

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
2.1	Maßgebende Randbedingungen und technologische Beschränkungen bei Verdichtern	3
2.2	Rolle und Relation der Gestaltungsgrundsätze	9
2.3	Thermodynamische Grundlagen	10
2.4	Aerodynamische Grundlagen	18
2.5	Ähnlichkeitsbedingungen	25
2.6	Kennfeld und Arbeitslinie	29
<b>3</b>	<b>Zeitliche Entwicklung der Verdichter-Auslegungsparameter</b>	<b>35</b>
3.1	Statistische Erfassung und Analyse existierender Verdichter	35
	– Methodik der Datenerfassung	35
	– Größeneinfluss	36
	– Einführungszeitraum EIS	39
	– Einfluss der Re-Zahl	40
	– Normierte polytrope Wirkungsgrade	45
3.2	Statistik der Verdichterdaten	46
3.2.1	Korrelationsparameter	46
3.2.2	1-stufige Fans von zivilen Turbofans und Mantelpropfans	49
3.2.3	Mehrstufige ND-Verdichter militärischer Turbofans	59
3.2.4	„Booster“-Stufen und MD-Verdichter von Turbofans und Mantelpropfans	66
3.2.5	HD-Verdichter von Turbofans und Mantelpropfans	74
3.2.6	Axial-/Radialverdichter und mehrstufige Radialverdichter für kleine Turbofans und Wellenleistungstriebwerke	82
	3.2.6.1 Allgemeines	82
	3.2.6.2 Axialteile	83
	3.2.6.3 Radialverdichter	88
3.2.7	Verdichterkennfelder	93
	3.2.7.1 Normierung	93
	3.2.7.2 Variable Geometrie	99

<b>4</b>	<b>Integration und Dimensionierung</b>	101
4.1	Vorbemerkung	101
4.2	Zivile Turbofans	102
4.2.1	Überblick	102
4.2.2	1-stufige Fans für Turbofans ohne Getriebe mit 2- oder 3-welligem Kerntriebwerk	105
4.2.3	„Langsam“ laufende „Booster“-Stufen bei 2-Wellen- Turbofans	109
4.2.4	Hochtourige „Booster“-Stufen bei Turbofan mit Getriebe	111
4.2.5	HD-Verdichter von 2- und 3-Wellen-Turbofans	114
4.2.5.1	Allgemeines	114
4.2.5.2	HD-Verdichter mit 1-stufiger HD-Turbine für zivile 2-Wellen-Triebwerke (Fall a)	115
4.2.5.3	HD-Verdichter mit 2-stufiger HD-Turbine (Fall b)	117
4.2.6	ND- und HD-Verdichter in Kerntriebwerken von zivilen 3-Wellen-Triebwerken	120
4.2.7	Verdichter kleiner Turbofans für Geschäftsflugzeuge	121
4.3	MD- und HD-Verdichter von großen Turboprops	123
4.4	ND- und HD-Verdichter für militärische Turbofans mit Nachbrenner	126
4.5	Ax/R- oder 2R-Verdichter von Wellenleistungstriebwerken der Klasse 1000 kW für Hubschrauber, Kleintransporter und Geschäftsflugzeuge	130
4.6	Schlussbemerkung	131
<b>5</b>	<b>Aerodynamik des Axial- und Radialverdichters</b>	133
5.1	Vorbemerkungen zu Axialverdichtern	133
5.2	Zusammenhänge bei der Durchströmung von Axialverdichtern	140
5.2.1	Drallgesetze	140
5.2.2	Strömung im Meridianschnitt	146
	– Methode der Meridianstromlinienkrümmung	147
	– Geschlossener Ansatz für Sonderfall $R = 50\%$	149
	– „Actuator disk theory“	152
	– Singularitätenverfahren	156
	– Methode der finiten Elemente	160
5.2.3	Strömung im Tangentialschnitt – Geschwindigkeitsdreiecke und aerodynamische Schaufelkräfte	160
5.2.3.1	Beziehungen zwischen Stromflächen und Zylinderschnitten	160
5.2.3.2	Geschwindigkeitsdreiecke und aerodynamische Kräfte auf Zylinderflächen	163
5.2.4	Verlustkorrelationen	167
5.2.4.1	Übersicht	167
5.2.4.2	Profilverluste bei Unterschall	171
5.2.4.3	Supersonische Verluste	176
5.2.4.4	Verluste im transsonischen Bereich	180

5.2.4.5	Verluste durch Seitenwandreibung .....	185
5.2.4.6	Rand (Sekundär)- und Spaltverluste .....	187
5.2.4.7	Spaltumströmung .....	195
5.2.4.8	Reibung an Leitgitter-Innenringen .....	199
5.2.5	Seitenwandgrenzschichten .....	202
5.2.5.1	Allgemeines .....	202
5.2.5.2	Schaufelkraftdefizite .....	204
5.2.5.3	Statistische Daten zu Seitenwandgrenzschichtdicken .....	209
5.2.5.4	Theorie der Seitenwand-Grenzschichtentwicklung	211
5.2.5.5	Stabilität der Seitenwandgrenzschicht bei Gittern mit Radialspalt .....	218
5.2.5.6	Schlussbemerkung .....	220
5.2.6	Radiale Mischung .....	220
5.2.7	Wirkungsgrade und Abreißgrenzen .....	232
5.2.7.1	Stufenwirkungsgrad bei inkompressibler und kompressibler Strömung .....	232
5.2.7.2	Abreißreserve .....	240
5.2.7.3	Einfluss des Radialspiels auf Abreißreserve und Wirkungsgrad .....	250
5.2.7.4	Einfluss der Stator-Oberflächenstruktur über den Laufschaufeln auf Abreißreserve und Wirkungsgrad .....	253
5.2.7.5	Kombination günstigen Wirkungsgrades mit akzeptabler Abreißreserve .....	254
5.2.7.6	Einfluss der Stufenbelastung auf Abreiß-/ Pumpgrenze mehrstufiger Verdichter .....	258
5.2.8	Beurteilung und Vorausberechnung von Wirkungsgraden mehrstufiger Verdichter .....	261
5.3	3-dimensionale, reibungsbehaftete, kompressible Durchströmung .	270
5.3.1	Navier-Stokes-Gleichungen und Turbulenzmodellierung ..	270
5.3.1.1	Vorbemerkungen .....	270
5.3.1.2	Phänomene der 3D-Strömung .....	270
5.3.1.3	Bewegungsgleichungen .....	271
5.3.1.4	Turbulenzmodellierung .....	275
5.3.1.5	Rückblick auf radiale Mischung .....	277
5.3.1.6	Euler-Gleichungen .....	278
5.3.1.7	Praktische Durchführung der 3-dimensionalen Rechnung .....	279
5.3.1.8	Beispiele für Ergebnisse zur 3-dimensionalen Berechnung von Gittern .....	281
5.3.1.9	Bestehende Problemzonen .....	286
5.3.1.10	Instationäre Gitteraerodynamik .....	289
5.3.2	3D-Effekte bei der Gestaltung der Schaufeln .....	292
5.4	Radialverdichter .....	301
5.4.1	Vorbemerkungen .....	301
5.4.2	Ringraum- bzw. Laufradgestaltung .....	301

5.4.3	Rotordurchströmung .....	304
5.4.3.1	Überblick .....	304
5.4.3.2	Reibungsfreie Strömung .....	304
5.4.3.3	Grenze der Anwendbarkeit der Theorie der reibungsfreien Strömung .....	307
5.4.3.4	Abschätzung der aerodynamischen Schaufelbelastung .....	309
5.4.3.5	„Strahl-Dellen“- bzw. „jet-wake“- Strömungsprofil am RV-Radaustritt .....	312
5.4.3.6	Blockage im RV-Rotor durch „Totwasser“ und Seitenwandgrenzschichten .....	320
5.4.3.7	Gesichtspunkte zur Durchströmung und Gestaltung der axialen Rotor-Eintrittspartie ..	323
5.4.4	Minderleistungsfaktor .....	324
5.4.5	Diffusoren .....	327
5.4.5.1	Diffusor-Bauweisen .....	327
5.4.5.2	Diffusor-Durchströmung .....	329
5.4.6	Wirkungsgrad .....	332
5.4.7	Moderne Berechnung der RV-Durchströmung nach NS-3D-Methodik .....	337
<b>6</b>	<b>Schaufel-/Profilgestaltung .....</b>	<b>339</b>
6.1	Axialverdichter .....	339
6.1.1	Vorbemerkungen .....	339
6.1.2	Start- und Randbedingungen für die Gitter-/Profilberechnung .....	341
6.1.3	Gitter bei inkompressibler Anströmung mit konventioneller Profilgestaltung (Skelettlinie + Grundprofil) im Rückblick .....	345
6.1.3.1	Berechnung nach konformer Abbildung .....	345
6.1.3.2	Berechnung nach der Singularitätenmethode ....	352
6.1.3.3	Berechnung nach NACA-Gittermessungen .....	359
6.1.4	Gittereigenschaften bei inkompressibler und subsonischer bis transsonischer Anströmung unter Windkanalbedingungen und im Verdichter .....	368
6.1.5	Bemerkungen zu Gittern für transsonische und supersonische Anströmung .....	374
6.1.6	Gitterberechnung nach 3D-Navier-Stokes-Methode .....	379
6.1.7	Festlegung wichtiger Gitterparameter bei mehrstufigen Verdichtern .....	381
6.2	Radialverdichter .....	384
<b>7</b>	<b>Betriebsverhalten .....</b>	<b>389</b>
7.1	Vorbemerkungen .....	389
7.2	Axialverdichter .....	390
7.2.1	Kennlinien von Verdichterstufen bei inkompressibler Strömung .....	390

7.2.2	Verdichterstufen bei kompressibler Strömung .....	411
7.2.3	Kombination von Stufenkennfeldern zum Gesamtkennfeld eines mehrstufigen Verdichters (Stage Stacking) .....	433
7.2.4	Betriebsverhalten im instabilen Bereich .....	440
7.2.4.1	Vorbemerkungen .....	440
7.2.4.2	Rotierendes Abreißen (Rotating Stall) .....	440
7.2.4.3	Eintritt in „abruptes“ rotierendes Abreißen oder Pumpen .....	449
7.2.4.4	Beobachtungen zu rotierendem Abreißen bei Radialstufen mit axialer Zuströmung .....	455
7.2.5	Eintrittsstörungen .....	455
7.2.5.1	Vorbemerkungen .....	455
7.2.5.2	Stationäre Eintrittsstörungen .....	457
	– Druckstörungen .....	457
	– Temperaturstörungen .....	468
	– Kombinierte zirkulare Störungen .....	471
	– Radiale Druck- und Temperaturstörungen .....	472
7.2.5.3	Koppelungseffekte .....	472
7.2.5.4	Instationäre Störungen .....	474
	– Instationäre Druckstörung bzw. Turbulenz im Einlauf .....	474
	– Instationäre Temperaturstörungen .....	476
7.2.5.5	Verschiedenes zur Problematik des Pumpens .....	477
	– Exzentrizität durch Manöverlasten .....	477
	– Kompensierendes Gehäuse zur aktiven Beeinflussung des Radialspiels .....	478
	– Aktive Spaltkontrolle (Option) .....	479
	– Aktive Pumpverhütung (active surge control $\hat{=}$ ASC) .....	480
7.3	Betriebskennlinien von Radialstufen .....	483
7.3.1	Vorbemerkungen .....	483
7.3.2	Stufenkennlinie bei inkompressibler Strömung .....	487
7.3.3	Stufenkennfeld bei kompressibler Strömung .....	489
<b>8</b>	<b>Akustik</b> .....	491
8.1	Überblick .....	491
8.2	Akustisch relevante Definitionen und Parameter .....	495
8.3	Überblick der Lärmquellen bei Verdichtern .....	497
	– Tonlärm bei freier Zuströmung .....	498
	– Schalltransport durch Ringkanäle .....	499
	– Interaktions-Tonlärm .....	500
	– Transmission und Reflexion .....	501
	– Breitbandlärm .....	501
	– Eintrittsstörungen .....	501
8.4	Analytische Ansätze und experimenteller Hintergrund zur Berechnung der Schallerzeugung .....	502

8.4.1	Vorbemerkungen .....	502
8.4.2	Akustische Grundgleichungen .....	503
8.4.3	Tonlärm an Fan-Rotoren .....	506
8.4.4	Schallausbreitung in Ringkanälen .....	512
8.4.5	Interaktionslärm an Gittern .....	518
8.4.6	Transmission und Reflexion von Schallwellen an Gittern ..	526
8.4.7	Breitbandlärm .....	530
8.4.8	Lärm bei Eintrittsstörungen .....	536
8.5	Ausblick .....	538
<b>9</b>	<b>Aeroelastik</b>	
	<b>Flattern und erzwungene Schaufelschwingungen</b> .....	541
9.1	Vorbemerkungen und Phänomene .....	541
9.2	Grundgleichungen und Schwingungsformen .....	541
9.3	Selbst erregte Schwingungen (Flattern) .....	547
9.3.1	Überblick .....	547
9.3.2	Schwingende Laufschaufeln in stationärer (ungestörter) Strömung, d. h. Flattern .....	550
9.3.3	Moderne Methodik der Flutteranalyse .....	562
9.4	Erzwungene Schwingungen (Resonanz) .....	563
9.4.1	Allgemeines .....	563
9.4.2	Resonanzanalyse bei Nachlaufdellen/Störungen in der Anströmung .....	566
9.4.3	Moderne Methodik der Resonanzkontrolle .....	578
9.5	Aerodynamisch erregte Systemschwingungen bei mehrstufigen Axialverdichtern .....	579
9.6	Aerodynamisch erregte Schwingungen bei Radialverdichtern ....	583
9.6.1	Situation am Laufradeintritt .....	583
9.6.2	Bedingungen im Spalt zwischen Laufrad und Diffusor ....	584
<b>10</b>	<b>Konstruktion, Mechanik</b> .....	587
10.1	Vorbemerkungen .....	587
10.2	Verdichterbauweisen .....	588
10.2.1	Allgemeine, konzeptübergreifende Konstruktionsmerkmale	588
10.2.2	Komponentenbauweisen .....	589
10.2.2.1	1-stufige Fans für zivile Turbofans und Mantelpropanfans .....	589
10.2.2.2	Mehrstufige ND-Verdichter für militärische Turbofans .....	593
10.2.2.3	„Booster“-Stufen für zivile Turbofans .....	596
10.2.2.4	MD-Verdichter für 3-Wellen-Turbofans .....	598
10.2.2.5	HD-Verdichter für zivile und militärische Turbofans .....	600
10.2.2.6	Ax/R-Verdichter für Gasgeneratoren von Wellenleistungstriebwerken und HD-Systeme von kleinen Turbofans .....	605

10.2.2.7	2R-Verdichter für Gasgeneratoren von Wellenleistungstriebwerken .....	608
10.2.3	Variable Geometrie .....	610
10.3	Konstruktions-/betriebsrelevante Probleme .....	613
10.3.1	Axialschubausgleich .....	613
10.3.2	Druckluftentnahme .....	613
10.3.3	Beläge an Rotor und Stator .....	614
10.3.4	Titanfeuer .....	615
10.3.5	Schaufelerosion .....	617
10.4	Vogelschlag .....	622
10.5	Rotordynamik .....	628
10.5.1	Vorbemerkungen .....	628
10.5.2	Grundprobleme .....	629
10.5.2.1	Rotorunwucht und Eigenfrequenzen bzw. kritische Drehzahlen .....	629
10.5.2.2	Isotrop-elastische Lager .....	632
10.5.2.3	Kreiseffekte bei Flugmanövern .....	634
10.5.2.4	Manöverlasten .....	641
10.5.2.5	Elastische Lager mit Dämpfung .....	642
10.5.3	Moderne Behandlung rotordynamischer Probleme .....	645
	<b>Bezeichnungen</b> .....	647
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	657
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	675

Verdichter für Turbo-Flugtriebwerke

Grieb, H.

2009, XV, 696 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-34373-8