

Inhalt

Vorwort	V
Formelzeichen und Einheiten	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung	1
1.2 Energieumwandlung in der Technik	3
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Allgemeine physikalische Größen	7
2.2 Hydromechanik	10
2.2.1 Hydrostatik	10
2.2.2 Kontinuitätsgleichung	11
2.2.3 Bernoullische Gleichung	13
2.2.3.1 Düse und Diffusor	14
2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten	16
2.2.4 Strömung in Rohrleitungen	17
2.2.5 Druckenergieverlust in Rohrleitungen	19
2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	21
2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß	23
2.3 Wärmetechnik	25
2.3.1 Thermische Zustandsgrößen	25
2.3.2 Erster Hauptsatz	27
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität	30
2.3.4 Enthalpie	32
2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases	36

2.3.5.1	Thermische Zustandsgleichung	36
2.3.5.2	Kalorische Zustandsgleichung	38
2.3.6	Zweiter Hauptsatz	40
2.3.6.1	Entropie	40
2.3.6.2	Darstellung der Entropie durch thermische Zustandsgrößen	41
2.3.6.3	Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	42
2.3.6.4	Exergie	42
2.3.6.5	T,s - oder Wärmediagramm	43
2.3.7	Technisch wichtige Zustandsänderungen	45
2.3.8	Gasgemische	49
2.3.9	Normalatmosphäre (Aerostatik)	50
2.3.10	Feuchte Gase	50
2.3.11	Strömung mit großen Druckänderungen	51
2.3.11.1	Dynamische Temperatur	51
2.3.11.2	Totalzustand (Gesamtzustand, Ruhezustand)	51
2.3.12	Kreisprozesse	52
2.3.13	Laval-Düse	53
2.3.14	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	60
2.3.15	Arbeitsvermögen des Wasserdampfes	63
2.3.15.1	Nutzarbeit im T,s -Diagramm	63
2.3.15.2	Nutzarbeit im h,s -Diagramm	64
2.3.15.3	Nutzarbeit im p,v -Diagramm	65
2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	67
2.3.16.1	h,T -Diagramm	72
2.3.17	Wärmedurchgang	74
2.3.17.1	Wärmeübergang durch Berührung	75
2.3.17.2	Wärmeübergang durch Strahlung	78
2.4	Wirkungsgrade der Maschinen	78
2.5	Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen	81
2.6	Regelung	81

3	Kolbenmaschinen	93
3.1	Ventilsteuerung	93
3.2	Kurbeltrieb	93
3.2.1	Kräfte am Kurbeltrieb	94
3.2.2	Tangentialkraftdiagramm	96
3.2.2.1	Ableitung der Bewegungsverhältnisse beim Kurbeltrieb	97
3.2.2.2	Gesamttangentialkraft	99
3.2.3	Schwungradberechnung	102
3.2.4	Massenausgleich	105
3.2.5	Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine	108
3.2.6	Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen	109
3.3	Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)	112
3.3.1	Kolbenpumpen mit hin- und hergehendem Kolben	113
3.3.1.1	Wirkungsweise	113
3.3.1.2	Fördervolumen	114
3.3.1.3	Saughub	117
3.3.1.4	Druckhub	120
3.3.1.5	Pumpenventile	120
3.3.1.6	Wirkungsgrade	122
3.3.1.7	Sonderformen	122
3.3.2	Drehkolbenpumpen	123
3.3.3	Flüssigkeitsringpumpen	125
3.4	Verdrängungsverdichter	126
3.4.1	Kolbenverdichter	127
3.4.1.1	Thermodynamik der Kolbenverdichter	127
3.4.1.2	Schädlicher Raum	129
3.4.1.3	Wirkliche Verdichtung	133
3.4.1.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	133
3.4.1.5	Indizierter Wirkungsgrad; indizierte Leistung	135
3.4.1.6	Mechanischer Wirkungsgrad; Antriebsleistung	136
3.4.1.7	Mehrstufige Kolbenverdichter	137
3.4.1.8	Regelung	139

3.4.2	Rotationsverdichter	141
3.4.2.1	Roots-Gebläse	141
3.4.2.2	Drehkolbenverdichter	144
3.4.2.3	Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter	146
3.5	Kolbenmotoren	147
3.5.1	Arbeitsverfahren	147
3.5.2	Aufbau der Kolbenmotoren	148
3.5.3	Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade	149
3.5.4	Ottomotor (Viertakt)	152
3.5.4.1	Gemischbildung	156
3.5.4.2	Zündung	163
3.5.4.3	Abgasbehandlung	165
3.5.5	Dieselmotor (Viertakt)	167
3.5.5.1	Vergleich Ottomotor – Dieselmotor	168
3.5.5.2	Einspritzung und Gemischbildung	170
3.5.6	Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren	185
3.5.7	Zweitaktverfahren	187
3.5.7.1	Nachladung beim Zweitaktverfahren	190
3.5.8	Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt	191
3.5.8.1	Wärmebelastung und Kühlung	192
3.5.8.2	Mechanische Belastung und Schmierung	192
3.5.9	Kreiskolbenmotor (Wankelmotor)	194
3.5.10	Freikolbenmotoren	196
3.5.11	Aufladung	197
3.5.12	Stirlingmotor	203
3.5.13	Kraftstoffe	206
3.5.14	Kühlung	209
3.5.15	Mehrzylinder-Anordnungen	210
3.5.16	Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren	213
3.5.17	Betriebsverhalten der Motoren	221
3.5.18	Alternative Antriebe	224

4	Strömungsmaschinen	225
4.1	Arbeitsverfahren der Strömungsmaschinen	225
4.2	Geschwindigkeitsplan	227
4.2.1	Geschwindigkeiten am radialen Laufrad	228
4.2.2	Geschwindigkeiten am axialen Laufrad	231
4.3	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	231
4.4	Strömungsarbeitsmaschinen	232
4.4.1	Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen	232
4.4.1.1	Radial durchströmte Maschinen	232
4.4.1.2	Axial durchströmte Maschinen	262
4.4.2	Festlegung der Schaufelzahl	273
4.4.3	Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen	274
4.4.3.1	Betriebspunkt	274
4.4.3.2	Kennliniendiagramm	275
4.4.3.3	Drehzahlregelung	276
4.4.3.4	Labiler Zweig der Kennlinie	277
4.4.3.5	Parallelförderung von Kreiselpumpen	279
4.4.3.6	Pumpen bei Kreiselerdichtern	279
4.4.3.7	Betriebsverhalten der Radialverdichter	280
4.4.3.8	Betriebsverhalten der Axialverdichter	281
4.4.4	Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen	283
4.4.5	Kreiselpumpen	283
4.4.5.1	Leistung und spezifische Förderarbeit	283
4.4.5.2	Saughöhe und Kavitation	284
4.4.5.3	Spezifische Drehzahl und Bauarten	287
4.4.5.4	Ausgleich des Achsschubes	288
4.4.5.5	Sonderformen der Kreiselpumpe	291
4.4.6	Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)	295
4.4.7	Turboverdichter	296
4.4.7.1	Thermodynamik der Turboverdichter	296
4.4.7.2	Radialverdichter	308
4.4.7.3	Axialverdichter	311

4.4.8	Propeller	312
4.4.8.1	Luftschrauben	314
4.4.8.2	Schiffsschrauben	316
4.5	Strömungskraftmaschinen	316
4.5.1	Energieumwandlung im Leitapparat	318
4.5.2	Energieumwandlung im Laufrad	319
4.5.2.1	Energieumwandlung im radialen Laufrad	319
4.5.2.2	Energieumwandlung im axialen Laufrad	322
4.5.3	Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe	323
4.5.4	Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen	328
4.5.5	Wasserturbinen	332
4.5.5.1	Francis-Turbine	333
4.5.5.2	Kaplan-Turbine	335
4.5.5.3	Laufradformen	339
4.5.5.4	Saugrohr	341
4.5.5.5	Freistrah-(Pelton-)Turbine	343
4.5.5.6	Wirkungsgrade von Wasserturbinen	348
4.5.5.7	Durchströmturbine	349
4.5.6	Dampfturbinen	349
4.5.6.1	Leitapparate	351
4.5.6.2	Gleichdruckstufe	355
4.5.6.3	Überdruckstufe	355
4.5.6.4	Geschwindigkeitsstufung	359
4.5.6.5	Druckstufung	362
4.5.6.6	Regelung der Dampfturbinen	365
4.5.6.7	Mehrstufige Großturbinen	369
4.5.6.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen	373
4.5.7	Gasturbinen	374
4.5.7.1	Offene Gasturbinenanlagen	375
4.5.7.2	Geschlossene Gasturbinenanlagen	381
4.5.7.3	Kombianlagen	382

5	Grundlagen der Energiewirtschaft	383
5.1	Historischer Rückblick	383
5.2	Europäische Verbundnetze	384
5.3	Strom- und Wärmebedarf	387
5.4	Strommarkt und Strommix	389
5.5	Energiewende	391
5.5.1	Ziele der Energiewende für die Stromerzeugung	392
5.5.2	Erneuerbare-Energie-Anlagen (EEA)	393
5.5.3	Volatilität der Windkraft und der Photovoltaik	394
5.5.4	Netzstabilität	396
5.6	Eigenschaften der Primärenergieträger	398
5.6.1	Feste und flüssige Kraftwerksbrennstoffe	399
5.6.2	Gasförmige Kraftwerksbrennstoffe	401
5.6.3	Biomasse, Abfall	404
5.6.4	Kernbrennstoff	405
5.7	Energiekosten	407
5.7.1	Feste Kosten	408
5.7.2	Veränderliche Kosten	410
5.7.3	Stromgestehungskosten	412
6	Wasserkraftwerke	415
6.1	Einsatzbedingungen der Wasserkraftwerke	416
6.2	Pumpspeicherkraftwerke	418
6.2.1	Hauptkomponenten	419
6.2.2	Energiebilanz	420
7	Dampfkraftwerke	421
7.1	Hauptkomponenten	422
7.1.1	Dampferzeuger	423
7.1.1.1	Brennstoff, Luft, Rauchgas	423
7.1.1.2	Feuerung, Brenner, Kohlemühlen	425
7.1.1.3	Technische Dampferzeugung	428
7.1.1.4	Verdampfersysteme	431
7.1.1.5	Druckteil	432

7.1.2	Turbosatz, Wasser-/Dampfkreislauf und Wärmeschaltplan . . .	434
7.1.3	Rauchgasreinigung	437
7.1.3.1	Rauchgasentstickung	438
7.1.3.2	Rauchgasentstaubung	439
7.1.3.3	Rauchgasentschwefelung	440
7.1.4	Speisewasseraufbereitung	442
7.2	Berechnung der Hauptgrößen	443
7.2.1	Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung	447
7.3	Regelung in Dampfkraftwerken	450
7.3.1	Betriebsarten	452
7.3.2	Schutzfunktionen	456
8	Kernkraftwerke	457
8.1	Kontrollierte nukleare Kettenreaktion	458
8.2	Hauptkomponenten	459
8.3	Reaktortypen	462
8.3.1	Druckwasserreaktor	462
8.3.2	Siedewasserreaktor	463
8.4	Sicherheitskonzept	465
8.5	Wärmeschaltplan	465
9	Kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke	469
9.1	Hauptkomponenten	470
9.2	Wärmeschaltplan	471
9.3	Berechnung der Hauptgrößen	475
9.4	Effizienz und Umweltbilanz	476
10	Kraft-Wärmekopplung	479
10.1	Begriffe und Kennzahlen	480
10.2	Wärmeschaltplan	481
10.3	Industriekraftwerke	483
10.4	Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke (BHKW)	484

11 Nutzung der Windenergie	487
11.1 Vorbemerkungen	487
11.2 Windangebot	488
11.3 Aerodynamische Grundlagen	490
11.3.1 Einführung	490
11.3.2 Windenergie und Windleistung	491
11.3.3 Windturbinenleistung	491
11.3.4 Axialkraft	493
11.3.5 Kennwerte	494
11.3.6 Ausführungshinweise	495
11.3.7 Vereinfachte Propellertheorie	496
11.3.8 Kennzahlen	499
11.3.9 Zusammenfassung der Einflüsse bei Windturbinen	500
12 Energiespeicherung	503
12.1 Fluidspeicherung	504
12.2 Stromspeicheranlagen	507
12.2.1 Anforderungen an Stromspeicher	510
12.2.2 Wasserstoff als Speichermedium	511
12.2.3 Wasserstoffgewinnung, Speicherung, Rückverstromung	512
Weiterführendes Schrifttum (Auswahl)	517
Index	519