

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
	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
<b>2</b>	<b>Arbeitsprozesse von Gasturbinen und Flugtriebwerken</b>	<b>53</b>
	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 Aero derivative 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	<b>Einläufe für verschiedene Flugbereiche .....</b>	<b>251</b>
	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 Gondelbau	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	<b>Turbomaschinen-Komponenten</b>	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 und 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

<b>5 Brennkammern von Gasturbinen und Flugtriebwerken .....</b>	<b>541</b>
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 $\text{NO}_x$ -Bildung .....	569
5.2.4 Entwicklungstendenzen .....	571
5.2.5 Brennkammern in Gasturbinen der Energietechnik .....	572
Literatur .....	578
<b>6 Schubdüsen .....</b>	<b>585</b>
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
<b>7 Betriebsverhalten und Simulation von Turbojet und Turboshaft-Gasturbinen der Flug-, Energie- und Fahrzeugtechnik .....</b>	<b>621</b>
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 Turboshaft .....	649
7.3.1 Teillastberechnung von Turboshaft-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	<b>Betriebsverhalten und Simulation von Turbofan und Kombinationstriebwerken für sub-, super- bis hypersonische Flüge . . . . .</b>	<b>699</b>
	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 Emissionsverringierung 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	<b>Instationäres Betriebsverhalten von Gasturbinen und Flugantrieben .....</b>	<b>855</b>
	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