

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Einheiten</b> . . . . .	11
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	13
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung . . . . .	13
1.2 Energieumwandlung in der Technik . . . . .	14
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	17
2.1 Allgemeine physikalische Größen . . . . .	17
2.2 Hydromechanik . . . . .	19
2.2.1 Hydrostatik . . . . .	19
2.2.2 Kontinuitätsgleichung . . . . .	20
2.2.3 Bernoullische Gleichung . . . . .	21
2.2.3.1 Düse und Diffusor . . . . .	22
2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten . . . . .	24
2.2.4 Strömung in Rohrleitungen . . . . .	25
2.2.5 Druckenergieverlust in Rohrleitungen . . . . .	27
2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen . . . . .	28
2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß . . . . .	30
2.3 Wärmetechnik . . . . .	32
2.3.1 Thermische Zustandsgrößen . . . . .	32
2.3.2 Erster Hauptsatz . . . . .	33
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität . . . . .	35
2.3.4 Enthalpie . . . . .	37
2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases . . . . .	40
2.3.5.1 Thermische Zustandsgleichung . . . . .	40
2.3.5.2 Kalorische Zustandsgleichung . . . . .	42
2.3.6 Zweiter Hauptsatz . . . . .	43
2.3.6.1 Entropie . . . . .	43
2.3.6.2 Darstellung der Entropie durch thermische Zustandsgrößen . . . . .	44
2.3.6.3 Formulierungen des zweiten Hauptsatzes . . . . .	44
2.3.6.4 Exergie . . . . .	45
2.3.6.5 Das $T,s$ - oder Wärmediagramm . . . . .	45
2.3.7 Technisch wichtige Zustandsänderungen . . . . .	47
2.3.8 Gasgemische . . . . .	51
2.3.9 Die Normalatmosphäre (Aerostatik) . . . . .	51
2.3.10 Feuchte Gase . . . . .	52
2.3.11 Strömung mit großen Druckänderungen . . . . .	52
2.3.11.1 Dynamische Temperatur . . . . .	52
2.3.11.2 Totalzustand (Gesamtzustand, Ruhezustand) . . . . .	53
2.3.12 Kreisprozesse . . . . .	53
2.3.13 Laval-Düse . . . . .	54
2.3.14 Zustandsänderungen des Wasserdampfes . . . . .	60
2.3.15 Arbeitsvermögen des Wasserdampfes . . . . .	62

2.3.15.1	Nutzarbeit im $T,s$ -Diagramm	62
2.3.15.2	Nutzarbeit im $h,s$ -Diagramm	63
2.3.15.3	Nutzarbeit im $p,v$ -Diagramm	64
2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	65
2.3.16.1	$h,T$ -Diagramm	69
2.3.17	Wärmedurchgang	70
2.3.17.1	Wärmeübergang durch Berührung	71
2.3.17.2	Wärmeübergang durch Strahlung	73
2.4	Wirkungsgrade der Maschinen	74
2.5	Vergleich der Kolben- und Strömungsmaschinen	76
2.6	Regelung	77
<b>3</b>	<b>Kolbenmaschinen</b>	<b>86</b>
3.1	Ventilsteuerung	86
3.2	Kurbeltrieb	86
3.2.1	Kräfte am Kurbeltrieb	86
3.2.2	Tangentialkraftdiagramm	89
3.2.2.1	Ableitung der Bewegungsverhältnisse beim Kurbeltrieb	89
3.2.2.2	Gesamt tangentialkraft	90
3.2.3	Schwungradberechnung	93
3.2.4	Massenausgleich	95
3.2.5	Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine	98
3.2.6	Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen	99
3.3	Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)	102
3.3.1	Kolbenpumpen mit hin- und hergehendem Kolben	102
3.3.1.1	Wirkungsweise	102
3.3.1.2	Fördervolumen	104
3.3.1.3	Saughub	106
3.3.1.4	Druckhub	109
3.3.1.5	Pumpenventile	109
3.3.1.6	Wirkungsgrade	110
3.3.1.7	Sonderformen	111
3.3.2	Drehkolbenpumpen	112
3.3.3	Flüssigkeitsringpumpen	113
3.4	Verdrängungsverdichter	114
3.4.1	Kolbenverdichter	115
3.4.1.1	Thermodynamik der Kolbenverdichter	115
3.4.1.2	Schädlicher Raum	117
3.4.1.3	Wirkliche Verdichtung	120
3.4.1.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	120
3.4.1.5	Indizierter Wirkungsgrad; indizierte Leistung	122
3.4.1.6	Mechanischer Wirkungsgrad; Antriebsleistung	123
3.4.1.7	Mehrstufige Kolbenverdichter	123
3.4.1.8	Regelung	125
3.4.2	Rotationsverdichter	127
3.4.2.1	Roots-Gebläse	127
3.4.2.2	Drehkolbenverdichter	129
3.4.2.3	Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter	130

3.5	Kolbenmotoren . . . . .	131
3.5.1	Arbeitsverfahren . . . . .	132
3.5.2	Aufbau der Kolbenmotoren . . . . .	132
3.5.3	Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade . . . . .	133
3.5.4	Ottomotor (Viertakt) . . . . .	135
3.5.4.1	Vergaser . . . . .	139
3.5.4.2	Zündung . . . . .	143
3.5.4.3	Elektronisch gesteuerte Kraftstoffeinspritzung . . . . .	145
3.5.5	Dieselmotor (Viertakt) . . . . .	147
3.5.5.1	Vergleich Ottomotor – Dieselmotor . . . . .	149
3.5.5.2	Einspritzung und Gemischbildung . . . . .	150
3.5.6	Die Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren . . . . .	157
3.5.7	Zweitaktverfahren . . . . .	159
3.5.7.1	Nachladung beim Zweitaktverfahren . . . . .	161
3.5.8	Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt . . . . .	163
3.5.8.1	Wärmebelastung und Kühlung . . . . .	163
3.5.8.2	Mechanische Belastung und Schmierung . . . . .	164
3.5.9	Kreiskolbenmotor (Wankelmotor) . . . . .	165
3.5.10	Freikolbenmotoren . . . . .	167
3.5.11	Aufladung . . . . .	168
3.5.12	Stirlingmotor . . . . .	173
3.5.13	Kraftstoffe . . . . .	176
3.5.14	Kühlung . . . . .	178
3.5.15	Mehrzylinder-Anordnungen . . . . .	180
3.5.16	Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren . . . . .	182
3.5.17	Betriebsverhalten der Motoren . . . . .	186
<b>4</b>	<b>Strömungsmaschinen . . . . .</b>	<b>189</b>
4.1	Arbeitsverfahren der Strömungsmaschinen . . . . .	189
4.2	Geschwindigkeitsplan . . . . .	191
4.2.1	Geschwindigkeiten am radialen Laufrad . . . . .	194
4.2.2	Geschwindigkeiten am axialen Laufrad . . . . .	194
4.3	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen . . . . .	194
4.4	Strömungsarbeitsmaschinen . . . . .	195
4.4.1	Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen . . . . .	195
4.4.1.1	Radial durchströmte Maschinen . . . . .	195
4.4.1.2	Axial durchströmte Maschinen . . . . .	219
4.4.2	Festlegung der Schaufelzahl . . . . .	229
4.4.3	Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen . . . . .	230
4.4.3.1	Betriebspunkt . . . . .	230
4.4.3.2	Kennliniendiagramm . . . . .	231
4.4.3.3	Drehzahlregelung . . . . .	232
4.4.3.4	Labiler Zweig der Kennlinie . . . . .	233
4.4.3.5	Parallelförderung von Kreiselpumpen . . . . .	233
4.4.3.6	Pumpen bei Kreisverdictern . . . . .	234
4.4.3.7	Betriebsverhalten der Radialverdichter . . . . .	235
4.4.3.8	Betriebsverhalten der Axialverdichter . . . . .	236
4.4.4	Vergleich der Kolben- und Strömungsmaschinen . . . . .	237

4.4.5	Kreiselpumpen	237
4.4.5.1	Leistung und spezifische Förderarbeit	237
4.4.5.2	Saughöhe und Kavitation	238
4.4.5.3	Spezifische Drehzahl und Bauarten	240
4.4.5.4	Ausgleich des Achsschubes	241
4.4.5.5	Sonderformen der Kreiselpumpe	244
4.4.6	Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)	247
4.4.7	Turboverdichter	248
4.4.7.1	Thermodynamik der Turboverdichter	248
4.4.7.2	Radialverdichter	258
4.4.7.3	Axialverdichter	261
4.4.8	Propeller	262
4.4.8.1	Luftschrauben	263
4.4.8.2	Schiffsschrauben	265
4.5	Strömungskraftmaschinen	265
4.5.1	Energieumwandlung im Leitapparat	267
4.5.2	Energieumwandlung im Laufrad	268
4.5.2.1	Energieumwandlung im radialen Laufrad	268
4.5.2.2	Energieumwandlung im axialen Laufrad	270
4.5.3	Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe	271
4.5.4	Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen	275
4.5.5	Wasserturbinen	279
4.5.5.1	Francis-Turbine	279
4.5.5.2	Kaplan-Turbine	281
4.5.5.3	Laufradformen	284
4.5.5.4	Saugrohr	286
4.5.5.5	Freistrah-(Pelton-)Turbine	288
4.5.5.6	Wirkungsgrade von Wasserturbinen	291
4.5.5.7	Durchströmturbine	292
4.5.6	Dampfturbinen	292
4.5.6.1	Leitapparate	294
4.5.6.2	Gleichdruckstufe	297
4.5.6.3	Überdruckstufe	297
4.5.6.4	Geschwindigkeitsstufung	300
4.5.6.5	Druckstufung	303
4.5.6.6	Regelung der Dampfturbinen	305
4.5.6.7	Mehrstufige Großturbinen	308
4.5.6.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen	311
4.5.7	Gasturbinen	312
4.5.7.1	Offene Gasturbinenanlagen	312
4.5.7.2	Geschlossene Gasturbinenanlagen	317
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Energiewirtschaft</b>	<b>319</b>
5.1	Energiespeicherung	323
5.2	Bedarfsdeckung	324
5.3	Energieverteilung	326
5.4	Deckung von Bedarfsabweichungen	326
5.5	Energieentstehungskosten	327

5.5.1	Feste Kosten	327
5.5.2	Veränderliche Kosten	330
5.6	Einteilung der Kraftwerke (Energieanlagen)	330
<b>6</b>	<b>Wasserkraftwerke</b>	<b>332</b>
6.1	Pumpspeicherkraftwerke	334
6.2	Gezeitenkraftwerke	335
6.2.1	Doppelt wirkende Einbeckenanlage	336
6.2.2	Zweibeckenanlage	337
<b>7</b>	<b>Dampfkraftwerke</b>	<b>339</b>
7.1	Kondensationskraftwerke	339
7.2	Kraft-Wärme-Kopplung	345
7.3	Regelung in Dampfkraftwerken	348
7.3.1	Festdruck- oder Gleitdruckbetrieb	351
7.3.1.1	Festdruckbetrieb	351
7.3.1.2	Gleitdruckbetrieb	352
7.3.1.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	353
7.4	Dampferzeugung	353
7.4.1	Wärmeumsatz	354
7.4.2	Prinzip der technischen Dampferzeugung	355
7.4.3	Dampferzeuger	357
7.4.3.1	Wasserrohrkessel mit Naturumlauf	359
7.4.3.2	Wasserrohrkessel mit Zwangsumlauf	359
7.4.3.3	Wasserrohrkessel mit Zwangsdurchlauf	359
7.4.3.4	Schiffskessel	362
7.4.3.5	Kessel mit Druckfeuerung	362
7.4.4	Feuerungen	362
7.4.4.1	Schmelzfeuerungen	366
7.4.5	Luftvorwärmer	368
7.4.6	Zugerzeugung	369
7.4.6.1	Schornsteinzug	370
7.4.6.2	Saugzug	371
7.4.7	Speisewasseraufbereitung	372
<b>8</b>	<b>Gasturbinen-Kraftanlagen</b>	<b>373</b>
8.1	Einsatz von Gasturbinen-Kraftanlagen	373
8.2	Gasturbinen-Anlagen als Speicherkraftwerke	375
	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>377</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>378</b>