

---

# 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<br>kleinem Bypassverhältnis und Mischung . . . . . | 199        |
| 2.7.2    | Auslegung von Turbofan-Triebwerken mit<br>Mischung und Nachbrenner . . . . .                     | 205        |
| 2.8      | Turboshaft-Gasturbinen in Luftfahrt-, Energie- und<br>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<br>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<br>mit Wärmetauscher . . . . .                        | 232        |
| 2.9.2    | Auslegung von Turboshaft-Gasturbinen mit Wärmetauscher . . . . .                                 | 233        |
| 2.9.3    | Leistungsverhalten einer Turboshaft-Gasturbine<br>mit Rekuperator . . . . .                      | 241        |
|          | Literatur . . . . .  | 243        |
| <b>3</b> | <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 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<br>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        |
| <b>4</b> | <b>Turbomaschinen-Komponenten .....</b>  | <b>293</b> |
|          | 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<br>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<br>Turbinenstufen sowie Smith-Diagramm ..... | 487        |
| 4.3.5    | Mehrdimensionale Turbinenstufenrechnung<br>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>   | 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 $\text{NO}_x$ -Bildung  | 569 |
| 5.2.4 Entwicklungstendenzen   | 571 |
| 5.2.5 Brennkammern in Gasturbinen der Energietechnik  | 572 |
| Literatur   | 578 |
| <b>6 Schubdüsen</b>   | 585 |
| Hans Rick   |     |
| 6.1 Isentrope Düsenströmung   | 586 |
| 6.2 Verlustbehaftete eindimensionale Düsenströmung  | 589 |
| 6.2.1 Korrektorkoeffizienten 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> | 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 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<br>und Simulation . . . . .  | 659        |
| 7.4.2    | Turboshaft-Gasturbinen mit Wärmetauscher für<br>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<br>und Optimierung . . . . .  | 679        |
|          | Literatur . . . . .   | 693        |
| <b>8</b> | <b>Betriebsverhalten und Simulation von Turbofan und<br/>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<br>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<br>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<br>und mit Getriebe . . . . .  | 738        |
| 8.2.5    | Multidisziplinäre Turbofan-Vorauslegung mit<br>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<br>Emissionsverringering im Luftverkehr . . . . .                                  | 766        |
| 8.3      | Turbofan-Triebwerke mit kleinem Bypassverhältnis und Nachbrenner . .  | 769        |
| 8.3.1    | Betriebs- und Teillastverhalten von Turbofan<br>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<br>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        |
| <b>9</b> | <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 („Distortioneffekte“) . . . . .                                  | 873        |
| 9.4      | Betriebsverhalten und Simulation von Hubschrauber-<br>Turboshaft-Gasturbinen . . . . .          | 873        |
| 9.4.1    | Syntheserechnung zum instationären Betrieb<br>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<br>bei Turbofan mit kleinem Bypass. . . . .   | 883        |
| 9.5.2    | Transientes Betriebsverhalten und Sekundäreffekte<br>bei Turbofan mit großem Bypass. . . . .    | 893        |
| 9.5.3    | Starten des Triebwerks und Anlaßstörungen . . . . .   | 899        |

---

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

Gasturbinen und Flugantriebe

Grundlagen, Betriebsverhalten und Simulation

Rick, H.

2013, XVIII, 1009 S. 616 Abb., 162 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-540-79445-5