

## Flugzeugtriebwerke

Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme

Bearbeitet von  
Willy J.G. Bräunling

4. Auflage 2015. Buch. XLIV, 1979 S. Hardcover

ISBN 978 3 642 34538 8

Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Maschinenbau Allgemein > Triebwerkstechnik, Energieübertragung](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I

<b>1 Einführung</b> .....	3
1.1 Physikalisches Prinzip des Strahlantriebs .....	3
1.2 Strahltriebwerke sind Wärmekraftmaschinen .....	8
1.3 Geschichtlicher Werdegang des Strahlantriebs .....	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 Strahlantriebs .....	21
1.5 Einteilung der Flugantriebe .....	28
1.6 Der Strahlantrieb 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
<b>2 Klassifizierung der Flugzeugtriebwerke</b> .....	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	Propellerturbinentreibwerke .....	98
2.2.3	Hub schraubertriebwerke .....	102
2.3	Zusammenfassung .....	105
	Literatur .....	107
<b>3</b>	<b>Was man weiß – was man wissen sollte .....</b>	<b>109</b>
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
<b>4</b>	<b>Hauptkomponentenbeschreibung und zugehörige Technologien .....</b>	<b>171</b>
4.1	Triebwerkseinlauf .....	171
4.1.1	Subsonischer Einlauf .....	172
4.1.2	Supersonischer Einlauf .....	174
4.1.3	Turbopropeinlauf .....	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	Hilfsgeräteantriebe . . . . .	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	Turbinenbeschaufelung . . . . .	220
4.4.2	Mehrwellenturbinen . . . . .	225
4.4.3	Besondere Anforderungen an Turbinenbeschaufelungen . . . . .	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	<b>Triebwerksschub</b> . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Definitionen und Aero-Thermodynamische Grundlagen .....</b>	<b>381</b>
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 wissenswerte 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	Triviales Syntheseverfahren zur Vorauslegung eines zweiwelligen Turbofantriebwerks mit zwei separaten konvergenten Schubdüsen .....	472
	Literatur .....	486
<b>7</b>	<b>Parametrische Kreisprozessanalyse idealer Flugzeugtriebwerke .....</b>	<b>487</b>
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 Schuberzeugung 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
<b>8</b>	<b>Thermische Turbomaschinen .....</b>	<b>681</b>
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 Beschaufelung .....	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

<b>9</b>	<b>Triebwerkseinlauf .....</b>	<b>941</b>
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
<b>10</b>	<b>Verdichter .....</b>	<b>1017</b>
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 Verdichterzustände . . . . .	1113
10.5.1	Drehzahlabhängiges Verdichterverhalten . . . . .	1113
10.5.2	Rotierende Ablösung . . . . .	1118
10.5.3	Verdichterpumpen . . . . .	1120
10.5.4	Schaufelkavernen . . . . .	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
<b>11</b>	<b>Brennkammer . . . . .</b>	<b>1147</b>
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
<b>12</b>	<b>Turbine .....</b>	<b>1235</b>
12.1	Einleitung .....	1235
12.1.1	Zum aktuellen Stand konventioneller Turbinentechnologie ..	1235
12.1.2	Clocking-Effekt .....	1237
12.1.3	Schnellaufende 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
<b>13</b>	<b>Schubdüse .....</b>	<b>1325</b>
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
<b>14</b>	<b>Berechnung realer Triebwerke .....</b>	<b>1349</b>
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
<b>15</b>	<b>Triebwerkslärm .....</b>	<b>1485</b>
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	Strahllärm .....	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 Lärmreduktion durch Gegenschall .....	1547
	Literatur .....	1550

---

<b>16 Triebwerkssysteme</b> .....	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 Triebwerksleistung 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 Flugzeugbrennstoffsystem .....	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 Gondeleinlauflippen .....	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
<b>17 Propeller und Propellersysteme</b> .....	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	Turboproppropeller . . . . .	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 Düseaustrittsgeschwindigkeit . . . . .	1769
17.11.2	Betrachtungen zum Turbopropkreisprozess . . . . .	1773
	Literatur . . . . .	1782
<b>18</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>1785</b>
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 polytrophe 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 polytropen 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 aus geführter 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
	<b>Literatur</b> . . . . .	1975
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	1979



<http://www.springer.com/978-3-642-34538-8>

Flugzeugtriebwerke

Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale  
Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten,  
Emissionen und Systeme

Bräunling, W.J.G.

2015, LXXXVIII, 2020 S. 1095 Abb., 360 Abb. in Farbe. In  
2 Bänden, nicht einzeln erhältlich., Hardcover

ISBN: 978-3-642-34538-8