

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	vii
I GRUNDLAGEN	1
1 EINLEITUNG	3
1.1 Das Prinzip der Turbomaschine	9
1.1.1 Kraftmaschine	10
1.1.2 Arbeitsmaschine	18
1.2 Grundbausteine	23
1.3 Zusammenfassende Gliederung der Turbomaschinen	26
1.4 Luftatmende Strahlantriebe	28
1.4.1 Gasturbinenstrahltriebwerk	28
1.4.2 Turbojet	30
1.4.3 Turbofan	32
1.4.4 Konstruktion	38
1.4.5 Flugantriebe und deren Derivate	39
1.4.6 Zukünftige Entwicklungen	41
2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	43
2.1 Eigenschaften der kompressiblen Arbeitsfluiden	43
2.1.1 Wärmekapazität	45
2.2 Thermodynamische Zustandsgrößen	47
2.2.1 Berechnungsverfahren	48
2.2.2 Totalzustand (Ruhezustand)	52
2.2.3 Machzahl	55
2.3 Kontinuitätsgleichung	57
2.3.1 Massenstromdichte	59

2.3.2	Massenstromfunktion	59
2.4	I. Hauptsatz der Thermodynamik	61
2.4.1	Energiegleichung für offenes System	62
2.5	Impulsgleichung	65
2.5.1	Drehimpulssatz	66
2.6	Einige Anwendungen der Erhaltungssätze	69
2.6.1	1D Euler Gleichung	70
2.6.2	1D Navier-Stokes Gleichung	72
2.6.3	Energiegleichung für Strömung mit Dissipation	73
2.6.4	Ringraum mit konstantem Querschnitt	75
2.6.5	Berührungsfreie Dichtung	77
2.6.6	Strömung mit Wärmezufuhr	80
2.7	II. Hauptsatz der Thermodynamik	84
2.7.1	Entropie	84
2.7.2	Entropie Gleichung	90
2.8	Projekt	94

II THERMISCHE TURBOMASCHINEN 99

3	WIRKUNGSGRAD	101
3.1	Kraftmaschine	101
3.1.1	Thermische Turbine	103
3.2	Arbeitsmaschine	105
3.2.1	Verdichter	107
3.2.2	Pumpe	109
3.3	Polytroper Wirkungsgrad	109
3.3.1	Verdichter	110
3.3.2	Turbine	113
3.3.3	Anwendung des polytropen Wirkungsgrads	114
3.3.4	Wärmerückgewinnungsgrad	118
3.4	Isothermer Wirkungsgrad	119
3.5	Diffusor	120
3.6	Düse	125
3.7	Projekt	128
4	KENNZAHLEN UND KENNLINIEN	131
4.1	Modell und Einflussgrößen	132
4.1.1	Grundlegende Überlegungen	132
4.1.2	Drehzahlkenlinien	136

4.2	Quantitative Kennlinienermittlung	138
4.2.1	Inkompressible Strömung	138
4.2.2	Isotherme Strömung	143
4.2.3	Dimensionslose Kennlinien	147
4.2.4	Dynamische Ähnlichkeit	148
4.2.5	Laufzahl und Durchmesserzahl	153
4.2.6	Kompressible Strömung	156
4.2.7	Dynamische Ähnlichkeit	161
4.3	Off Design Verhalten	164
4.3.1	Inkompressible Strömung	164
4.3.2	Kompressible Strömung	167
4.4	Konzeptueller Entwurf einer Turbomaschine	171
4.4.1	Maschinenkonzept	171
4.4.2	Kombinationen von Axial- und Radialmaschinen	172
4.4.3	Stufenzahl	172
4.5	Projekt	174
5	SCHAUFELGITTER	179
5.1	Geometrie des geraden Profilgitters	180
5.1.1	Druckverteilung im Profilgitter	184
5.2	Kinematik des Profilgitters	187
5.2.1	Kontinuitätsgleichung	187
5.3	Thermodynamik des Profilgitters	188
5.4	Aerodynamische Kräfte	189
5.5	Energieverluste	191
5.6	Auftriebs- und Widerstandskraft	192
5.6.1	Zirkulation und Auftriebskraft	194
5.7	Kennlinien	194
5.7.1	Windkanalversuche	195
5.8	Ergebnisse aus den Windkanalmessungen	198
5.8.1	Verdichterprofilgitter	200
5.8.2	Turbinenprofilgitter	202
5.8.3	Machzahleinfluss	203
5.8.4	Reynoldszahleinfluss	204
5.9	Korrelation der Messergebnisse	205
5.9.1	Verdichtergitter	205
5.9.2	Turbinengitter	214
5.10	Grenzschichtkorrelation	221
5.10.1	Integralwerte der Grenzschicht	221
5.10.2	Das Modell	224

5.10.3	Verlustbeiwert	229
5.11	Projekt	231
6	AXIALTURBINE	239
6.1	Kinematik	240
6.1.1	Kontinuitätsgleichung	242
6.2	Thermodynamik	243
6.3	Wirkungsgrad	244
6.3.1	Anwendung der Korrelation von Verlusten in Profilgittern . . .	246
6.4	Kennzahlen	247
6.4.1	Kinematischer Reaktionsgrad	248
6.5	Stufenkonzepte	249
6.5.1	Reaktionsstufe	249
6.5.2	Gleichdruckstufe und Umlenkstufe	249
6.6	Entwurf einer Stufe	251
6.6.1	Reaktionsstufe	252
6.6.2	Umlenkstufe	253
6.6.3	Einstufige Turbine	254
6.7	Entwurf einer mehrstufigen Turbine	255
6.8	Off Design Verhalten	257
6.8.1	Konstante Drehzahl	257
6.8.2	Variable Drehzahl	258
6.9	Hochtemperaturstufen	260
6.9.1	Thermokinetische Grundlagen	261
6.9.2	Beispiele von gekühlten Schaufeln	263
6.9.3	Berechnungsgrundlagen der Kühlsysteme	265
6.9.4	Thermodynamik der gekühlten Stufe	270
6.9.5	Wirkungsgrad der gekühlten Stufe	274
6.9.6	Korrelation der Verluste	276
6.10	Projekt	278
7	AXIALVERDICHTER	281
7.1	Kinematik	282
7.1.1	Kontinuitätsgleichung	282
7.1.2	Kinematische Optimierung	284
7.2	Thermodynamik	286
7.3	Wirkungsgrad	287
7.3.1	Anwendung der Korrelation von Verlusten in Profilgittern . . .	289
7.4	Kennzahlen	290
7.4.1	Kinematischer Reaktionsgrad	291

7.5	Stufenkonzepte	291
7.6	Entwurf einer Stufe	292
7.7	Entwurf eines mehrstufigen Verdichters	294
7.8	Off Design Verhalten	295
7.8.1	Rotierende Ablösung und Pumpen	296
7.9	Hochgeschwindigkeitsstufen	300
7.9.1	Kinematik	301
7.9.2	Thermodynamik	303
7.9.3	Wirkungsgrad	305
7.10	Projekt	307
8	DREIDIMENSIONALE STRÖMUNG	317
8.1	Kinematik der 3D Strömung	318
8.2	Radiale Druckgleichung	320
8.3	Schaufelverwindung	322
8.3.1	Potentialwirbelansatz	323
8.3.2	Konstante Massenstromdichte	326
8.4	Weitere dreidimensionale Strömungseffekte	329
8.4.1	Sekundärströmung	329
8.4.2	3D Gesamtverluste	334
8.4.3	Zusätzlicher Wandgrenschichtverlust	334
8.4.4	Fortgeschrittene 3D-Schaufelgestaltung	335
8.5	Projekt	338
9	RADIALVERDICHTER	341
9.1	Kinematik	342
9.1.1	Kontinuitätsgleichung	344
9.1.2	Minderleistungsfaktor	345
9.1.3	Diffusor	347
9.2	Thermodynamik	350
9.2.1	Druckverteilung	352
9.2.2	Machzahl am Austritt aus dem Rotor	352
9.2.3	Verdichtung aufgrund der Verwirbelung	354
9.3	Kennzahlen	354
9.4	Wirkungsgrad	355
9.4.1	Berechnung mit Minderleistungsfaktor	356
9.4.2	Berechnung mit Verlustekorrelation	358
9.5	Optimierung von Einlauf	360
9.5.1	Inkompressible Strömung	361
9.5.2	Kompressible Strömung	363

9.5.3	Vordrall	365
9.6	Aerodynamische Sperrgrenze (choking)	366
9.6.1	Einlauf	366
9.6.2	Rotor	367
9.6.3	Diffusoreintritt	368
9.7	Projekt	369
10	RADIALTURBINE	385
10.1	Kinematik	386
10.1.1	Kontinuitätsgleichung	388
10.2	Thermodynamik	389
10.2.1	Druckverteilung	392
10.2.2	Thermodynamische Zustandsgrößen	393
10.3	Wirkungsgrad	395
10.3.1	Berechnung mit Verlustbeiwerten	395
10.3.2	Betrachtung der Verlustestruktur	397
10.4	Kennzahlen	398
10.5	Projekt	401
III	STRAHLANTRIEBE	411
11	BRENNKAMMER	413
11.1	Kinematik	414
11.2	Thermodynamik	418
11.2.1	Strömung mit Reibung und ohne Wärmezufuhr	419
11.2.2	Strömung ohne Reibung und mit Wärmezufuhr	422
11.2.3	Grundlagen der Verbrennungsrechnung	425
11.2.4	Reaktionswärme	433
11.3	Kennzahlen	440
11.4	Emissionen	442
11.5	Projekt	445
12	LUFTEINLAUF UND DÜSE	455
12.1	Lufteinlauf	456
12.1.1	Kinematik	456
12.1.2	Thermodynamik	458
12.2	Düse	463
12.2.1	Einfache Unterschalldüse	464
12.2.2	Düse konvergent - divergent	468

12.3	Projekt	476
13	GASTURBINE	479
13.1	Thermodynamische Grundlagen	479
13.2	Gasturbine mit Schaufelkühlung (CBE)	483
13.3	Wirkungsgradverbesserungen	486
13.3.1	Wärmerückgewinnung (CBEX)	487
13.3.2	Verdichterzwischenkühlung(CICBE)	489
13.4	Kennlinien	492
13.4.1	Kreisprozesskennlinien	492
13.4.2	Betriebskennlinie	494
13.4.3	Dimensionslose Parameter (Kennzahlen)	496
13.4.4	Umgebungseinfluss	497
13.5	Projekt	503
14	TURBINENTRIEBWERKE	505
14.1	Das Konzept	506
14.2	Turbojet	508
14.2.1	Thermodynamik	509
14.2.2	Druckverteilung im Turbojet	511
14.2.3	Schubkraft	513
14.2.4	Dimensionslose Schubkraft	516
14.2.5	Wirkungsgrad	519
14.3	Turbofan	521
14.3.1	Thermodynamik	523
14.3.2	Schubkraft	526
14.3.3	Wirkungsgrad	528
14.4	Technologiestandards	529
14.5	Projekt 1	532
14.6	Projekt 2	538
IV	ANHANG	551
	Appendices	555
A	Leibniz - Reynolds Transport-Theorem	555
B	Tabellen	559
B.1	Eigenschaften der trockenen Luft	559
B.2	Quasi eindimensionale Strömung	560

B.3	Ableitung der Q1D Kontinuitätsgleichung	564
C	Newton – Raphson Verfahren	565
C.1	Druck und Temperatur berechnen	566
C.2	Temperatur aus Druck und Entropie berechnen	567
C.3	Programm zur Berechnung der Gaszustandsgrößen	567
D	NACA 65 Profile	569
E	Wirkungsgrad der Gasturbine (vereinfacht)	573
F	Wirkungsgrad der Gasturbine	575
	Literaturverzeichnis	579
	Sachverzeichnis	584