

Willy J.G. Bräunling

Flugzeugtriebwerke

**Grundlagen,
Aero-Thermodynamik,
Kreisprozesse,
Thermische Turbomaschinen,
Komponenten- und
Auslegungsberechnungen**

Mit 508 Abbildungen und
33 vollständig durchgerechneten Beispielen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Physikalisches Prinzip des Strahltriebs	1
1.2 Geschichtlicher Werdegang des Strahltriebs	3
1.3 Technische Methoden des Strahltriebs	7
1.4 Einteilung der Flugantriebe	11
1.5 Der Strahltrieb als bevorzugter Flugzeugantrieb	14
1.6 Welches Triebwerk bei welcher Geschwindigkeit?	14
2 Klassifizierung der Flugzeugtriebwerke	17
2.1 Turbostrahltriebwerke	19
2.1.1 Einstromtriebwerke	19
2.1.2 Zweistromtriebwerke	22
2.1.3 Turbo-Strahltriebwerke mit Nachbrenner	30
2.2 Wellenleistungstriebwerke	32
2.2.1 Hilfstriebwerke	33
2.2.2 Propellerturbinentriebwerke	36
2.2.3 Hubschraubertriebwerke	37
3 Funktionsbeschreibung der Hauptkomponenten	39
3.1 Allgemeine Bezeichnungen und Bezugsebenen	39
3.2 Triebwerkseinlauf	41
3.2.1 Subsonischer Einlauf	41
3.2.2 Supersonischer Einlauf	44
3.2.3 Turbopropenlauf	45
3.2.4 Sonderformen von Triebwerkseinläufen	46
3.2.4.1 Standeinlauf	46
3.2.4.2 Fremdkörperabscheider	47
3.2.4.3 Vortex Dissipater	48
3.3 Verdichter	49
3.3.1 Fan-Sektion bei Turbofantriebwerken	49
3.3.2 Radialverdichter	51
3.3.3 Axialverdichter	53
3.3.3.1 Einwellenverdichter	53
3.3.3.2 Mehrwellenverdichter	55
3.3.4 Abblasen von Verdichterluft	57
3.3.5 Hilfsgeräteantriebe	58
3.3.6 Der Axialverdichter als bevorzugter Verdichter für Strahltriebwerke	59

3.4	Brennkammer	61
3.4.1	Arten von Brennkammern	61
3.4.2	Hauptkomponenten einer Brennkammer	64
3.4.3	Luftverteilung in einer Brennkammer	66
3.4.4	Abgasemission aus der Brennkammer	68
3.5	Turbine	69
3.5.1	Aktions- und Reaktionsturbine	70
3.5.2	Mehrwellenturbinen	72
3.5.3	Besondere Anforderungen an Turbinenbeschaukelungen	73
3.5.3.1	Turbinenmaterialien	74
3.5.3.2	Turbinenkühlung	76
3.6	Schubverstärkung	77
3.6.1	Wassereinspritzung	77
3.6.2	Nachverbrennung	78
3.6.3	Arbeits- und Wirkungsweise von Nachbrennern	80
3.7	Schubdüse	82
3.7.1	Konvergente Schubdüsen	82
3.7.2	Mischer	84
3.7.3	Konvergent-divergente Schubdüsen	86
3.7.4	Schubvektorsteuerung	87
3.8	Schubumkehrer	89
3.9	Lärminderung	91
4	Triebwerksschub	95
4.1	Impulssatz	95
4.2	Allgemeine Schubgleichung	97
4.3	Einlauf- und Gondelwiderstand	107
4.3.1	Zusammenhang zwischen Einlauf- und Gondelwiderstand	108
4.4	Sonderfälle der Schubgleichung	109
4.4.1	Ideale Expansion und angepasste Schubdüse	109
4.4.2	Vernachlässigbare Brennstoff- und Zapfluftmassenströme	111
4.4.3	Bodenstandfall	112
4.5	Eindimensionale Abschätzung des Einlaufwiderstandes	112
4.6	Äußere Einflüsse auf den Triebwerksschub	117
4.7	Triebwerksleistungsstufen (<i>engine power ratings</i>)	119
4.7.1	Full-Rated Engine und Derated Engine	121
4.7.2	Flat-Rated Engine	122
5	Allgemeine Grundlagen und Definitionen	125
5.1	Spezifischer Schub	125
5.1.1	Turbojet	125
5.1.2	Turbofan	126
5.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	127
5.2.1	Turbojet	128
5.2.2	Turbofan	129
5.3	Einheitsmasse, Stirnflächenschub und Schubverhältnis	129

5.4	Charakteristische Kenngrößen am Beispiel ausgeführter Ein- und Zweistrom-Triebwerke	131
5.5	Wellenvergleichsleistung oder äquivalente Leistung bei Turbo-proprietriebwerken	134
5.5.1	Wellenvergleichsleistung im Flugfall	136
5.5.2	Wellenvergleichsleistung im Startfall	137
5.6	Spezifischer Brennstoffverbrauch und Einheitsmasse bei Wellenleistungstriebwerken	138
5.7	Idealer Kreisprozess und spezifische Nutzarbeit	140
5.8	Nutz-, Schub- und Verlustleistung	147
5.9	Thermischer Wirkungsgrad	148
5.10	Vortriebswirkungsgrad	150
5.11	Gesamtwirkungsgrad	151
5.12	Zusammenhang zwischen spezifischem Schub, spezifischem Brennstoffverbrauch und thermischem Wirkungsgrad	152
6	Aero-Thermodynamik idealer Flugzeugtriebwerke	155
6.1	Turbojet ohne Nachbrenner	156
6.1.1	Spezifischer Schub	156
6.1.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	159
6.1.3	Thermischer Wirkungsgrad	160
6.1.4	Vortriebswirkungsgrad	162
6.2	Ramjet	163
6.3	Ergebnisdarstellung für Turbo- und Ramjets	165
6.3.1	Optimales Verdichterdruckverhältnis und maximaler spezifischer Schub	177
6.4	Turbojet mit Nachbrenner	183
6.4.1	Spezifischer Schub	184
6.4.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	186
6.4.3	Thermischer Wirkungsgrad	188
6.4.4	Vortriebswirkungsgrad	189
6.4.5	Vergleich zwischen Turbojets mit und ohne Nachbrenner bei optimalem Verdichterdruckverhältnis	190
6.5	Turbofan mit separaten Schubdüsen	194
6.5.1	Leistungsgleichgewichte und Kreisprozess	196
6.5.2	Spezifischer Schub	199
6.5.2.1	Ergebnisdarstellung zum spez. Schub des Turbofans	201
6.5.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	205
6.5.3.1	Ergebnisdarstellung zum spez. Brennstoffverbrauch des Turbofans	206
6.5.4	Schubverhältnis	208
6.5.4.1	Ergebnisdarstellung zum Schubverhältnis des Turbofans	209
6.5.5	Thermischer Wirkungsgrad und Vortriebswirkungsgrad	212
6.5.5.1	Ergebnisdarstellung zu den Wirkungsgraden des Turbofans	214
6.5.6	Optimales Bypassverhältnis und optimales Fandruckverhältnis	216

6.5.6.1	Optimales Bypassverhältnis	216
6.5.6.2	Ergebnisdarstellung zum optimalen Bypassverhältnis	220
6.5.6.3	Optimales Fandruckverhältnis	222
6.5.6.4	Ergebnisdarstellung zum optimalen Fandruckverhältnis	224
6.6	Turbofan mit Strahlmischung	231
6.6.1	Kreisprozess, Eigenschaften und Voraussetzungen	233
6.6.2	Spezifischer Schub	237
6.6.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	238
6.6.4	Vortriebswirkungsgrad und thermischer Wirkungsgrad	239
6.6.5	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung	239
6.7	Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	243
6.7.1	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	247
6.8	Turboprop	251
6.8.1	Propeller-, Vortriebs- und Verlustwirkungsgrad	253
6.8.2	Leistungskoeffizienten	254
6.8.3	Bezugsebenen und Kreisprozess	255
6.8.4	Spezifische Arbeit und spezifischer Schub	257
6.8.5	Spezifischer Brennstoffverbrauch	260
6.8.6	Vortriebswirkungsgrad, thermischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad	260
6.8.7	Optimales Turbinentemperaturverhältnis	261
6.8.8	Ergebnisdarstellung zum Turboprop	263
6.9	Turboshaft	267
6.10	Turboshaft mit Rekuperator	270
6.10.1	Maximal mögliches Verdichterdruckverhältnis	272
6.10.2	Spezifische Arbeit und spezifischer Brennstoffverbrauch	273
6.10.3	Thermischer Wirkungsgrad	274
6.10.4	Ergebnisdarstellung zum Turboshaft mit und ohne Rekuperator	275
7	Thermische Turbomaschinen	281
7.1	Grundlagen und Begriffe	281
7.1.1	Gitterströmungen	287
7.1.2	Energieumsetzung in einem Laufrad	287
7.1.3	Vorzeichenvereinbarungen	288
7.1.4	Momentenbetrachtung an einem Rotor	290
7.1.5	Eulersche Hauptgleichung der Turbomaschinen	294
7.1.6	Absolute und relative Strömung	295
7.1.6.1	Vorbetrachtung über die Relativität der Bewegung	295
7.1.6.2	Galilei-Transformation für Geschwindigkeiten	296
7.1.7	Geschwindigkeitsdreiecke	297
7.1.8	Diskussion der Eulerschen Hauptgleichung	298
7.2	Axialmaschinen	308
7.2.1	Verdichter- und Turbinenstufen	308

7.2.2	Typische Formen der Beschau felung	314
7.2.2.1	Verdichter	314
7.2.2.2	Turbinen	315
7.2.3	Grenzen der Arbeitsumsetzung in einer Stufe	316
7.2.3.1	Fliehkrafteinfluss	317
7.2.3.2	Machzahleinfluss	319
7.2.3.3	Gitterbelastungskriterien für Verdichter	321
7.2.4	Stufenkenngrößen	327
7.2.4.1	Durchflusskenngröße	330
7.2.4.2	Enthalpiekenngröße	330
7.2.4.3	Reaktionsgrad	331
7.2.4.4	Zusammenfassen der Kenngrößen von Normalstufen	332
7.2.5	Normalstufen mit unterschiedlichen Reaktionsgraden	337
7.2.5.1	Stufen mit 0 % Reaktion	337
7.2.5.2	Stufen mit 50 % Reaktion	340
7.2.5.3	Stufen mit 100 % Reaktion	345
7.2.6	Auswahlkriterien für einige Stufenparameter	346
7.3	Radialmaschinen	349
7.3.1	Radialverdichterstufen	351
7.3.1.1	Relativer Kanalwirbel und Minderleistung	354
7.3.1.2	Minderleistungsfaktor und Schaufelanzahl	356
7.3.1.3	Leitrad oder Diffusor	363
7.3.2	Radialturbinenstufen	365
7.3.3	Spezifische Drehzahl	371
7.4	Dreidimensionale Strömungen	376
7.4.1	Einfaches Radiales Gleichgewicht	379
7.4.1.1	Potentialwirbelgesetz (Free Vortex Design)	381
7.4.1.2	Weitere Drallgesetze	385
7.4.2	Stromlinienkrümmungsverfahren	387
7.4.2.1	Allgemeine Bewegungsgleichungen	390
7.4.2.2	Allgemeines Radiales Gleichgewicht	405
7.4.2.3	Theorie der Wirkenden Scheibe	407
7.4.2.4	Quasi-dreidimensionale Strömung auf S_1 - und S_2 -Stromflächen	411
7.5	Verluste in thermischen Turbomaschinen	412
7.5.1	Mechanische Verluste und Massenverluste	412
7.5.2	Strömungsverluste	413
7.5.2.1	Profilverluste	413
7.5.2.2	Spaltverluste	421
7.5.2.3	Sekundärströmungsverluste	423
7.5.2.4	Seitenwandreibungsverluste	426
8	Triebwerkseinlauf	427
8.1	Subsonischer Einlauf	427
8.1.1	Festlegung der Basisgeometrie	432
8.2	Supersonischer Einlauf	441
8.2.1	Interne Kompression	442
8.2.1.1	Überschallstartbedingung	443

8.2.2	Externe Kompression	448
8.2.2.1	Schräge Verdichtungsstöße	448
8.2.2.2	Stoßbedingte Einlaufgestaltung	450
8.2.2.3	Massenstromcharakteristik	451
8.2.2.4	Abschätzen der Einlaufquerschnitte	456
8.2.3	Einläufe variabler Geometrie	459
8.2.4	Festlegung der Basisgeometrie	461
9	Verdichter	465
9.1	Verdichterwirkungsgrade	467
9.1.1	Isentroper Verdichterwirkungsgrad	468
9.1.2	Isentroper Verdichterstufenwirkungsgrad	468
9.1.3	Polytroper Verdichterwirkungsgrad	472
9.2	Auslegungsgesichtspunkte für Axialverdichter	475
9.2.1	Hauptabmessungen und Drehzahl	475
9.2.2	Anzahl der Stufen	478
9.2.3	Weitere Stufeneigenschaften	481
9.2.3.1	Stufen ohne Drall in der Zuströmung	482
9.2.3.2	Stufen mit Drall in der Zuströmung	484
9.2.4	Räumliche Schaufelgestaltung	486
9.2.5	Profil- und Schaufelgeometrie	491
9.2.5.1	Subsonische Profile	491
9.2.5.2	Supersonische Profile (Transsonische Verdichter)	496
9.2.5.3	Fortschrittliche Methoden der Schaufelgestaltung	498
9.3	Verdichterkennfeld	499
9.3.1	Drossel- oder Drehzahlkurven	501
9.3.2	Reduzierte Kennfeldgrößen	502
9.3.2.1	Reduzierter Massenstrom	503
9.3.2.2	Reduzierte Drehzahl	504
9.3.3	Grundlegender Aufbau des Verdichterkennfeldes	505
9.3.3.1	Axialverdichter	505
9.3.3.2	Radialverdichter	506
9.4	Instabile Verdichtierzustände	510
9.4.1	Drehzahlabhängiges Verdichterverhalten	510
9.4.1.1	Drehzahlen kleiner als die Auslegungsdrehzahl	510
9.4.1.2	Drehzahlen größer als die Auslegungsdrehzahl	513
9.4.2	Rotierende Ablösung	514
9.4.3	Verdichterpumpen	516
9.4.4	Schaufelflattern	518
9.4.5	Stabilisierende Maßnahmen	519
9.4.5.1	Leitschaufelverstellung	520
9.4.5.2	Abblasen von Verdichterluft	524
9.4.5.3	Mehrwelligkeit	526
10	Brennkammer	529
10.1	Eigenschaften von Flugzeugbrennstoffen	530
10.1.1	Dampfdruck	530
10.1.2	Flammpunkt	532

10.1.3	Flüchtigkeit, Siedegrenzen und Gefrierpunkt	533
10.1.4	Schwefel-, Gum- und Wassergehalt	534
10.2	Basiseigenschaften von Brennkammern	534
10.2.1	Physikalische Bedeutung der Brennkammerkomponenten	535
10.2.1.1	Allgemeines	535
10.2.1.2	Diffusor	536
10.2.1.3	Primärzone	539
10.2.1.4	Drallgeber	540
10.2.1.5	Mischluftzone	540
10.2.2	Wandkühlung	543
10.2.2.1	Werkstoffe und thermische Überzüge	543
10.2.2.2	Wandkühlungstechniken	544
10.3	Brennstoffdüsen und Zündung	549
10.3.1	Druckzerstäubung	550
10.3.2	Luftstrahlzerstäubung	552
10.3.3	Verdampfer	554
10.3.4	Zündung	555
10.4	Schadstoffemissionen	557
10.4.1	ICAO Regularien	558
10.4.2	Schadstoffreduzierung in konventionellen Brennkammern	562
10.4.3	Schadstoffreduzierung durch Steuerung der Primärzonentemperatur	564
10.4.3.1	Luftstufung oder variable Geometrie	564
10.4.3.2	Brennstoffstufung	566
10.4.4	Schadstoffreduzierung durch Fett-Mager-Stufung	568
10.5	Charakteristische Kenngrößen	570
10.5.1	Brennstoff/Luft-Verhältnis und Luftüberschusszahl	570
10.5.2	Brennkammerdruckverlust	573
10.5.2.1	Thermischer Totaldruckverlust	574
11	Turbine	579
11.1	Turbinenwirkungsgrade	580
11.1.1	Isentroper Turbinenwirkungsgrad	580
11.1.2	Isentroper Turbinenstufenwirkungsgrad	581
11.1.3	Polytroper Turbinenwirkungsgrad	584
11.2	Eigenschaften von Turbinenbeschaufelungen	586
11.2.1	Transsonische Turbinen	586
11.2.2	Optimales Teilungsverhältnis nach Zweifel	590
11.2.3	Staffelungswinkel	592
11.2.4	Schaufelhöhenverhältnis und Schaufelanzahl	593
11.2.5	Anzahl der Stufen	594
11.2.6	Turbinenaustrittsgrößen	596
11.3	Turbinenkennfeld	600
11.3.1	Reduzierte Kennfeldgrößen	600
11.3.2	Grundlegender Aufbau des Turbinenkennfeldes	602
11.3.3	Smith-Korrelation für isentrope Turbinenwirkungsgrade	608
11.4	Turbinenmaterialien	609
11.4.1	Turbineneintrittstemperatur	609

11.4.2 Hochwarmfeste Legierungen	611
11.4.2.1 Legierungen auf Nickel-Basis	612
11.4.2.2 Legierungen auf Kobalt-Basis	616
11.4.2.3 Weitere Möglichkeiten der Entwicklung	617
11.4.2.4 Hochtemperaturkorrosion	618
11.4.2.5 Oberflächenbeschichtung (Coatings)	619
11.5 Turbinenkühlung	622
11.5.1 Methoden der Turbinenkühlung	622
11.5.2 Abschätzung der erforderlichen Kühlluftmenge	627
12 Schubdüse	631
12.1 Eigenschaften und Aufgaben	631
12.2 Rückwirkung der Schubdüse auf die Triebwerksleistung	635
12.3 Konvergente Schubdüse	641
12.3.1 Unterkritisch durchströmte Schubdüse	642
12.3.2 Kritisch und überkritisch durchströmte Schubdüse	644
12.4 Konvergent/divergente Schubdüse	646
12.4.1 Düsenkoeffizienten	649
12.4.1.1 Bruttoschubkoeffizient	650
12.4.1.2 Massenstromkoeffizient	654
12.4.1.3 Beurteilung der Düseneigenschaften	656
Anhang A. Thermodynamik thermischer Turbomaschinen sowie idealer und realer Arbeitsfluide	659
A.1 Thermodynamik thermischer Turbomaschinen	659
A.1.1 Energieerhaltungssatz bei Turbomaschinen	659
A.1.2 Gibbssche Hauptgleichung bei Turbomaschinen	662
A.1.3 Wirkliche und polytrope Zustandsänderungen	664
A.1.4 Grundlegende Definitionen von Wirkungsgraden	666
A.1.4.1 Totaler Wirkungsgrad	666
A.1.4.2 Statischer Wirkungsgrad	667
A.1.4.3 Polytroper Wirkungsgrad	668
A.1.4.4 Isentroper Wirkungsgrad	669
A.1.4.5 Vergleich zwischen polytrophen und isentropen Wirkungsgraden	672
A.1.4.6 Wirkungsgrade passiver Turbomaschinenteile	676
A.1.4.7 Mechanischer Wirkungsgrad	677
A.1.4.8 Maschinenwirkungsgrad	679
A.2 Thermodynamik idealer und realer Arbeitsfluide	679
A.2.1 Zustandsgrößen und Zustandsänderungen	679
A.2.2 Ideale Gase und ideale Gasgemische	683
A.2.3 Berechnung isentroper und polytroper Zustandsänderungen	690
A.2.4 Zusammenhang zwischen isentropen und polytrophen Wirkungsgraden	694
A.2.5 Reale Arbeitsfluide	695
A.2.6 Einige Eigenschaften heißer Verbrennungsgase	697

Anhang B. Kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase	703
B.1 Schallgeschwindigkeit	703
B.2 Kompressibilität	706
B.2.1 Dichteänderung	706
B.2.2 Machzahl	708
B.2.3 Temperaturerhöhung	711
B.3 Machsche Linie, Verdichtungsstoß und Expansionswelle	712
B.4 Formeln für kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase	719
B.4.1 Thermische und kalorische Zustandsgleichung	719
B.4.2 Alternative Formen der Energiegleichung	721
B.5 Stetig verlaufende isentrope Strömungen	723
B.5.1 Eulersche Bewegungsgleichung und Bernoulligleichung	723
B.5.2 Kontinuitätsgleichung	725
B.5.3 Stromdichte	727
B.5.4 Ausfluss aus einem Kessel	729
B.5.5 Kritische Werte	731
B.5.6 Kritische Machzahl	733
B.5.7 Massenstromparameter	734
B.5.7.1 Massenstromparameter 1. Art	734
B.5.7.2 Massenstromparameter 2. Art	735
B.5.7.3 Massenstromparameter 3. Art	736
B.5.7.4 Massenstromparameter 4. Art	736
Anhang C. Impulssatz für stationäre Strömungen	739
C.1 Impuls	739
C.2 Masse	739
C.3 2. Newtonsches Axiom	739
C.4 Transportgleichung der Strömungsmechanik	740
C.5 Allgemeiner Impulssatz der Mechanik	742
C.6 Schwerpunktsatz der Mechanik	742
C.7 Differentialquotient nach Leibniz	744
C.8 Reihenentwicklung nach Taylor	744
C.9 Äußere Kräfte	747
C.10 Gewichtskraft	747
C.11 Druckkräfte an den freien Flächen	748
C.12 Stütz- oder Haltekräfte	749
C.13 Wahl der Kontrollfläche	750
Anhang D. Umrechnungsfaktoren zwischen physikalischen Dimensionen aus dem englisch/amerikanischen und dem deutschen Sprachbereich	753
Anhang E. Daten ausgeführter Flugtriebwerke	757
Literatur	769
Sachverzeichnis	777