

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Hans Rick	
1.1	Vorstellung von Gasturbinen und Flugantrieben	1
1.2	Grundbegriffe und Hauptparameter der Arbeitsprozesse	5
1.3	Bauweisen von Gasturbinen und Flugantrieben	12
1.4	Kenngößen und Entwicklungstendenzen	26
1.4.1	Umwelt und Klimaschutz	26
1.4.2	Sicherheit von Flugantrieben	32
1.5	Multidisziplinäre Auslegung und Simulationstechnik	33
1.6	Historie und Entwicklungstendenzen	37
	Literatur	45
2	Arbeitsprozesse von Gasturbinen und Flugtriebwerken	53
	Hans Rick	
2.1	Elementare gasdynamische Grundlagen	53
2.1.1	Erhaltungssätze der gasförmigen Fluide	53
2.1.2	Isentrope, unter- und überkritische Strömung	60
2.1.3	Wärmezufuhr im Strömungskanal	65
2.1.4	Senkrechter Verdichtungsstoß	72
2.1.5	Schiefe und rotationssymmetrische Verdichtungsstöße	75
2.1.6	Impulssatz und Netto-Schub bei Luftstrahltriebwerken	79
2.1.7	Impulssatz und installierter Schub bei Flugtriebwerken	81
2.2	Standard-Arbeitsprozesse ideal und real	85
2.2.1	Ideale und halbideale Gasturbinen-Arbeitsprozesse	85
2.2.2	Standard-Arbeitsprozesse von Turboshaft und Turbojet	96
2.3	Arbeitsprozess von Turboshaft und Turbojet	105
2.3.1	Parameterstudie von Arbeitsprozessen und Vorgabewerte	105
2.3.2	Einlaufströmung (0-1-2)	108
2.3.3	Turboverdichter (2-3)	114
2.3.4	Brennkammer (3-4)	117
2.3.5	Hochdruckturbine gekühlt (4-44)	120

2.3.6	Nutzleistungsturbine PT (44-5) mit Abgaskanal (5-8)	123
2.3.7	Turbojet-Triebwerk TJ mit Schubdüse N (7-8-9)	126
2.4	Ähnlichkeit, Leistung, Schub und Kenngrößen	129
2.4.1	Leistungskennwerte für Turboshaft-Gasturbinen	129
2.4.2	Kennwerte für Flugtriebwerke	130
2.5	Turbojet- und Ramjet-Triebwerke	141
2.5.1	Einstrom-Turbojet ohne Nachbrenner	141
2.5.2	Einstrom-Turbojet mit Nachbrenner	150
2.5.3	Ramjet- und Scramjet-Triebwerke	156
2.6	Propeller, Turboprop und Turbofan mit hohem Bypass	166
2.6.1	Propeller, Turboprop und Propfan	169
2.6.2	Turbofan mit hohem Bypass-Verhältnis	185
2.6.3	Entwicklung und Bauweisen von Turbofan-Triebwerken	187
2.6.4	Turbofan-Triebwerke mit Mischung	193
2.7	Turbofan mit kleinem Bypass und Nachbrenner	198
2.7.1	Auslegung von Turbofan-Bypass-Triebwerken mit kleinem Bypassverhältnis und Mischung	199
2.7.2	Auslegung von Turbofan-Triebwerken mit Mischung und Nachbrenner	205
2.8	Turboshaft-Gasturbinen in Luftfahrt-, Energie- und Marine-Technik	209
2.8.1	Turboshaft-Gasturbinen und Auslegungsparameter	210
2.8.2	Turboshaft-Triebwerke für Hubschrauber und Turboprop	213
2.8.3	Turboshaft-Gasturbinen und Aeroderivate in der Energietechnik	219
2.8.4	Beispiele zu Gasturbinen in Energie- und Kraftwerkstechnik	224
2.9	Turboshaft-Gasturbine mit Wärmetauscher	232
2.9.1	Arbeitsprozess einer Turboshaft-Gasturbine mit Wärmetauscher	232
2.9.2	Auslegung von Turboshaft-Gasturbinen mit Wärmetauscher	233
2.9.3	Leistungsverhalten einer Turboshaft-Gasturbine mit Rekuperator	241
	Literatur	243
3	Einläufe für verschiedene Flugbereiche	251
	Hans Rick	
3.1	Einlaufarten und Betriebszustände	251
3.1.1	Unterschalleinlauf	253
3.1.2	Überschall-Einlauf-Diffusoren	254
3.1.3	Einlaufkenngrößen	256
3.1.4	Überschalleinläufe mit Außen- und Innenverdichtung	261
3.2	Betriebsverhalten von Unterschalleinläufen	265

3.2.1	Einläufe der Turbofan-Triebwerke bei Gondleinbau	265
3.2.2	Einläufe von Turboprop-Triebwerken	268
3.2.3	Einläufe von Hubschraubern- und V/STOL-Triebwerken	270
3.3	Betriebsverhalten von Überschalleinläufen	278
3.3.1	Stabilitätsverhalten unter- bis überkritischer Einläufe	278
3.3.2	Ungleichförmige Zuströmung zum Einlauf und Grenzschichten	281
3.3.3	Betriebsbereiche von Überschalleinläufen	284
3.3.4	Startverhalten von Überschalleinläufen	285
3.3.5	Hammershock bei Überschalleinläufen	289
	Literatur	290
4	Turbomaschinen-Komponenten	293
	Hans Rick	
4.1	Gemeinsame Grundlagen zu Turbomaschinen	293
4.1.1	Die Strömungsmaschinen Turboverdichter und Turbinen	293
4.1.2	Hauptgleichung der Turbomaschinenstufe (Euler-Gleichung)....	297
4.1.3	Strömungsphänomene und Bewegungsgleichungen	302
4.2	Turboverdichter	306
4.2.1	Einleitung und Verdichterbauarten	306
4.2.2	Verdichterstufe im Mittelschnitt, Verluste und Kenngrößen	308
4.2.3	Kenngrößen von Verdichterstufen und Kennlinien	317
4.2.4	Gitterströmung, Kenngrößen, Verluste and Bauweisen	323
4.2.5	3D-Strömung, Stromlinienmethoden und Radialverdichter	344
4.2.6	Betriebsverhalten und Kennfelder von ein- und mehrstufigen Verdichtern	366
4.2.7	Betriebsverhalten in Stabilitätsgrenzbereichen	399
4.2.8	Betriebsverhalten und Anpassung mehrstufiger Verdichters	417
4.2.9	Entwicklungsstufen von Turboverdichtern	430
4.2.10	Aeromechanische Gestaltung und Entwicklungstrend	457
4.3	Turbinen	469
4.3.1	Vorstellung und Auslegung von Axial-Turbinen	469
4.3.2	Turbinenstufe ungekühlt im Mittelschnitt mit $u_1 > u_2$	474
4.3.3	Turbinen-Kenngrößen	484
4.3.4	Auslegungs- und Belastungsdiagramme von Turbinenstufen sowie Smith-Diagramm	487
4.3.5	Mehrdimensionale Turbinenstufenrechnung in der S2-Ebene	492
4.3.6	Kennfeld ungekühlter Turbinen	496
4.3.7	Turbinenstufe gekühlt, Kenngrößen und Wirkungsgrade	503
4.3.8	Kennfelder und Rechenmodelle gekühlter Turbinen	518
	Literatur	525

5 Brennkammern von Gasturbinen und Flugtriebwerken	541
Hans Rick	
5.1 Funktion, Bauweisen und Kenngrößen	541
5.1.1 Aufbau und Funktion der Brennkammer	543
5.1.2 Brennkammertypen und Bauweisen	546
5.1.3 Kenngrößen und Forderungen an Brennkammern	550
5.2 Entwicklungsstufen und Tendenzen	561
5.2.1 Schadstoffemission	561
5.2.2 Brennkammer-Funktion und -Bauweisen	564
5.2.3 Bedingungen für NO _x -Bildung	569
5.2.4 Entwicklungstendenzen	571
5.2.5 Brennkammern in Gasturbinen der Energietechnik	572
Literatur	578
6 Schubdüsen	585
Hans Rick	
6.1 Isentrope Düsenströmung	586
6.2 Verlustbehaftete eindimensionale Düsenströmung	589
6.2.1 Korrekturkoeffizienten bei verlustbehafteter Düsenströmung	590
6.2.2 Konvergent-Düse und Konvergent-Divergent im Vergleich	596
6.3 Nicht angepasste Konvergent-Divergent-Düse	596
6.4 Bauweisen von Unterschall-Überschall-Düsen	601
6.4.1 Schubdüsen von Unterschall-Flugzeugen	601
6.4.2 Schubdüsen von Überschall-Flugzeugen	605
Literatur	616
7 Betriebsverhalten und Simulation von Turbojet und Turbohaft-Gasturbinen der Flug-, Energie- und Fahrzeugtechnik	621
Hans Rick	
7.1 Zusammenarbeit der Komponenten	621
7.1.1 Vereinfachte, ähnlichkeitsgerechte Kennfeldbestimmung	623
7.1.2 Gesamtkennfeld des Turbojet vereinfacht betrachtet	627
7.1.3 Schub- und Verbrauchskennfelder	629
7.1.4 Iterative, vereinfachte Teillast-Syntheserechnung über Ähnlichkeitskennfelder der Komponenten	632
7.2 Syntheserechnung und Simulation des Turbojet	636
7.2.1 Numerischer Syntheserechnung am Beispiel Turbojet TJ	636
7.2.2 Iterationsalgorithmus bei numerischen Syntheserechnungen GTSYN	640
7.2.3 Betriebsverhalten im Flugbereich	644
7.2.4 Hinweise zu numerischen Problemen der Syntheserechnung	646
7.3 Syntheserechnung und Simulation des Turbohaft	649
7.3.1 Teillastberechnung von Turbohaft-Gasturbinen	650

7.4	Betriebsverhalten und Simulation der Wärmetauscher-Gasturbinen	658
7.4.1	Turboshaft-Gasturbinen mit Wärmetauscher und Simulation	659
7.4.2	Turboshaft-Gasturbinen mit Wärmetauscher für Fahrzeuge und Energiepakete	665
7.5	Turboshaft-Gasturbine, Auslegungsmethodik und Optimierung	679
7.5.1	Turboshaft- Gasturbinen der mittleren Leistungsklasse	679
7.5.2	Parameter-Auslegungsstudie für eine Turboshaft-Gasturbine und Optimierung	679
	Literatur	693
8	Betriebsverhalten und Simulation von Turbofan und Kombinationstriebwerken für sub-, super- bis hypersonische Flüge	699
	Hans Rick	
8.1	Auslegung und multidisziplinäre Simulation	700
8.1.1	Struktur multidisziplinärer Simulationsprogramme zum Betriebsverhalten	701
8.1.2	Anforderungen an GTSSD-Vorauslegungsverfahren	704
8.2	Betriebsverhalten und Simulation von Hoch-Bypass-Turbofan	709
8.2.1	Syntheserechnung GTSYN und Betriebsverhalten von TF	709
8.2.2	Multidisziplinäre Simulation GTSSD zur Analyse und Vorauswahl von Turbofan-Triebwerken	715
8.2.3	Auslegung und Betriebsverhalten von Hoch-Bypass-Turbofan . . .	724
8.2.4	Turbofan-Triebwerke mit hohem BPR ohne und mit Getriebe	738
8.2.5	Multidisziplinäre Turbofan-Vorauslegung mit Parametervariation und Optimierung	743
8.2.6	Turbofan und Propfan mit neuen Technologien	753
8.2.7	Konzepte von fortschrittlichen Turbofan-Triebwerken	758
8.2.8	Technologieprogramme zur Brennstoffeffizienz und zur Emissionsverringerng im Luftverkehr	766
8.3	Turbofan-Triebwerke mit kleinem Bypassverhältnis und Nachbrenner . .	769
8.3.1	Betriebs- und Teillastverhalten von Turbofan mit $BPR = 0,3$ und $1,0$ im Vergleich	769
8.3.2	Vollastbetrieb der Turbofan-Triebwerke TFM und TFMAB	775
8.4	Ramjet- und Scramjet-Triebwerke	777
8.4.1	Supersonische Ramjet-Triebwerke	778
8.4.2	Hypersonische Ramjet- und Scramjet-Triebwerke	786
8.5	Antriebe von Überschall-Verkehrsflugzeugen	795
8.5.1	Triebwerke für SST-Verkehrsflugzeuge der 1. Generation	795
8.5.2	Turbojet-Triebwerk des Mach-2-SST-Concorde	798
8.5.3	Triebwerke für SST-Verkehrsflugzeuge der 2. Generation	803

8.6	VCE-Triebwerke für Überschall-Verkehrsflugzeuge	805
8.6.1	Bedarf und Anforderungen an künftige SST-Triebwerke	806
8.6.2	Konventionelles VCE-Turbofan-Triebwerk	809
8.6.3	VCE-Turbofan-Turbojet-SST-Triebwerk	811
8.6.4	VCE-Turbofan-SST-Triebwerk für Mach-3+	815
8.7	Kombinationsantriebe für Über- und Hyperschallflüge	817
8.7.1	Turbo-Ramjet-Kombinationstriebwerk TRJ (<i>Turbo-Ramjet</i>)	817
8.7.2	Turbojet-Rakete-Kombinationstriebwerk TJR (<i>Turbojet-Rocket</i>)	820
8.7.3	Hybrid-Turbo-Rakete-Kombinationstriebwerk SABRE	822
8.7.4	Kombinations-Antriebssysteme mehrerer Generationen	822
8.8	Antriebe für Hyperschall-Raumtransporter HST	825
8.8.1	Antriebssysteme für den Über- und Hyperschallflug	825
8.8.2	Auslegung von Hyperschall-Kombinations-Triebwerken	827
	Literatur	843
9	Instationäres Betriebsverhalten von Gasturbinen und Flugantrieben	855
	Hans Rick	
9.1	Instationäres Betriebsverhalten und Simulation	855
9.2	Betriebsverhalten von Turboshaft-Gasturbinen	860
9.3	Instationäres Betriebsverhalten und Sekundäreffekte	863
9.3.1	Wärmeübergänge und Wärmeströme sowie Bauteilmodelle	865
9.3.2	Rechenmodelle mit Wärmetauscher-Elementen	868
9.3.3	Einflüsse von Spalten und Modellierung	870
9.3.4	Spaltkontrolle ACC (<i>Active Clearance Control</i>)	871
9.3.5	Strömungs-Ungleichförmigkeiten („Distortionseffekte“)	873
9.4	Betriebsverhalten und Simulation von Hubschrauber- Turboshaft-Gasturbinen	873
9.4.1	Syntheserechnung zum instationären Betrieb von Hubschrauber-Turboshaft-Gasturbinen	875
9.4.2	Simulation einer Beschleunigung beim Turboshaft	877
9.4.3	Simulation eines Triebwerksausfalls beim Hubschrauber	877
9.4.4	„Kalt“-„Heiß“-Beschleunigung beim Durchstarten	880
9.5	Betriebsverhalten und Simulation von Turbofan-Triebwerken	883
9.5.1	Transientes Betriebsverhalten und Sekundäreffekte bei Turbofan mit kleinem Bypass	883
9.5.2	Transientes Betriebsverhalten und Sekundäreffekte bei Turbofan mit großem Bypass	893
9.5.3	Starten des Triebwerks und Anlaßstörungen	899

9.5.4	Beeinflussung des transienten Betriebsverhaltens von Turbofan-Triebwerken.....	904
9.5.5	Instationäre Stabilitätsüberprüfung mit <i>Fuel-Spiking</i>	910
9.5.6	Triebwerksregelung und Brennstoffzumessung mit FADEC-Systemen und EEC.....	912
	Literatur.....	917
	Anhang	925
	Nomenklatur	955
	Umrechnungen (<i>Conversions</i>)	979
	Literaturverzeichnis (Fachbücher und Buch-Klassiker)	983
	Sachverzeichnis	991