

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Physikalisches Prinzip des Strahlantriebs	1
1.2	Strahltriebwerke sind Wärmekraftmaschinen	4
1.3	Geschichtlicher Werdegang des Strahlantriebs	5
1.3.1	Frühe Projekte	5
1.3.2	Sir Frank Whittle	10
1.3.3	Prof. Dr. Hans-Joachim Pabst von Ohain	13
1.3.4	Die ersten Schritte der Strahltriebwerksentwicklung in den USA	15
1.4	Technische Methoden des Strahlantriebs	16
1.5	Einteilung der Flugantriebe	22
1.6	Der Strahlantrieb als bevorzugter Flugzeugantrieb	24
1.7	Welches Triebwerk bei welcher Geschwindigkeit?	27
2	Klassifizierung der Flugzeugtriebwerke	29
2.1	Turbostrahltriebwerke	31
2.1.1	Einstromtriebwerke	32
2.1.2	Zweistromtriebwerke	37
2.1.3	Turbo-Strahltriebwerke mit Nachbrenner	56
2.2	Wellenleistungstriebwerke	60
2.2.1	Hilfstriebwerke	60
2.2.2	Propellerturbinentriebwerke	65
2.2.3	Hubschraubertriebwerke	69
2.3	Zusammenfassung	72
3	Was man weiß – was man wissen sollte	75
3.1	Energie, Arbeit und Wirkungsgrad	75
3.2	Thermodynamischer Arbeitsprozess	78
3.3	Statischer Druck und Totaldruck	81
3.4	Temperatur und Wärme	84
3.5	Statische Temperatur und Totaltemperatur	85
3.6	Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz	89
3.7	Strömungsgrenzschichten	92
3.7.1	Der Begriff der Grenzschicht	92
3.7.2	Laminare und turbulente Grenzschichten	93
3.7.3	Strömungsablösungen von Grenzschichten	95
3.8	Widerstand umströmter Körper	97

3.9	Auftrieb umströmter Körper	101
3.10	Kompressible Gasströmungen	105
3.11	Düsen und Diffusoren	110
3.12	Wie und wo entsteht der Schub?	113
3.13	Änderungen von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur innerhalb eines Triebwerks	117
3.14	Wie viel Schub braucht ein Triebwerk?	119
3.15	Fluggeschwindigkeit, Knoten und Machzahl	121
3.16	Schub, Leistung und äquivalente Leistung	123
4	Hauptkomponentenbeschreibung und zugehörige Technologien	125
4.1	Triebwerkseinlauf	125
4.1.1	Subsonischer Einlauf	126
4.1.2	Supersonischer Einlauf	128
4.1.3	Turbopropeinlauf	130
4.1.4	Sonderformen von Triebwerkseinläufen	131
4.1.4.1	Standeinlauf	131
4.1.4.2	Fremdkörperabscheider	132
4.1.4.3	Vortex Dissipater	133
4.2	Verdichter	134
4.2.1	Fan-Sektion bei Turbofantriebwerken	134
4.2.2	Radialverdichter	138
4.2.3	Axialverdichter	141
4.2.3.1	Einwellenverdichter	141
4.2.3.2	Mehrwellenverdichter	143
4.2.3.3	Verdichterbeschaufelung	146
4.2.4	Abblasen und Entnahme von Verdichterluft	149
4.2.5	Hilfsgeräteantriebe	151
4.2.6	Der Axialverdichter als bevorzugter Verdichter für Strahltriebwerke mit höherem Luftmassendurchsatz	155
4.3	Brennkammer	157
4.3.1	Arten von Brennkammern	158
4.3.2	Hauptkomponenten einer Brennkammer	160
4.3.3	Luftverteilung in einer Brennkammer	164
4.3.4	Abgasemission aus der Brennkammer	166
4.4	Turbine	167
4.4.1	Turbinenbeschaufelung	170
4.4.2	Mehrwellenturbinen	174
4.4.3	Besondere Anforderungen an Turbinenbeschaufelungen	178
4.4.3.1	Turbinenmaterialien	179
4.4.3.2	Turbinenkühlung	183
4.5	Schubverstärkung	187
4.5.1	Wassereinspritzung	188
4.5.1.1	Grundlagen	188
4.5.1.2	Schadstoff mindernder Effekt	190

	4.5.1.3	Historisches zur Wassereinspritzung bei Flugtriebwerken	191
	4.5.2	Nachverbrennung	195
	4.5.3	Arbeits- und Wirkungsweise von Nachbrennern	196
4.6		Schubdüse	202
	4.6.1	Konvergente Schubdüsen	202
	4.6.2	Mischer	205
	4.6.3	Chevron-Düsen	207
	4.6.4	Konvergent-divergente Schubdüsen	208
	4.6.5	Schubvektorsteuerung	212
	4.6.5.1	Schubdüsenverstellung an Nachbrenner- triebwerken	212
	4.6.5.2	Weitere Konzepte der Schubvektorsteuerung	215
4.7		Schubumkehrer	220
4.8		Zukünftige Technologien	227
	4.8.1	Werkstoffe	228
	4.8.2	Getriebefan und schnelllaufende Niederdruckturbine	232
	4.8.3	Numerische Rechenverfahren	235
	4.8.4	Hochdruckverdichter mit aktiver Pumpfrüherkennung	237
	4.8.5	Rekuperative Triebwerke	238
	4.8.6	Das „mehr-elektrische“ Triebwerk (More-Electric Engine)	241
5		Triebwerksschub	245
5.1		Impulssatz	245
5.2		Allgemeine Schubgleichungen	247
	5.2.1	Allgemeine Schubgleichung für Turbojettriebwerke	247
	5.2.2	Simplifizierte Form des Impulssatzes	254
	5.2.3	Die Schubdüse liefert „negativen“ Schub	258
	5.2.4	Allgemeine Schubgleichung für Turbofantriebwerke	259
	5.2.5	Allgemeine Schubgleichung für Triebwerke mit Schubvektorumlenkung	261
5.3		Sonderfälle der Schubgleichungen	269
	5.3.1	Ideale Expansion und angepasste Schubdüse	269
	5.3.2	Vernachlässigbare Brennstoff- und Zapfluftmassenströme	271
	5.3.3	Bodenstandfall	271
5.4		Zulauf- und Gondelwiderstand	272
	5.4.1	Einige Erkenntnisse aus den Gleichungen für den Zulauf- und den Gondelwiderstand	273
	5.4.2	Zulaufwiderstand und Gondelvorkörperkraft	275
	5.4.3	Überlaufwiderstand	280
5.5		Äußere Einflüsse auf den Triebwerksschub	283
	5.5.1	Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und Massenstrom	283
	5.5.2	Atmosphärische Umgebung und Schubkonstanz	286
	5.5.3	Geschwindigkeitseffekt und Staueffekt	287
5.6		Triebwerksleistungsstufen	292
	5.6.1	Messung und Beurteilung der Triebwerksleistung im Flug	292

5.6.2	FADEC Triebwerkleistungsregelung	295
5.6.3	ACUTE Schubanzeige	298
5.6.4	Typische Leistungsstufen ziviler Triebwerke	299
5.6.5	Typische Leistungsstufen militärischer Triebwerke	302
5.6.6	Maximal zulässige Abgastemperatur	303
5.6.7	Die Triebwerksschonung im Alltagsbetrieb durch den so genannten de-rated oder flat-rated Schub	304
5.6.8	FLX-Thrust und FLX-Temperature	307
5.6.9	Über die Anzeige der Triebwerksdrehzahlen in Prozent	309
6	Definitionen und Grundlagen	311
6.1	Bezeichnungen und Bezugsebenen	311
6.2	Spezifischer Schub	314
6.2.1	Turbojet	314
6.2.2	Turbofan	315
6.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	316
6.3.1	Turbojet	317
6.3.2	Turbofan	318
6.4	Einheitsmasse, Stirnflächenschub und Schubverhältnis	318
6.5	Charakteristische Kenngrößen am Beispiel ausgeführter Turbojet- und Turbofantriebwerke	320
6.6	Wellenvergleichsleistung von Turboproptriebwerken	324
6.6.1	Wellenvergleichsleistung im Flugfall	326
6.6.2	Wellenvergleichsleistung im Startfall	326
6.7	Spezifischer Brennstoffverbrauch und Einheitsmasse bei Wellenleistungstriebwerken	328
6.8	Idealer Kreisprozess und spezifische Nutzarbeit	330
6.9	Nutz-, Schub- und Verlustleistung	340
6.10	Thermischer Wirkungsgrad	342
6.11	Arbeitsverhältnis	346
6.12	Vortriebswirkungsgrad	348
6.13	Gesamtwirkungsgrad	351
6.14	Beispielrechnungen	352
6.15	Einige wissenswerte Zusammenhänge und Anmerkungen	361
6.15.1	Zusammenhang zwischen spezifischem Schub, spezifischem Brennstoffverbrauch und thermischem Wirkungsgrad	361
6.15.2	Reichweite und Gesamtmassenaufwand	363
6.16	Basisauslegung eines einfachen Turbojettriebwerks	370
6.17	Basisauslegung eines einfachen Turbofantriebwerks	376
7	Parametrische Kreisprozessanalyse idealer Flugzeugtriebwerke	385
7.1	Turbojet ohne Nachbrenner	386
7.1.1	Spezifischer Schub	386
7.1.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	390
7.1.3	Thermischer Wirkungsgrad	391
7.1.4	Vortriebswirkungsgrad	393

7.2	Ramjet	395
7.3	Ergebnisdarstellung für Turbo- und Ramjet	397
7.3.1	Optimales Verdichterdruckverhältnis und maximaler spezifischer Schub	410
7.4	Turbojet mit Nachbrenner	417
7.4.1	Spezifischer Schub	417
7.4.2	Spezifischer Brennstoffverbrauch	419
7.4.3	Thermischer Wirkungsgrad	422
7.4.4	Vortriebswirkungsgrad	423
7.4.5	Vergleich zwischen Turbojet mit und ohne Nachbrenner bei optimalem Verdichterdruckverhältnis	424
7.5	Turbofan mit separaten Schubdüsen	427
7.5.1	Leistungsgleichgewichte und Kreisprozess	430
7.5.2	Spezifischer Schub	433
7.5.2.1	Ergebnisdarstellung zum spez. Schub des Turbofan	436
7.5.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	440
7.5.3.1	Ergebnisdarstellung zum spez. Brennstoffverbrauch des Turbofan	440
7.5.4	Schubverhältnis	443
7.5.4.1	Ergebnisdarstellung zum Schubverhältnis des Turbofan	443
7.5.5	Thermischer Wirkungsgrad und Vortriebswirkungsgrad	446
7.5.5.1	Ergebnisdarstellung zu den Wirkungsgraden des Turbofan	449
7.5.6	Optimales Bypassverhältnis und optimales Fandruckverhältnis	453
7.5.6.1	Optimales Bypassverhältnis	454
7.5.6.2	Ergebnisdarstellung zum optimalen Bypassverhältnis	457
7.5.6.3	Optimales Fandruckverhältnis	460
7.5.6.4	Ergebnisdarstellung zum optimalen Fandruckverhältnis	462
7.6	Turbofan mit Strahlmischung	470
7.6.1	Kreisprozess, Eigenschaften und Voraussetzungen	470
7.6.2	Spezifischer Schub	476
7.6.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	477
7.6.4	Vortriebswirkungsgrad und thermischer Wirkungsgrad	477
7.6.5	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung	478
7.7	Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	483
7.7.1	Ergebnisdarstellung zum Turbofan mit Strahlmischung und Nachverbrennung	487
7.8	Turboprop	492
7.8.1	Grundlagen der Schuberzeugung durch einen Propeller (Rankinesche Strahltheorie)	495
7.8.2	Leistungskoeffizienten	499

7.8.3	Bezugsebenen und Kreisprozess	500
7.8.4	Spezifische Arbeit und spezifischer Schub	502
7.8.5	Spezifischer Brennstoffverbrauch	505
7.8.6	Vortriebswirkungsgrad, thermischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad	505
7.8.7	Optimales Turbinentemperaturverhältnis	506
7.8.8	Ergebnisdarstellung zum Turboprop	508
7.9	Turboshaft	513
7.10	Turboshaft mit Rekuperator	516
7.10.1	Maximal mögliches Verdichterdruckverhältnis	519
7.10.2	Spezifische Arbeit und spezifischer Brennstoffverbrauch	521
7.10.3	Thermischer Wirkungsgrad	524
7.10.4	Ergebnisdarstellung zum Turboshaft mit und ohne Rekuperator	524
7.11	Rekuperativer Turbofan mit Zwischenkühlung	531
7.11.1	Zwischenkühlung und Positionierung des Zwischenkühlers	535
7.11.2	Bezugsebenen, Kreisprozess und Erwärmung des Sekundärstroms	538
7.11.3	Turbinentemperaturverhältnis	544
7.11.4	Maximal mögliches Verdichterdruckverhältnis	545
7.11.5	Spezifischer Schub	547
7.11.6	Spezifischer Brennstoffverbrauch	552
7.11.7	Thermischer Wirkungsgrad, Vortriebs- und Gesamt- wirkungsgrad	557
8	Thermische Turbomaschinen	569
8.1	Grundlagen und Begriffe	569
8.1.1	Gitterströmungen	570
8.1.2	Energieumsetzung in einem Laufrad	575
8.1.3	Vorzeichenvereinbarungen	577
8.1.4	Momentenbetrachtung an einem Rotor	581
8.1.5	Eulersche Hauptgleichung der Turbomaschinen	584
8.1.6	Absolute und relative Strömung	587
8.1.6.1	Vorbetrachtung über die Relativität der Bewegung	587
8.1.6.2	Galilei-Transformation für Geschwindigkeiten	588
8.1.7	Geschwindigkeitsdreiecke	590
8.1.8	Diskussion der Eulerschen Hauptgleichung	595
8.1.8.1	Globale Eigenschaften	595
8.1.8.2	Erweiterte Form der Euler-Gleichung	597
8.1.8.3	Rothalpie	597
8.1.8.4	Bedeutung der einzelnen Terme in der erweiterten Euler-Gleichung	599
8.2	Axialmaschinen	603
8.2.1	Verdichter- und Turbinenstufen	604
8.2.2	Typische Formen der Beschaufelung	610
8.2.2.1	Verdichter	610

	8.2.2.2	Turbinen	612
8.2.3		Grenzen der Arbeitsumsetzung in einer Stufe	613
	8.2.3.1	Fliehkrafteinfluss	614
	8.2.3.2	Machzahleinfluss	616
	8.2.3.3	Gitterbelastungskriterien für Verdichter	622
8.2.4		Stufenkenngrößen	638
	8.2.4.1	Normalstufe, mittlerer Radius und Euler-Radius	640
	8.2.4.2	Durchflusskenngröße	643
	8.2.4.3	Enthalpiekenngröße	643
	8.2.4.4	Reaktionsgrad	644
	8.2.4.5	Zusammenfassen der Kenngrößen von Normalstufen	646
8.2.5		Normalstufen mit unterschiedlichen Reaktionsgraden	652
	8.2.5.1	Stufen mit 0 % Reaktion	652
	8.2.5.2	Stufen mit 50 % Reaktion	655
	8.2.5.3	Stufen mit 100 % Reaktion	662
8.2.6		Parameteranalyse für eine einfache Axialverdichterstufe	664
	8.2.6.1	Auswahlkriterien für einige Stufenparameter	671
8.2.7		Parameteranalyse für eine einfache Axialturbinenstufe	675
	8.2.7.1	Teilungsverhältnis nach Zweifel	680
8.3		Radialmaschinen	688
	8.3.1	Radialverdichterstufen	690
	8.3.1.1	Relativer Kanalwirbel und Minderleistung	693
	8.3.1.2	Minderleistungsfaktor und Schaufelanzahl	696
	8.3.1.3	Über die Strömung durch Impeller von Radialverdichtern	702
	8.3.1.4	Aufgenommene Arbeit, Stufendruckverhältnis und zulässige Drehzahl	705
	8.3.1.5	Diffusor (Leitrad)	708
8.3.2		Basisauslegung von Radialverdichterimpellern	714
8.3.3		Zulässiges Verzögerungsverhältnis in Radialverdichtern	721
8.3.4		Radialturbinenstufen	724
	8.3.4.1	Schaufelanzahl	727
	8.3.4.2	Abgegebene Arbeit, Stufendruckverhältnis und zulässige Drehzahl	729
	8.3.4.3	Basisauslegung von Radialturbinenlaufrädern	732
8.4		Dreidimensionale Strömungen	745
	8.4.1	Einfaches Radiales Gleichgewicht	746
	8.4.1.1	Potenzialwirbelgesetz (Free Vortex Design)	749
	8.4.1.2	Weitere Drallgesetze	753
	8.4.2	Stromlinienkrümmungsverfahren	756
	8.4.2.1	Allgemeine Bewegungsgleichungen	759
	8.4.2.2	Allgemeines Radiales Gleichgewicht	775
	8.4.2.3	Theorie der Wirkenden Scheibe	777
	8.4.2.4	Quasi-dreidimensionale Strömung auf S1- und S2-Stromflächen	781

8.5	Verluste in thermischen Turbomaschinen	782
8.5.1	Mechanische Verluste und Massenverluste	783
8.5.2	Strömungsverluste	783
8.5.2.1	Profilverluste	784
8.5.2.2	Spaltverluste	792
8.5.2.3	Sekundärströmungsverluste	794
8.5.2.4	Seitenwandreibungsverluste	796
9	Triebwerkseinlauf	799
9.1	Subsonischer Einlauf	800
9.1.1	Basiseigenschaften	800
9.1.2	Externe Einlaufverluste	802
9.1.3	Interne Einlaufverluste	805
9.1.4	Notwendige Kompromisse bei der Einlaufgestaltung	808
9.1.5	Berechnung einer einfachen Basisgeometrie	810
9.1.6	Aspekte zur dreidimensionalen und zur überkritischen Auslegung	821
9.2	Supersonischer Einlauf	832
9.2.1	Interne Kompression	833
9.2.1.1	Über das so genannte Starten von Überschalldiffusoren	834
9.2.2	Externe Kompression	839
9.2.2.1	Schräge Verdichtungsstöße	839
9.2.2.2	Stoßbedingte Einlaufgestaltung	842
9.2.2.3	Massenstromcharakteristik	843
9.2.2.4	Abschätzen der Einlaufquerschnitte	848
9.2.3	Einläufe variabler Geometrie	851
9.2.4	Festlegung der Basisgeometrie	854
10	Verdichter	859
10.1	Einleitung	859
10.2	Verdichterwirkungsgrade	863
10.2.1	Isentroper Verdichterwirkungsgrad	863
10.2.2	Isentroper Verdichterstufenwirkungsgrad	863
10.2.3	Polytroper Verdichterwirkungsgrad	869
10.3	Auslegungsgesichtspunkte für Axialverdichter	874
10.3.1	Grundlegendes zur Entwicklung von Triebwerksverdichtern	874
10.3.2	Hauptabmessungen und Drehzahl	875
10.3.3	Anzahl der Stufen	877
10.3.4	Weitere Stufeneigenschaften	882
10.3.4.1	Stufen ohne Drall in der Zuströmung	886
10.3.4.2	Stufen mit Drall in der Zuströmung	887
10.3.5	Räumliche Schaufelgestaltung	892
10.3.5.1	Festkörperwirbelgesetz (solid body design)	892
10.3.5.2	Gesetz konstanten Dralls (exponential design)	895
10.3.6	Profil-, Gitter- und Schaufelgeometrie	903

10.3.6.1	Axiale Gitterbreite	905
10.3.6.2	Radiales Auffädeln der Einzelprofile zu einer Schaufel	907
10.3.6.3	Teilungsverhältnis	908
10.3.6.4	Schaufelhöhenverhältnis	909
10.3.6.5	Schaufelanzahl	912
10.3.6.6	Supersonische Profile im Gehäuseschnitt transsonischer Verdichter	915
10.3.6.7	Subsonische Profile	918
10.3.6.8	Fortschrittliche Methoden der Schaufelgestaltung	920
10.3.7	Anmerkungen zu aktuellen und zu zukünftigen Aspekten der Verdichtertechnologie	921
10.3.7.1	Gestaltung	921
10.3.7.2	Anlaufbeläge	921
10.3.7.3	Fertigungsverfahren	923
10.3.7.4	Werkstoffe	924
10.3.7.5	Auslegungsverfahren und numerische Methoden	926
10.3.7.6	Entwicklungskosten und -wege	929
10.4	Verdichterkennfeld	930
10.4.1	Drossel- oder Drehzahlkurven	931
10.4.2	Reduzierte Kennfeldgrößen	933
10.4.2.1	Reduzierter Massenstrom	934
10.4.2.2	Reduzierte Drehzahl	935
10.4.3	Grundlegender Aufbau des Verdichterkennfeldes	937
10.4.3.1	Axialverdichter	937
10.4.3.2	Radialverdichter	938
10.5	Instabile Verdichtierzustände	942
10.5.1	Drehzahlabhängiges Verdichterverhalten	942
10.5.1.1	Drehzahlen kleiner als die Auslegungsdrehzahl	942
10.5.1.2	Drehzahlen größer als die Auslegungsdrehzahl	945
10.5.2	Rotierende Ablösung	946
10.5.3	Verdichterpumpen	948
10.5.4	Schaufelflattern	951
10.5.5	Stabilisierende Maßnahmen	952
10.5.5.1	Leitschaufelverstellung	954
10.5.5.2	Abblasen von Verdichterluft	958
10.5.5.3	Mehrwelligkeit	961
10.6	Fortschrittliche Verfahren der Axialverdichtergestaltung	962
10.6.1	Über die Stufen- und Schaufelanzahl	962
10.6.2	Einige aerodynamische Aspekte	964
10.6.3	Einige mechanische Aspekte	971

11 Brennkammer

973

11.1	Einleitung	973
11.2	Eigenschaften von Flugzeugbrennstoffen	976
11.2.1	Dampfdruck	976

11.2.2	Flammpunkt	977
11.2.3	Flüchtigkeit, Siedegrenzen und Gefrierpunkt	978
11.2.4	Schwefel-, Gum- und Wassergehalt	979
11.3	Basiseigenschaften von Brennkammern	980
11.3.1	Physikalische Bedeutung der Brennkammerkomponenten	981
11.3.1.1	Allgemeines	981
11.3.1.2	Spezielles	982
11.3.1.3	Diffusoren	985
11.3.1.4	Primärzone	987
11.3.1.5	Drallgeber	988
11.3.1.6	Mischluftzone	989
11.3.2	Wandkühlung	992
11.3.2.1	Werkstoffe und thermische Überzüge	992
11.3.2.2	Wandkühlungstechniken	994
11.4	Brennstoffdüsen und Zündung	999
11.4.1	Druckzerstäubung	999
11.4.2	Luftstrahlzerstäubung	1002
11.4.3	Verdampfer	1005
11.4.4	Zündung	1006
11.5	Schadstoffemissionen	1008
11.5.1	Umwelt und Luftfahrtantriebe	1009
11.5.1.1	ACARE	1010
11.5.1.2	Clean Sky	1011
11.5.1.3	Mögliche Alternativen zu Kerosin	1012
11.5.2	ICAO Regularien	1014
11.5.3	Schadstoffreduzierung in konventionellen Brennkammern	1018
11.5.4	Schadstoffreduzierung durch Steuerung der Primärzonen- temperatur	1021
11.5.4.1	Luftstufung oder variable Geometrie	1021
11.5.4.2	Brennstoffstufung	1023
11.5.5	Schadstoffreduzierung durch Fett-mager-Stufung	1026
11.6	Charakteristische Kenngrößen	1027
11.6.1	Brennstoff-Luft-Verhältnis und Luftüberschusszahl	1027
11.6.2	Flammrohrhöhe, Flammrohlänge und Injektorteilung	1030
11.6.3	Referenzstaudruck sowie Referenz-, Ringraum- und Primärzonengeschwindigkeit	1031
11.6.4	Brennkammerdruckverlust	1033
11.6.4.1	Totaldruckverlust infolge Wärmezufuhr (heiße Verluste)	1034
11.6.4.2	Totaldruckverlust infolge Reibung (kalte Verluste)	1038
12	Turbine	1043
12.1	Einleitung	1043
12.1.1	Zum aktuellen Stand konventioneller Turbinentechnologie	1043
12.1.2	Clocking-Effekt	1045

12.1.3	Schnelllaufende Niederdruckturbine	1046
12.2	Turbinenwirkungsgrade	1049
12.2.1	Isentroper Turbinenwirkungsgrad	1049
12.2.2	Isentroper Turbinenstufenwirkungsgrad	1051
12.2.3	Polytroper Turbinenwirkungsgrad	1054
12.3	Auslegungsgesichtspunkte für Axialturbinen	1056
12.3.1	Transsonische Turbinenbeschaufelungen	1056
12.3.2	Anzahl der Stufen	1061
12.3.3	Schaufelhöhenverhältnis und Schaufelanzahl	1064
12.3.4	Turbinenaustrittsgrößen	1065
12.3.5	Gegenläufige Turbinen	1070
12.4	Turbinenkennfeld	1073
12.4.1	Reduzierte Kennfeldgrößen	1073
12.4.2	Grundlegender Aufbau des Turbinenkennfeldes	1075
12.4.3	Smith-Korrelation für isentrope Turbinenwirkungsgrade	1082
12.5	Turbinenmaterialien	1083
12.5.1	Turbineneintrittstemperatur	1083
12.5.2	Hochwarmfeste Legierungen	1087
12.5.2.1	Legierungen auf Nickel-Basis	1091
12.5.2.2	Legierungen auf Kobalt-Basis	1094
12.5.2.3	Weitere Möglichkeiten der Entwicklung	1095
12.5.2.4	Einkristalline Werkstoffe	1096
12.5.2.5	Hochtemperaturkorrosion	1100
12.5.2.6	Oberflächenbeschichtung (Coatings)	1101
12.6	Turbinenkühlung	1104
12.6.1	Methoden der Turbinenkühlung	1105
12.6.2	Abschätzung der erforderlichen Kühlluftmenge	1115
12.7	Festigkeit von Rotorschaukeln	1119
13	Schubdüse	1123
13.1	Eigenschaften und Aufgaben	1123
13.2	Rückwirkung der Schubdüse auf die Triebwerksleistung	1129
13.3	Konvergente Schubdüse	1134
13.3.1	Unterkritisch durchströmte Schubdüse	1134
13.3.2	Kritisch und überkritisch durchströmte Schubdüse	1137
14	Reale Triebwerkskreisprozesse	1141
14.1	Thermodynamische Betrachtung des realen Turbojetkreisprozesses	1144
14.1.1	Polytrope Expansions- und Kompressionsarbeit und Bruttoarbeit	1144
14.1.2	Kompressions- und Expansionswirkungsgrad und Nutzarbeit	1147
14.1.3	Der Einfluss der aero-thermodynamischen Parameter auf den realen Kreisprozess	1152
14.1.3.1	Spezifische Nutzarbeit, maximale spezifische Nutzarbeit und optimales Verdichterdruckverhältnis	1152

14.1.3.2	Spezifischer Schub und maximaler spezifischer Schub	1156
14.1.3.3	Spezifischer Brennstoffverbrauch	1159
14.1.3.4	Thermischer Wirkungsgrad, Vortriebs- und Gesamtwirkungsgrad	1172
14.2	Synthesebasiertes Berechnungsverfahren für Turbojet- und Turbofantriebwerke	1178
14.2.1	Syntheseverfahren für ein einwelliges Turbojettriebwerk mit konvergenter Schubdüse	1179
14.2.1.1	Basisgleichungen und grundlegende Vorgehensweise	1181
14.2.1.2	Rechnungsgang am Beispiel des Turbojettriebwerks	1183
14.2.2	Eine kurze Parameterstudie für ein reales Turbojettriebwerk	1213
14.2.3	Syntheseverfahren für ein zweiwelliges Turbofantriebwerk	1216
14.2.4	Parameterstudie für ein reales Turbofantriebwerk	1235
15	Triebwerkslärm	1253
15.1	Akustische Grundlagen zum Triebwerkslärm	1253
15.1.1	Übergreifende Grundbegriffe	1253
15.1.2	A-Bewertung des Schalldruckpegels	1256
15.1.3	Empfundener Schallpegel und Lästigkeit	1258
15.1.4	Tonkorrektur	1260
15.1.5	Effektiver empfundener Schallpegel	1261
15.2	Lärmregularien	1262
15.3	Schallquellen	1266
15.3.1	Strahlärm	1269
15.3.2	Fan- und Verdichterlärm	1280
15.3.3	Turbinenlärm	1295
15.3.4	Subalterne Schallquellen	1299
15.3.4.1	Brennkammerlärm	1299
15.3.4.2	Lärm infolge variabel verstellbarer Triebwerksbauteile	1299
15.3.4.3	Lärm infolge passiver Triebwerksbauteile	1300
15.4	Schallreduzierende Maßnahmen	1301
16	Triebwerkssysteme	1317
16.1	Hilfseinrichtungen und Hilfsgeräte	1317
16.1.1	Zapfluft	1317
16.1.2	Hilfsgeräteträger	1322
16.1.3	Startermotor und Triebwerksstart	1323
16.2	Elektronische Triebwerksregelung	1329
16.2.1	Generelle Aufgaben und Eigenschaften von Triebwerksregelungen	1330

16.2.2	Generelle Regelgrundsätze für eine Triebwerksregelung	1331
16.2.3	Komponenten eines Triebwerksregelungssystems	1333
16.2.3.1	EEC – Electronic Engine Control	1333
16.2.3.2	FADEC – Full Authority Digital Engine Control	1338
16.2.3.3	Messstellen und Sensoren	1342
16.3	Triebwerkleistungssteuerung	1350
16.4	Brennstoffsystem	1356
16.4.1	Flugzeugbrennstoffsystem	1356
16.4.2	Triebwerksbrennstoffsystem	1363
16.5	Ölsystem	1376
16.6	Wärmemanagementsystem	1392
16.7	Internes Triebwerksluftsystem	1396
16.7.1	Kühlung	1396
16.7.2	Axialkraftausgleich	1400
16.7.3	Aktive Spaltkontrolle	1402
16.8	Verdichterluftregelsystem	1408
16.8.1	Transiente Vorgänge	1408
16.8.2	Verstellbare Verdichterleitschaufeln	1413
16.8.3	Variable Abblaseventile am Niederdruckverdichter	1416
16.8.4	Abblaseventile am Hochdruckverdichter	1417
16.9	Triebwerksvereisungsschutz	1421
16.9.1	Allgemeines zur Eisbildung und zur Enteisung	1421
16.9.2	Vereisungsschutz für den Nasenkonus oder Spinner	1423
16.9.3	Vereisungsschutz für die Gondeleinlauflappen	1424
16.10	Gondelbelüftung und Schutz vor Überhitzung und Feuer	1426
16.10.1	Kühlung und Belüftung	1426
16.10.2	Prävention, Detektion und Löschung von Triebwerksfeuern	1427

Anhang A

Thermodynamik thermischer Turbomaschinen sowie idealer und realer Arbeitsfluide 1437

A.1	Thermodynamik thermischer Turbomaschinen	1437
A.1.1	Energieerhaltungssatz bei Turbomaschinen	1437
A.1.2	Gibbssche Hauptgleichung bei Turbomaschinen	1441
A.1.3	Wirkliche und polytrope Zustandsänderungen	1444
A.1.4	Grundlegende Definitionen von Wirkungsgraden	1447
A.1.4.1	Totaler Wirkungsgrad	1447
A.1.4.2	Statischer Wirkungsgrad	1448
A.1.4.3	Polytroper Wirkungsgrad	1449
A.1.4.4	Isentroper Wirkungsgrad	1450
A.1.4.5	Vergleich zwischen polytrophen und isentropen Wirkungsgraden	1453
A.1.4.6	Erhitzungsfaktor	1458
A.1.4.7	Wirkungsgrade passiver Turbomaschinenteile	1459
A.1.4.8	Mechanischer Wirkungsgrad	1461
A.1.4.9	Maschinenwirkungsgrad	1462

XXVIII Inhaltsverzeichnis

A.2	Thermodynamik idealer und realer Arbeitsfluide	1462
A.2.1	Zustandsgrößen, Zustandsgleichungen und Zustandsänderungen	1462
A.2.1.1	Zustandsgrößen	1462
A.2.1.2	Zustandsgleichungen	1464
A.2.1.3	Zustandsänderungen und spezifische Wärmekapazitäten	1465
A.2.2	Ideale Gase und ideale Gasgemische	1469
A.2.3	Berechnung isentroper und polytroper Zustandsänderungen	1477
A.2.4	Mittelwertbildung der spezifischen Wärmekapazitäten	1482
A.2.5	Zusammenhang zwischen isentropen und polytrophen Wirkungsgraden	1488
A.2.6	Reale Arbeitsfluide	1490
A.2.6.1	Grundlagen zu den Unterschieden zwischen idealen und realen Gasen	1490
A.2.6.2	Die Zustandsgleichung realer Gase	1496
A.2.7	Einige Eigenschaften heißer Verbrennungsgase	1497
A.3	Einige Grundlagen rechtsläufiger Kreisprozesse	1502
A.3.1	Carnotprozess und Carnotfaktor	1503
A.3.2	Thermodynamische Mitteltemperatur	1506

Anhang B

Kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase		1511
B.1	Schallgeschwindigkeit	1511
B.2	Kompressibilität	1514
B.2.1	Dichteänderung	1514
B.2.2	Machzahl	1517
B.2.3	Temperaturerhöhung	1520
B.3	Machsche Linie, Verdichtungsstoß und Expansionswelle	1521
B.4	Formeln für kompressible, isentrope Strömungen idealer Gase	1528
B.4.1	Thermische und kalorische Zustandsgleichung	1528
B.4.2	Alternative Formen der Energiegleichung	1530
B.5	Stetig verlaufende isentrope Strömungen	1532
B.5.1	Eulersche Bewegungsgleichung und Bernoulligleichung	1532
B.5.2	Kontinuitätsgleichung	1535
B.5.3	Stromdichte	1537
B.5.4	Ausfluss aus einem Kessel	1539
B.5.5	Kritische Werte	1541
B.5.6	Kritische Machzahl	1543
B.5.7	Massenstromparameter	1544
	B.5.7.1 Massenstromparameter 1. Art	1544
	B.5.7.2 Massenstromparameter 2. Art	1545
	B.5.7.3 Massenstromparameter 3. Art	1546
	B.5.7.4 Massenstromparameter 4. Art	1546

Anhang C	
Impulssatz für stationäre Strömungen	1551
C.1 Impuls	1551
C.2 Masse	1551
C.3 2. Newtonsches Axiom	1551
C.4 Substanzielle Änderung von Strömungsgrößen	1552
C.5 Allgemeiner Impulssatz der Mechanik	1557
C.6 Schwerpunktsatz der Mechanik	1558
C.7 Differenzialquotient nach Leibniz	1559
C.8 Reihenentwicklung nach Taylor	1559
C.9 Äußere Kräfte	1562
C.10 Gewichtskraft	1562
C.11 Druckkräfte an den freien Flächen	1563
C.12 Stütz- oder Haltekräfte	1564
C.13 Wahl der Kontrollfläche	1565
Anhang D	
Umrechnungsfaktoren zwischen physikalischen Dimensionen aus dem englisch/amerikanischen und dem deutschen Sprachbereich	1571
Anhang E	
Daten ausgeführter Flugtriebwerke	1575
Anmerkungen zur Bezeichnung von Triebwerken	1584
Amerikanische Militärtriebwerke	1584
Zivile Triebwerke	1585
Anhang F	
Bestimmung der thermodynamischen Eigenschaften von Verbrennungsgasen	1589
F.1 Reaktionsstöchiometrie	1589
F.2 Spezifische Wärmekapazität	1590
F.3 Molmasse und spezifische Gaskonstante	1592
F.4 Enthalpieänderung	1593
F.5 Entropiefunktion	1595
F.6 Der FORTRAN 95 Quellcode	1598
Literatur	1603
Sachverzeichnis	1617