

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	1
2	Einleitung	3
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
3	Zeitliche Entwicklung der Verdichter-Auslegungsparameter	35
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

4	Integration und Dimensionierung	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
5	Aerodynamik des Axial- und Radialverdichters	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
6	Schaufel-/Profilgestaltung	339
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
7	Betriebsverhalten	389
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
8	Akustik	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
9	Aeroelastik	
	Flattern und erzwungene Schaufelschwingungen	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 Nachlaufdüsen/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
10	Konstruktion, Mechanik	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 Mantelpropfans	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
	Bezeichnungen	647
	Literaturverzeichnis	657
	Sachverzeichnis	675