbau und Wirkungsweise von Turbofantriebwerken	35
1.8.1 Hauptteile und Grundbegriffe	36
1.8.2 Fan und Nebenstromverhältnis	37
1.8.3 Wellenzahl und Drehrichtung von Turbofantriebwerken	40
1.8.4 Einlauf und Schubdüsen ziviler Turbofans	41
1.8.5 Stand der Leistungsfähigkeit heutiger ziviler Turbofantriebwerke	44
1.8.6 Positionierung der Triebwerke am Flugzeug	46
1.8.7 Gondel und Schubumkehrer (<i>Reverser</i>)	50
Literatur	56
2 Klassifizierung der Flugzeugtriebwerke	57
2.1 Turbostrahltriebwerke	60
2.1.1 Einstromtriebwerke	60
2.1.2 Zweistromtriebwerke	67
2.1.3 Turbo-Strahltriebwerke mit Nachbrenner	88

2.2	Wellenleistungstriebwerke	92
2.2.1	Hilfstriebwerke	93
2.2.2	Propellerturbinentriebwerke	98
2.2.3	Hubschraubertriebwerke	102
2.3	Zusammenfassung	105
	Literatur	107
3	Was man weiß – was man wissen sollte	109
3.1	Energie, Arbeit und Wirkungsgrad	109
3.2	Warum saugt ein Triebwerk überhaupt Luft an?	112
3.3	Thermodynamischer Arbeitsprozess	115
3.4	Statischer Druck und Totaldruck	119
3.5	Temperatur und Wärme	122
3.6	Statische Temperatur und Totaltemperatur	124
3.7	Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz	129
3.8	Strömungsgrenzschichten	131
3.8.1	Der Begriff der Grenzschicht	131
3.8.2	Laminare und turbulente Grenzschichten	133
3.8.3	Strömungsablösungen von Grenzschichten	135
3.9	Widerstand umströmter Körper	137
3.10	Auftrieb umströmter Körper	141
3.11	Kompressible Gasströmungen	146
3.12	Düsen und Diffusoren	150
3.13	Wie und wo entsteht der Schub?	154
3.14	Änderungen von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur innerhalb eines Triebwerks	158
3.15	Wie viel Schub braucht ein Triebwerk?	162
3.16	Fluggeschwindigkeit, Knoten und Machzahl	164
3.17	Schub, Leistung und äquivalente Leistung	165
3.18	Grundsätzliches zum Vortrieb von Flugzeugen	167
	Literatur	169
4	Hauptkomponentenbeschreibung und zugehörige Technologien	171
4.1	Triebwerkseinlauf	171
4.1.1	Subsonischer Einlauf	172
4.1.2	Supersonischer Einlauf	174
4.1.3	Turbopropenlauf	177
4.1.4	Sonderformen von Triebwerkseinläufen	178
4.2	Verdichter	181
4.2.1	Fan-Sektion bei Turbofantriebwerken	181
4.2.2	Radialverdichter	185
4.2.3	Axialverdichter	189

4.2.4	Abblasen und Entnahme von Verdichterluft	197
4.2.5	Hilfsgeräteeantriebe	200
4.2.6	Der Axialverdichter als bevorzugter Verdichter für Strahltriebwerke mit höherem Luftmassendurchsatz	204
4.3	Brennkammer	206
4.3.1	Arten von Brennkammern	208
4.3.2	Hauptkomponenten einer Brennkammer	210
4.3.3	Luftverteilung in einer Brennkammer	214
4.3.4	Abgasemission aus der Brennkammer	216
4.4	Turbine	217
4.4.1	Turbinenbeschaukelung	220
4.4.2	Mehrwellenturbinen	225
4.4.3	Besondere Anforderungen an Turbinenbeschaukelungen	229
4.5	Schubverstärkung	240
4.5.1	Wassereinspritzung	240
4.5.2	Nachverbrennung	247
4.5.3	Arbeits- und Wirkungsweise von Nachbrennern	249
4.6	Schubdüse	255
4.6.1	Konvergente Schubdüsen	257
4.6.2	Mischer	259
4.6.3	Chevron-Düsen	261
4.6.4	Konvergent-divergente Schubdüsen	263
4.6.5	Schubvektorsteuerung	267
4.7	Schubumkehrer	275
4.8	Zukünftige Technologien	283
4.8.1	Werkstoffe	285
4.8.2	Getriebefan und schnelllaufende Niederdruckturbine	289
4.8.3	Numerische Rechenverfahren	291
4.8.4	Hochdruckverdichter mit aktiver Pumpfrüherkennung	294
4.8.5	Rekuperative Triebwerke	295
4.8.6	Das „mehr-elektrische“ Triebwerk (More-Electric Engine)	299
4.8.7	ACARE und Clean Sky	301
	Literatur	302
5	Triebwerksschub	305
5.1	Impulssatz	305
5.2	Allgemeine Schubgleichungen	307
5.2.1	Allgemeine Schubgleichung für Turbojettriebwerke	307
5.2.2	Herleitung der Schubgleichung für „Dummies“	316
5.2.3	Ergänzendes zu Strömungen aus konvergenten Schubdüsen	320
5.2.4	Simplifizierte Form des Impulssatzes	323
5.2.5	Die Schubdüse liefert „negativen“ Schub	330

5.2.6	Allgemeine Schubgleichung für Turbofantriebwerke	331
5.2.7	Allgemeine Schubgleichung für Triebwerke mit Schubvektorumlenkung	334
5.3	Äußere Einflüsse auf den Triebwerksschub	343
5.3.1	Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und Massenstrom ..	343
5.3.2	Atmosphärische Umgebung und konstanter Reiseflug	346
5.3.3	Geschwindigkeitseffekt und Staueffekt	347
5.4	Triebwerksleistungsstufen	354
5.4.1	Messung und Beurteilung der Triebwerksleistung im Flug	355
5.4.2	FADEC – Triebwerksleistungsregelung	358
5.4.3	ACUTE – Die A380 Schubanzeige	360
5.4.4	Typische Leistungsstufen ziviler Triebwerke	362
5.4.5	Typische Leistungsstufen militärischer Triebwerke	366
5.4.6	Maximal zulässige Abgastemperatur und EGT-Margin	367
5.4.7	Reduzierter Schub	369
	Literatur	379
6	Definitionen und Aero-Thermodynamische Grundlagen	381
6.1	Bezeichnungen und Bezugsebenen	381
6.2	Spezifischer Schub	384
6.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	387
6.4	Einheitsmasse, Stirnflächenschub und Schubverhältnis	389
6.5	Charakteristische Kenngrößen am Beispiel ausgeführter Turbojet- und Turbofantriebwerke	390
6.6	Wellenvergleichsleistung von Turboproptriebwerken	395
6.6.1	Wellenvergleichsleistung im Flugfall	397
6.6.2	Wellenvergleichsleistung im Startfall	398
6.7	Spezifischer Brennstoffverbrauch und Einheitsmasse bei Wellenleistungstriebwerken	398
6.8	Der Joule-Prozess als Gasturbinen-Vergleichsprozess	401
6.8.1	Das Einstrom- oder Turbojettriebwerk	401
6.8.2	Das Zweistrom- oder Turbofantriebwerk	413
6.9	Nutz-, Schub- und Verlustleistung	420
6.10	Thermischer Wirkungsgrad	424
6.11	Arbeitsverhältnis	428
6.12	Vortriebswirkungsgrad	430
6.13	Gesamtwirkungsgrad	434
6.14	Beispielrechnungen	435
6.15	Einige wissenschaftliche Zusammenhänge und Anmerkungen	448
6.15.1	Zusammenhang zwischen spezifischem Schub, spezifischem Brennstoffverbrauch und thermischem Wirkungsgrad	448
6.15.2	Reichweite und Gesamtmassenaufwand	452

6.16	Vorentwurf einfacher Turbo-Strahltriebwerke	460
6.16.1	Triviales Syntheseverfahren zur Vorauslegung eines einwelligen Turbojettriebwerks mit konvergenter Schubdüse	462
6.16.2	Triviale Syntheseverfahren zur Vorauslegung eines zweiwelligen Turbofantriebwerks mit zwei separaten konvergenten Schubdüsen	472
	Literatur	486
7	Parametrische Kreisprozessanalyse idealer Flugzeugtriebwerke	487
7.1	Turbojet ohne Nachbrenner	488
7.1.1	Spezifischer Schub	488
7.1.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	492
7.1.3	Thermischer Wirkungsgrad	493
7.1.4	Vortriebswirkungsgrad	495
7.2	Ramjet	497
7.3	Ergebnisdarstellung für Turbo- und Ramjet	500
7.3.1	Optimales Verdichterdruckverhältnis und maximaler spezifischer Schub	514
7.4	Turbojet mit Nachbrenner	520
7.4.1	Spezifischer Schub	522
7.4.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	523
7.4.3	Thermischer Wirkungsgrad	525
7.4.4	Vortriebswirkungsgrad	526
7.4.5	Vergleich zwischen Turbojet mit und ohne Nachbrenner bei optimalem Verdichterdruckverhältnis	527
7.5	Turbofan mit separaten Schubdüsen	531
7.5.1	Leistungsgleichgewichte und Kreisprozess	534
7.5.2	Spezifischer Schub	537
7.5.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	545
7.5.4	Schubverhältnis	548
7.5.5	Thermischer Wirkungsgrad und Vortriebswirkungsgrad	551
7.5.6	Optimales Bypassverhältnis und optimales Fandruckverhältnis	559
7.6	Turbofan mit Strahlmischung	576
7.6.1	Kreisprozess, Eigenschaften und Voraussetzungen	576
7.6.2	Spezifischer Schub	582
7.6.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	583
7.6.4	Vortriebswirkungsgrad und thermischer Wirkungsgrad	584
7.6.5	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung	584
7.7	Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	590
7.7.1	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	594

7.8	Turboprop	599
7.8.1	Grundlagen der Schubzeugung durch einen Propeller (Rankinesche Strahltheorie)	602
7.8.2	Leistungskoeffizienten	606
7.8.3	Bezugsebenen und Kreisprozess	608
7.8.4	Spezifische Arbeit und spezifischer Schub	610
7.8.5	Spezifischer Brennstoffverbrauch	612
7.8.6	Vortriebswirkungsgrad, thermischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad	613
7.8.7	Optimales Turbinentemperaturverhältnis	613
7.8.8	Ergebnisdarstellung zum Turboprop	615
7.9	Turboshaft	621
7.10	Turboshaft mit Rekuperator	624
7.10.1	Grundlegendes zu Rekuperatoren und Regeneratoren	628
7.10.2	Maximal mögliches Verdichterdruckverhältnis	630
7.10.3	Spezifische Arbeit und spezifischer Brennstoffverbrauch	631
7.10.4	Thermischer Wirkungsgrad	634
7.10.5	Ergebnisdarstellung zum Turboshaft mit und ohne Rekuperator	635
7.11	Rekuperativer Turbofan mit Zwischenkühlung	642
7.11.1	Zwischenkühlung und Positionierung des Zwischenkühlers ...	645
7.11.2	Bezugsebenen, Kreisprozess und Erwärmung des Sekundärstroms	649
7.11.3	Turbinentemperaturverhältnis	654
7.11.4	Maximal mögliches Verdichterdruckverhältnis	656
7.11.5	Spezifischer Schub	657
7.11.6	Spezifischer Brennstoffverbrauch	663
7.11.7	Thermischer Wirkungsgrad, Vortriebs- und Gesamtwirkungsgrad	668
	Literatur	679
8	Thermische Turbomaschinen	681
8.1	Grundlagen und Begriffe	681
8.1.1	Gitterströmungen	683
8.1.2	Energieumsetzung in einem Laufrad	689
8.1.3	Vorzeichenvereinbarungen	691
8.1.4	Momentenbetrachtung an einem Rotor	695
8.1.5	Eulersche Hauptgleichung der Turbomaschinen	698
8.1.6	Absolute und relative Strömungen	701
8.1.7	Geschwindigkeitsdreiecke	704
8.1.8	Diskussion der Eulerschen Hauptgleichung	710
8.2	Axialmaschinen	719
8.2.1	Verdichter- und Turbinenstufen	721
8.2.2	Typische Formen der Beschauelung	728

8.2.3	Grenzen der Arbeitsumsetzung in einer Stufe	732
8.2.4	Stufenkenngrößen	757
8.2.5	Normalstufen mit unterschiedlichen Reaktionsgraden	779
8.2.6	Parameteranalyse für eine einfache Axialverdichterstufe	791
8.2.7	Parameteranalyse für eine einfache Axialturbinenstufe	802
8.3	Radialmaschinen	815
8.3.1	Radialverdichterstufen	817
8.3.2	Basisauslegung von Radialverdichterimpellern	843
8.3.3	Zulässiges Verzögerungsverhältnis in Radialverdichtern	853
8.3.4	Radialturbinenstufen	858
8.4	Dreidimensionale Strömungen	880
8.4.1	Einfaches Radiales Gleichgewicht	882
8.4.2	Stromlinienkrümmungsverfahren	892
8.5	Verluste in thermischen Turbomaschinen	919
8.5.1	Mechanische Verluste und Massenverluste	920
8.5.2	Strömungsverluste	920
	Literatur	935

Teil II

9	Triebwerkseinlauf	941
9.1	Subsonischer Einlauf	943
9.1.1	Basiseigenschaften und Zusammenhänge mit der Fanrotorströmung	943
9.1.2	Zulauf- und Gondelwiderstand	947
9.1.3	Externe Einlaufverluste	959
9.1.4	Interne Einlaufverluste	962
9.1.5	Notwendige Kompromisse bei der Einlaufgestaltung	966
9.1.6	Berechnung einer einfachen Basisgeometrie	967
9.1.7	Aspekte zur dreidimensionalen und zur überkritischen Auslegung	980
9.2	Supersonischer Einlauf	991
9.2.1	Interne Kompression	992
9.2.2	Externe Kompression	998
9.2.3	Einläufe variabler Geometrie	1008
9.2.4	Festlegung der Basisgeometrie	1012
	Literatur	1016
10	Verdichter	1017
10.1	Einleitung	1017
10.2	Verdichterwirkungsgrade	1021
10.2.1	Isentroper Verdichterwirkungsgrad	1021
10.2.2	Isentroper Verdichterstufenwirkungsgrad	1022
10.2.3	Polytroper Verdichterwirkungsgrad	1027

10.3	Auslegungsgesichtspunkte für Axialverdichter	1033
10.3.1	Grundlegendes zur Entwicklung von Triebwerksverdichtern	1033
10.3.2	Hauptabmessungen und Drehzahl (Vorauslegung)	1034
10.3.3	Anzahl der Stufen	1037
10.3.4	Weitere Stufeneigenschaften	1043
10.3.5	Räumliche Schaufelgestaltung	1054
10.3.6	Profil-, Gitter- und Schaufelgeometrie	1067
10.4	Verdichterkennfeld	1100
10.4.1	Drossel- oder Drehzahlkurven	1102
10.4.2	Reduzierte Kennfeldgrößen	1104
10.4.3	Grundlegender Aufbau des Verdichterkennfeldes	1107
10.5	Instabile Verdichtierzustände	1113
10.5.1	Drehzahlabhängiges Verdichterverhalten	1113
10.5.2	Rotierende Ablösung	1118
10.5.3	Verdichterpumpen	1120
10.5.4	Schauflerflattern	1123
10.5.5	Stabilisierende Maßnahmen	1124
10.6	Fortschrittliche Verfahren der Axialverdichtergestaltung	1133
10.6.1	Über die Stufen- und Schaufelanzahl	1133
10.6.2	Einige aerodynamische Aspekte	1137
10.6.3	Einige mechanische Aspekte	1143
	Literatur	1145
11	Brennkammer	1147
11.1	Einleitung	1147
11.2	Eigenschaften von Flugzeugbrennstoffen	1150
11.2.1	Dampfdruck	1151
11.2.2	Flammpunkt	1152
11.2.3	Flüchtigkeit, Siedegrenzen und Gefrierpunkt	1154
11.2.4	Schwefel-, Gum- und Wassergehalt	1155
11.3	Basiseigenschaften von Brennkammern	1156
11.3.1	Physikalische Bedeutung der Brennkammerkomponenten	1157
11.3.2	Wandkühlung	1168
11.4	Brennstoffdüsen und Zündung	1175
11.4.1	Druckzerstäubung	1176
11.4.2	Luftstrahlzerstäubung	1178
11.4.3	Verdampfer	1181
11.4.4	Zündung	1182
11.5	Schadstoffemissionen	1185
11.5.1	Umwelt und Luftfahrtantriebe	1186
11.5.2	ICAO Regularien	1192
11.5.3	Schadstoffreduzierung in konventionellen Brennkammern	1197

11.5.4	Schadstoffreduzierung durch Steuerung der Primärzonentemperatur	1199
11.5.5	Schadstoffreduzierung durch Fett-Mager-Stufung	1203
11.6	Charakteristische Kenngrößen	1204
11.6.1	Brennstoff-Luft-Verhältnis und Luftüberschusszahl	1204
11.6.2	Flammrohrhöhe, Flammrohrlänge und Injektorteilung	1209
11.6.3	Referenzstaudruck sowie Referenz-, Ringraum- und Primärzonengeschwindigkeit	1209
11.6.4	Brennkammerdruckverluste	1211
	Literatur	1233
12	Turbine	1235
12.1	Einleitung	1235
12.1.1	Zum aktuellen Stand konventioneller Turbinentechnologie ..	1235
12.1.2	Clocking-Effekt	1237
12.1.3	Schnelllaufende Niederdruckturbine	1238
12.2	Turbinenwirkungsgrade	1241
12.2.1	Isentroper Turbinenwirkungsgrad	1242
12.2.2	Isentroper Turbinenstufenwirkungsgrad	1242
12.2.3	Polytroper Turbinenwirkungsgrad	1246
12.3	Auslegungsgesichtspunkte für Axialturbinen	1249
12.3.1	Transsonische Turbinenbeschaufelungen	1249
12.3.2	Anzahl der Stufen	1253
12.3.3	Schaufelhöhenverhältnis und Schaufelanzahl	1256
12.3.4	Turbinenaustrittsgrößen	1259
12.3.5	Gegenläufige Turbinen	1265
12.4	Turbinenkennfeld	1268
12.4.1	Reduzierte Kennfeldgrößen	1268
12.4.2	Grundlegender Aufbau des Turbinenkennfeldes	1272
12.4.3	Smith-Korrelation für isentrope Turbinenwirkungsgrade	1280
12.5	Turbinenmaterialien	1281
12.5.1	Turbineneintrittstemperatur	1281
12.5.2	Hochwarmfeste Legierungen	1285
12.6	Turbinenkühlung	1305
12.6.1	Methoden der Turbinenkühlung	1306
12.6.2	Abschätzung der erforderlichen Kühlluftmenge	1316
12.7	Festigkeit von Rotorschaufeln	1320
	Literatur	1323
13	Schubdüse	1325
13.1	Eigenschaften und Aufgaben	1325
13.2	Rückwirkung der Schubdüse auf die Triebwerksleistung	1334

13.3	Konvergente Schubdüsen	1340
13.3.1	Unterkritisch durchströmte konvergente Schubdüse	1340
13.3.2	Kritisch und überkritisch durchströmte Schubdüse	1344
	Literatur	1347
14	Berechnung realer Triebwerke	1349
14.1	Einleitende Bemerkungen zur Vorgehensweise	1349
14.2	Rein thermodynamische Betrachtung realer Turbojetkreisprozesse ...	1351
14.2.1	Allgemein Einleitendes zum realen Turbojetkreisprozess	1352
14.2.2	Polytrope Expansions- und Kompressionsarbeit und Bruttoarbeit	1353
14.2.3	Kompressions- und Expansionswirkungsgrad und Nutzarbeit	1358
14.2.4	Der Einfluss der aero-thermodynamischen Parameter auf den realen Kreisprozess	1362
14.3	Einfaches Syntheseverfahren zur Vorauslegung realer zweiwelliger Turbofantriebwerke mit separaten konvergenten Schubdüsen	1389
14.4	Komplexeres synthesebasiertes Berechnungsverfahren zur Vorauslegung für Turbojet- und Turbofantriebwerke	1407
14.4.1	Syntheseverfahren für ein einwelliges Turbojettriebwerk mit konvergenter Schubdüse	1409
14.4.2	Eine kurze Parameterstudie für ein reales Turbojettriebwerk .	1445
14.4.3	Syntheseverfahren für ein zweiwelliges Turbofantriebwerk ...	1447
14.4.4	Parameterstudie für ein reales Turbofantriebwerk	1468
	Literatur	1484
15	Triebwerkslärm	1485
15.1	Akustische Grundlagen zum Triebwerkslärm	1485
15.1.1	Übergreifende Grundbegriffe	1485
15.1.2	A-Bewertung des Schalldruckpegels	1488
15.1.3	Empfundener Schallpegel und Lästigkeit	1490
15.1.4	Tonkorrektur	1491
15.1.5	Effektiver empfundener Schallpegel	1493
15.2	Lärmregularien	1494
15.3	Schallquellen	1498
15.3.1	Strahlärm	1502
15.3.2	Fan- und Verdichterlärm	1513
15.3.3	Turbinenlärm	1528
15.3.4	Subalterne Schallquellen	1531
15.4	Schallreduzierende Maßnahmen	1534
15.4.1	Lärmbeeinflussungen konstruktiver Art an Fan und Verdichter	1534
15.4.2	Akustische Triebwerksauskleidungen	1542
15.4.3	Aktive Lärminderung durch Gegenschall	1547
	Literatur	1550

16	Triebwerkssysteme	1553
16.1	Hilfseinrichtungen und Hilfsgeräte	1553
16.1.1	Zapfluft	1553
16.1.2	Hilfsgeräteträger	1557
16.1.3	Startermotor und Triebwerksstart	1560
16.2	Elektronische Triebwerksregelung	1566
16.2.1	Generelle Aufgaben und Eigenschaften von Triebwerksregelungen	1567
16.2.2	Generelle Regelgrundsätze für eine Triebwerksregelung	1568
16.2.3	Komponenten eines Triebwerksregelungssystems	1570
16.3	Triebwerkleistungssteuerung	1587
16.3.1	Messung und Beurteilung der Triebwerkleistung im Flug	1594
16.3.2	Maximal zulässige Abgastemperatur EGT	1597
16.3.3	Triebwerksschonung im Alltagsbetrieb durch den so genannten <i>Flat-Rated</i> und <i>De-Rated</i> Schub	1598
16.3.4	FLX-Thrust und FLX-Temperature	1601
16.4	Brennstoffsystem bzw. Kraftstoffsystem	1603
16.4.1	Flugzeughilfsbrennstoffsystem	1604
16.4.2	Triebwerksbrennstoffsystem	1610
16.5	Ölsystem	1624
16.6	Wärmemanagementsystem	1639
16.7	Internes Triebwerksluftsystem	1644
16.7.1	Kühlung	1645
16.7.2	Axialkraftausgleich	1648
16.7.3	Aktive Spaltkontrolle	1650
16.8	Verdichterluftregelsystem	1656
16.8.1	Transiente Vorgänge	1656
16.8.2	Verstellbare Verdichterleitschaufeln	1662
16.8.3	Variable Abblaseventile am Niederdruckverdichter	1664
16.8.4	Abblaseventile am Hochdruckverdichter	1666
16.9	Triebwerksvereisungsschutz	1669
16.9.1	Allgemeines zur Eisbildung und zur Enteisung	1669
16.9.2	Vereisungsschutz für den Nasenkonus oder Spinner	1672
16.9.3	Vereisungsschutz für die Gondel einlaufflappen	1673
16.10	Gondelbelüftung und Schutz vor Überhitzung und Feuer	1674
16.10.1	Kühlung und Belüftung	1674
16.10.2	Prävention, Detektion und Löschung von Triebwerksfeuern	1676
	Literatur	1684
17	Propeller und Propellersysteme	1685
17.1	Grundlagen	1685
17.1.1	Einleitung	1685

17.1.2	Winkel am Propellerblatt, Fortschrittsgrad und darauf aufbauende Größen	1687
17.1.3	Aerodynamische Kräfte am Propellerblatt und Propellerwirkungsgrad	1691
17.2	Grundlagen zur Propellergeometrie	1693
17.3	Propellercharakteristika und Schlupf	1698
17.3.1	Propellerwirkung auf das Flugzeug	1706
17.4	Eine einfache quantitative Propelleranalyse	1710
17.4.1	Ein weiterer Typ von Propellerdiagramm	1719
17.5	Propellertheorie	1721
17.5.1	Blattelementtheorie	1721
17.5.2	Impulstheorie	1730
17.6	Propellerauswahl und zugehöriges Leistungsverhalten	1735
17.6.1	Leistungsverhalten eines Verstellpropellers bei konstanter Drehzahl	1736
17.6.2	Leistungsverhalten eines Propellers mit festem Blattwinkel	1737
17.6.3	Windmilling und Umkehrschub	1739
17.7	Arten von Propellern	1742
17.7.1	Festpropeller (<i>Fixed-Pitch-Propeller</i>)	1743
17.7.2	Einstellpropeller	1744
17.7.3	Verstellpropeller (<i>Variable-Pitch-Propeller</i>)	1745
17.7.4	Constant-Speed-Propeller für Kolbentriebwerke	1751
17.8	Turbopropeller	1755
17.8.1	Arbeitsdrehzahlen	1755
17.8.2	Alpha- und Beta-Mode	1755
17.8.3	Negative Torque	1759
17.9	Synchronisieranlagen	1760
17.9.1	Synchronizer	1760
17.9.2	Synchrophaser	1761
17.10	Propellerwuchtung und Propellerspur	1762
17.10.1	Statische Wuchtung	1762
17.10.2	Dynamische Wuchtung	1763
17.10.3	Aerodynamische Wuchtung	1765
17.10.4	Überprüfung der Propellerspur	1766
17.11	Das Turboproptriebwerk	1767
17.11.1	Optimale Düsenaustrittsgeschwindigkeit	1769
17.11.2	Betrachtungen zum Turbopropkreisprozess	1773
	Literatur	1782
18	Anhang	1785
18.1	Thermodynamik thermischer Turbomaschinen sowie idealer und realer Arbeitsfluide	1785
18.1.1	Thermodynamik thermischer Turbomaschinen	1785

18.1.2	Gibbssche Hauptgleichung bei Turbomaschinen	1789
18.1.3	Wirkliche und polytrope Zustandsänderungen	1793
18.1.4	Grundlegende Definitionen von Wirkungsgraden	1796
18.1.5	Vergleich zwischen polytropen und isentropen Wirkungsgraden	1801
18.1.6	Erhitzungsfaktor	1807
18.2	Thermodynamik idealer und realer Arbeitsfluide	1812
18.2.1	Zustandsgrößen, Zustandsgleichungen und Zustandsänderungen	1812
18.2.2	Ideale Gase und ideale Gasgemische	1818
18.2.3	Berechnung isentroper und polytroper Zustandsänderungen .	1826
18.2.4	Mittelwertbildung der spezifischen Wärmekapazitäten	1831
18.2.5	Zusammenhang zwischen isentropen und polytropen Wirkungsgraden	1839
18.2.6	Reale Arbeitsfluide	1840
18.2.7	Einige Eigenschaften heißer Verbrennungsgase	1847
18.3	Einige Grundlagen rechtsläufiger Kreisprozesse	1850
18.3.1	Carnotprozess und Carnotfaktor	1854
18.3.2	Thermodynamische Mitteltemperatur	1857
18.4	Kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase	1860
18.4.1	Schallgeschwindigkeit	1860
18.5	Kompressibilität	1864
18.5.1	Dichteänderung	1864
18.5.2	Machzahl	1866
18.5.3	Temperaturerhöhung	1870
18.6	Machsche Linie, Verdichtungsstoß und Expansionswelle	1872
18.6.1	Schräge Verdichtungsstöße	1878
18.7	Kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase	1881
18.7.1	Thermische und kalorische Zustandsgleichung	1881
18.7.2	Alternative Formen der Energiegleichung	1883
18.8	Stetig verlaufende isentrope Strömungen	1885
18.8.1	Eulersche Bewegungsgleichung und Bernoulligleichung	1885
18.8.2	Kontinuitätsgleichung	1888
18.8.3	Stromdichte	1890
18.8.4	Ausfluss aus einem Kessel	1892
18.8.5	Kritische Werte	1894
18.8.6	Kritische Machzahl	1896
18.8.7	Massenstromparameter	1897
18.9	Impulssatz für stationäre Strömungen	1903
18.9.1	Impuls	1903
18.9.2	Masse	1904
18.9.3	Zweites Newtonsches Axiom	1904

18.9.4	Substanzielle Änderung von Strömungsgrößen	1905
18.9.5	Allgemeiner Impulssatz der Mechanik	1909
18.9.6	Schwerpunktsatz der Mechanik	1910
18.9.7	Differenzialquotient nach Leibniz	1912
18.9.8	Reihenentwicklung nach Taylor	1912
18.9.9	Äußere Kräfte	1915
18.9.10	Gewichtskraft	1915
18.9.11	Druckkräfte an den freien Flächen	1916
18.9.12	Stütz- oder Haltekräfte	1917
18.9.13	Wahl der Kontrollfläche	1918
18.10	Umrechnungsfaktoren zwischen physikalischen Dimensionen aus dem englisch/amerikanischen und dem deutschen Sprachbereich ...	1926
18.10.1	Abkürzungen bei den englisch-amerikanischen Einheiten .	1926
18.10.2	Abkürzungen bei den deutschen Einheiten	1926
18.10.3	Umrechnungsfaktoren	1926
18.11	Daten ausgeführter Flugtriebwerke	1929
18.11.1	Anmerkungen zur Bezeichnung von Triebwerken	1948
18.12	Bestimmung der thermodynamischen Eigenschaften von Verbrennungsgasen	1951
18.12.1	Reaktionsstöchiometrie	1951
18.12.2	Spezifische Wärmekapazität	1953
18.12.3	Molmasse und spezifische Gaskonstante	1954
18.12.4	Enthalpieänderung	1956
18.12.5	Entropiefunktion	1957
18.12.6	Der FORTRAN 2003 Quellcode	1960
18.13	Aero-Thermodynamik einer stationären, adiabaten Strömung mit Reibung in einem Ringraum konstanten Querschnitts	1964
18.13.1	Die Ausgangs- und Randbedingungen	1964
18.13.2	Das Zusammenführen der Gleichungen	1968
18.13.3	Die Integration	1970
	Literatur	1973
	Literatur	1975
	Sachverzeichnis	1979