

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	iii
Symbolverzeichnis .....	v
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Das Prinzip der Turbomaschine .....	5
1.1.1 Kraftmaschine .....	6
1.1.2 Arbeitsmaschine .....	13
1.2 Grundbausteine .....	17
1.3 Zusammenfassende Gliederung der Turbomaschinen .....	19
1.4 Strahlantriebe .....	21
1.4.1 Flugantriebe und Derivate .....	28
1.4.2 Zukünftige Entwicklungen .....	29
<b>2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>31</b>
2.1 Eigenschaften der kompressiblen Arbeitsfluiden .....	31
2.1.1 Wärmekapazität .....	33
2.2 Thermodynamische Zustandsgrößen .....	35
2.2.1 Berechnungsverfahren .....	35
2.2.2 Totalzustand (Ruhezustand) .....	38
2.2.3 Machzahl .....	41
2.3 Kontinuitätsgleichung .....	43
2.3.1 Massenstromfunktion .....	44
2.4 I. Hauptsatz der Thermodynamik .....	46
2.4.1 Energiegleichung für offenes System .....	47
2.5 Impulsgleichung .....	49
2.6 Einige prinzipielle Anwendungen .....	50
2.6.1 Strömung mit Dissipation .....	50
2.6.2 1D Euler Gleichung .....	52
2.6.3 1D Navier-Stokes Gleichung .....	53

2.6.4	Bernoulli Gleichung .....	54
2.6.5	Fanno Gleichung .....	54
2.6.6	Rayleigh Gleichung .....	59
2.6.7	Drallsatz .....	61
2.7	II. Hauptsatz der Thermodynamik .....	65
2.7.1	Entropie .....	65
2.7.2	Entropie Gleichung .....	69
2.8	Projekt .....	73
<b>3</b>	<b>WIRKUNGSGRAD</b>	<b>79</b>
3.1	Kraftmaschine .....	79
3.1.1	Thermische Turbine .....	81
3.2	Arbeitsmaschine .....	83
3.2.1	Verdichter .....	84
3.2.2	Isothermer Wirkungsgrad .....	86
3.2.3	Pumpe .....	87
3.3	Polytroper Wirkungsgrad .....	87
3.3.1	Verdichter .....	88
3.3.2	Turbine .....	91
3.3.3	Vergleich zwischen polytropen und adiabaten Wirkungsgrad .....	92
3.3.4	Anwendung des polytropen Wirkungsgrads .....	93
3.3.5	Wärmerückgewinnungsgrad .....	97
3.4	Diffusor .....	98
3.5	Düse .....	102
3.6	Projekt .....	104
<b>4</b>	<b>KENNZAHLEN UND KENNLINIEN</b>	<b>107</b>
4.1	Modell und Einflussgrößen .....	108
4.1.1	Grundlegende Überlegungen .....	108
4.1.2	Drehzahlkenlinien .....	111
4.2	Quantitative Kennlinienermittlung .....	113
4.2.1	Inkompressible Strömung .....	113
4.2.2	Isotherme Strömung .....	117
4.2.3	Dimensionslose Kennlinien .....	120
4.2.4	Dynamische Ähnlichkeit .....	121
4.2.5	Laufzahl und Durchmesserzahl .....	125
4.2.6	Kompressible Strömung .....	128
4.2.7	Dynamische Ähnlichkeit .....	132
4.3	Off Design Verhalten .....	134
4.3.1	Inkompressible Strömung .....	134
4.3.2	Kompressible Strömung .....	136
4.4	Konzeptueller Entwurf einer Turbomaschine .....	139
4.4.1	Maschinenkonzept .....	139
4.4.2	Kombinationen von Axial- und Radialmaschinen .....	140
4.4.3	Stufenzahl .....	140

4.5	Projekt .....	142
<b>5</b>	<b>SCHAUFELGITTER</b>	<b>147</b>
5.1	Geometrie des geraden Profilgitters .....	148
5.1.1	Druckverteilung im Profilgitter .....	152
5.2	Kinematik des Profilgitters .....	153
5.2.1	Kontinuitätsgleichung .....	155
5.3	Thermodynamik des Profilgitters .....	155
5.4	Aerodynamische Kräfte .....	156
5.5	Energieverluste .....	158
5.6	Auftriebs- und Widerstandskraft .....	159
5.6.1	Zirkulation und Auftriebskraft .....	161
5.7	Kennlinien .....	161
5.7.1	Windkanalversuche .....	161
5.8	Ergebnisse aus den Windkanalmessungen .....	162
5.8.1	Verdichterprofilgitter .....	167
5.8.2	Turbinenprofilgitter .....	168
5.8.3	Machzahl- und Reynoldszahleinfluss .....	168
5.9	Korrelation der Messergebnisse .....	171
5.9.1	Verdichtergitter .....	171
5.9.2	Turbinengitter .....	177
5.10	Grenzschichtkorrelation .....	183
5.10.1	Integralwerte der Grenzschicht .....	184
5.10.2	Das Modell .....	186
5.10.3	Verlustbeiwert .....	190
5.11	Projekt .....	193
<b>6</b>	<b>AXIALTURBINE</b>	<b>201</b>
6.1	Kinematik .....	202
6.1.1	Kontinuitätsgleichung .....	203
6.2	Thermodynamik .....	204
6.3	Wirkungsgrad .....	206
6.4	Kennzahlen .....	208
6.5	Stufenkonzepte .....	210
6.5.1	Reaktionsstufe .....	210
6.5.2	Gleichdruckstufe und Umlenkstufe .....	210
6.6	Entwurf einer Stufe .....	211
6.6.1	Reaktionsstufe .....	212
6.6.2	Umlenkstufe .....	213
6.6.3	Einstufige Turbine .....	214
6.6.4	Mehrstufige Turbine .....	215
6.7	Off Design Verhalten .....	217
6.7.1	Konstante Drehzahl .....	217
6.7.2	Variable Drehzahl .....	217

6.8	Hochtemperaturstufen . . . . .	219
6.8.1	Thermokinetische Grundlagen . . . . .	220
6.8.2	Beispiele von gekühlten Schaufeln . . . . .	222
6.8.3	Berechnungsgrundlagen der Kühlsysteme . . . . .	224
6.8.4	Thermodynamik der gekühlten Stufe . . . . .	228
6.8.5	Wirkungsgrad der gekühlten Stufe . . . . .	231
6.8.6	Korrelation der Verluste . . . . .	233
6.9	Projekt . . . . .	235
<b>7</b>	<b>AXIALVERDICHTER</b>	<b>239</b>
7.1	Kinematik . . . . .	240
7.1.1	Kontinuitätsgleichung . . . . .	241
7.1.2	Eine kinematische Analyse . . . . .	242
7.2	Thermodynamik . . . . .	243
7.3	Wirkungsgrad . . . . .	245
7.4	Kennzahlen . . . . .	247
7.5	Entwurf einer Stufe . . . . .	249
7.6	Entwurf eines mehrstufigen Verdichters . . . . .	251
7.7	Off Design Verhalten . . . . .	251
7.7.1	Rotierende Ablösung und Pumpverhalten . . . . .	252
7.8	Hochgeschwindigkeitsstufen . . . . .	254
7.8.1	Kinematik . . . . .	255
7.8.2	Thermodynamik . . . . .	257
7.8.3	Wirkungsgrad . . . . .	259
7.9	Projekt . . . . .	261
<b>8</b>	<b>DREIDIMENSIONALE STRÖMUNG</b>	<b>269</b>
8.1	Kinematik der 3D Strömung . . . . .	269
8.2	Radiale Druckgleichung . . . . .	271
8.3	Schaufelverwindung . . . . .	273
8.3.1	Potentialwirbelansatz . . . . .	275
8.3.2	Konstante Massenstromdichte . . . . .	277
8.4	Weitere dreidimensionale Strömungseffekte . . . . .	279
8.4.1	Sekundärströmung . . . . .	280
8.4.2	3D Gesamtverluste . . . . .	284
8.4.3	Zusätzlicher Wandgrenzschichtverlust . . . . .	284
8.4.4	Fortgeschrittene 3D-Schaufelgestaltung . . . . .	285
8.5	Projekt . . . . .	288
<b>9</b>	<b>RADIALVERDICHTER</b>	<b>291</b>
9.1	Kinematik . . . . .	292
9.1.1	Kontinuitätsgleichung . . . . .	294
9.1.2	Minderleistungsfaktor . . . . .	294
9.1.3	Diffusor . . . . .	297

9.2	Thermodynamik .....	299
9.2.1	Druckverteilung .....	300
9.2.2	Machzahl am Austritt aus dem Rotor .....	302
9.2.3	Verdichtung aufgrund der Verwirbelung .....	303
9.3	Kennzahlen .....	303
9.4	Wirkungsgrad .....	304
9.4.1	Berechnung mit Minderleistungsfaktor .....	305
9.4.2	Berechnung mit Verlustekorrelation .....	307
9.5	Optimierung von Einlauf .....	309
9.5.1	Inkompressible Strömung .....	309
9.5.2	Kompressible Strömung .....	311
9.5.3	Vordrall .....	313
9.6	Aerodynamische Sperrgrenze (choking) .....	314
9.6.1	Einlauf .....	314
9.6.2	Rotor .....	315
9.6.3	Diffusoreintritt .....	316
9.7	Projekt .....	317
<b>10</b>	<b>RADIALTURBINE</b> .....	<b>333</b>
10.1	Kinematik .....	334
10.1.1	Kontinuitätsgleichung .....	334
10.2	Thermodynamik .....	337
10.2.1	Druckverteilung .....	339
10.2.2	Thermodynamische Zustandsgrößen .....	339
10.3	Wirkungsgrad .....	342
10.3.1	Berechnung mit Verlustbeiwerten .....	342
10.3.2	Betrachtung der Verluststruktur .....	344
10.4	Kennzahlen .....	344
10.5	Projekt .....	347
<b>11</b>	<b>BRENNKAMMER</b> .....	<b>355</b>
11.1	Kinematik .....	356
11.2	Thermodynamik .....	358
11.2.1	Strömung mit Reibung und ohne Wärmezufuhr .....	360
11.2.2	Strömung ohne Reibung und mit Wärmezufuhr .....	363
11.2.3	Grundlagen der Verbrennungsrechnung .....	366
11.2.4	Reaktionswärme .....	373
11.3	Kennzahlen .....	379
11.4	Emissionen .....	381
11.5	Projekt .....	384
<b>12</b>	<b>LUFTEINLAUF UND DÜSE</b> .....	<b>393</b>
12.1	Lufteinlauf .....	394
12.1.1	Kinematik .....	394
12.1.2	Thermodynamik .....	396

12.2	Düse .....	400
12.2.1	Einfache Unterschalldüse .....	401
12.2.2	Düse konvergent - divergent .....	404
12.3	Projekt .....	411
<b>13</b>	<b>GASTURBINE IM STRAHLANTRIEB</b>	<b>415</b>
13.1	Thermodynamische Grundlagen .....	416
13.2	Gasturbine mit Schaufelkühlung (CBE) .....	419
13.3	Wirkungsgradverbesserungen .....	422
13.3.1	Wärmerückgewinnung (CBEX) .....	423
13.3.2	Verdichterzwischenkühlung(CICBE) .....	425
13.4	Kennlinien .....	427
13.4.1	Kreisprozesskennlinien .....	428
13.4.2	Betriebskennlinie .....	428
13.4.3	Dimensionslose Parameter .....	431
13.4.4	Umgebungseinfluss .....	432
13.5	Flugantriebe .....	436
13.5.1	Turbojet .....	437
13.5.2	Turbofan .....	447
13.6	Technologiestandards .....	452
13.7	Projekt 1 .....	455
13.8	Projekt 2 .....	459
	<b>Appendices</b>	<b>471</b>
<b>A</b>	<b>Leibniz - Reynolds Transport-Theorem</b>	<b>471</b>
<b>B</b>	<b>Newton – Raphson Verfahren</b>	<b>475</b>
B.1	Druck und Temperatur berechnen .....	475
B.2	Temperatur aus Druck und Entropie berechnen .....	476
<b>C</b>	<b>Tabellen</b>	<b>477</b>
C.1	Eigenschaften der trockener Luft .....	477
<b>D</b>	<b>Quasi eindimensionale Strömung</b>	<b>479</b>
<b>E</b>	<b>Numerische Berechnung der Zustandsgrößen</b>	<b>483</b>
<b>F</b>	<b>NACA 65 Profile</b>	<b>485</b>
F.1	Nomenklatur .....	485
<b>G</b>	<b>Wirkungsgrad der Gasturbine (vereinfacht)</b>	<b>489</b>
<b>H</b>	<b>Wirkungsgrad der Gasturbine</b>	<b>491</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>495</b>

