

Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

Kolbenmaschinen
Strömungsmaschinen
Energierstationen (Kraftwerke)

mit 313 Bildern und 11 Tafeln

von Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Kalide

8., durchgesehene und verbesserte Auflage



Carl Hanser Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Einheiten	13
1 Einleitung	15
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung	15
1.2 Geschichtliche Entwicklung des Energiebegriffes	17
1.3 Energieumwandlung in der Technik	19
2 Theoretische Grundlagen	22
2.1 Allgemeine physikalische Größen	22
2.2 Hydromechanik	25
2.2.1 Hydrostatik	25
2.2.2 Kontinuitätsgleichung	25
2.2.3 Bernoullische Gleichung	26
2.2.3.1 Düse und Diffusor	28
2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten	29
2.2.4 Strömung in Rohrleitungen	30
2.2.5 i Druckenergieverlust in Rohrleitungen	32
2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	34
2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß	35
2.3 Wärmelehre	36
2.3.1 Thermische Zustandsgrößen	36
2.3.2 Erster Hauptsatz	37
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität	40
2.3.4 Die Enthalpie	42
2.3.4.1 Dasp, v- oder Arbeitsdiagramm	44
2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases	45
2.3.5.1 Thermische Zustandsgleichung	45
2.3.5.2 Kalorische Zustandsgleichung	46
2.3.6 Zweiter Hauptsatz	48
2.3.6.1 Entropie	48
2.3.6.2 Darstellung der Entropie durch thermische Zustandsgrößen	49
2.3.6.3 Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	49
2.3.6.4 Exergie	49
2.3.6.5 Das T, s- oder Wärmediagramm	50
2.3.7 Technisch wichtige Zustandsänderungen	55
2.3.8 Gasgemische	55
2.3.9 Die Normalatmosphäre (Aerostatik)	56
2.3.10 Feuchte Gase	57
2.3.11 Strömung mit großen Druckänderungen	* 57
2.3.11.1 Dynamische Temperatur	57
2.3.11.2 Totalzustand	58
2.3.12 Kreisprozesse	58
2.3.13 Lavaldüse	59
2.3.14 Zustandsänderungen des Wasserdampfes	65
2.3.15 Arbeitsvermögen des Wasserdampfes	67
2.3.15.1 Nutzarbeit im T, ^-Diagramm	67
2.3.15.2 Nutzarbeit im h, s-Diagramm	68
2.3.15.3 Nutzarbeit imp, u-Diagramm	69

2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	70
2.3.16.1	Das h, τ -Diagramm	74
2.3.17	Wärmedurchgang	75
2.3.17.1	Wärmeübergang durch Berührung	76
2.3.17.2	Wärmeübergang durch Strahlung	77
2.4	Die Wirkungsgrade der Maschinen	79
2.5	Vergleich der Kolben-und Strömungsmaschinen	81
2.6	Die Regelung	82
Die Kolbenmaschinen		91
3.1	Die Ventilsteuerung	91
3.2	Der Kurbeltrieb	91
3.2.1	Die Kräfte am Kurbeltrieb	91
3.2.2	Das Tangentialkraftdiagramm	94
3.2.2.1	Ableitung der Bewegungsverhältnisse beim Kurbeltrieb	94
3.2.2.2	Die Gesamt tangentialkraft	95
3.2.3	Schwungradberechnung	98
3.2.4	Der Massenausgleich	100
3.2.5	Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine	103
3.2.6	Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen	104
3.3	Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)	107
3.3.1	Kolbenpumpen mit hin-und hergehendem Kolben	107
3.3.1.1	Wirkungsweise	107
3.3.1.2	Fördervolumen	109
3.3.1.3	Saughub	111
3.3.1.4	Druckhub	114
3.3.1.5	Pumpenventile	114
3.3.1.6	Wirkungsgrade	115
3.3.1.7	Sonderformen	116
3.3.1.7.1	Kurbeltrieblose Pumpen	116
3.3.1.7.2	Pumpen mit stetig veränderlicher Fördermenge	116
3.3.1.7.3	Pumpen für chemisch aggressive Flüssigkeiten	116
3.3.2	Drehkolbenpumpen	117
3.3.3	Flüssigkeitsringpumpen	118
3.4	Verdrängungsverdichter	119
3.4.1	Kolbenverdichter	120
3.4.1.1	Thermodynamik der Kolbenverdichter	120
3.4.1.2	Schädlicher Raum	122
3.4.1.3	Wirkliche Verdichtung	125
3.4.1.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	125
3.4.1.5	Indizierter Wirkungsgrad: Indizierte Leistung	* 127
3.4.1.6	Mechanischer Wirkungsgrad: Antriebsleistung	128
3.4.1.7	Mehrstufige Kolbenverdichter	128
3.4.1.8	Regelung	130
3.4.2	Rotationsverdichter	132
3.4.2.1	Roots-Gebläse	132
3.4.2.2	Drehkolbenverdichter	134
3.4.2.3	Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter	135
3.5	Die Kolbenmotoren	136
3.5.1	Arbeitsverfahren	• 137

3.5.2	Aufbau der Kolbenmotoren	137
3.5.3	Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade	138
3.5.4	Ottomotor (Viertakt).	140
3.5.4.1	Vergaser.	144
3.5.4.2	Zündung	148
3.5.4.3	Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung	150
3.5.5	Dieselmotor (Viertakt).	152
3.5.5.1	Vergleich Ottomotor-Dieselmotor.	154
3.5.5.2	Einspritzung und Gemischbildung	155
3.5.5.2.1	Leistungsregelung	160
3.5.5.2.2	Einspritzpumpe.	160
3.5.6	Die Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren	162
3.5.7	Zweitaktverfahren	164
3.5.7.1	Nachladung beim Zweitaktverfahren.	166
3.5.8	Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt	168
3.5.8.1	Wärmebelastung und Kühlung.	168
3.5.8.2	Mechanische Belastung und Schmierung	169
3.5.9	Der Kreiskolbenmotor (Wankel).	170
3.5.10	Freikolbenmotoren	172
3.5.11	Aufladung	173
3.5.12	Der Stirlingmotor.	178
3.5.13	Kraftstoffe.	181
3.5.14	Kühlung.	183
3.5.15	Mehrzylinder-Anordnungen.	185
3.5.16	Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren.	187
3.5.17	Das Betriebsverhalten der Motoren.	191
4	Die Strömungsmaschinen	194
4.1	Das Arbeitsprinzip der Strömungsmaschinen.	194*
4.2	Der Geschwindigkeitsplan.	196
4.2.1	Die Geschwindigkeiten am radialen Laufrad	199
4.2.2	Die Geschwindigkeiten am axialen Laufrad	199
4.3	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen.	199
4.4	Strömungsarbeitsmaschinen.	200
4.4.1	Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen	200
4.4.1.1	Radial durchströmte Maschinen.	200
4.4.1.1.1	Die Energieumwandlung im radialen Laufrad	201
4.4.1.1.2	Der Reaktionsgrad	207
4.4.1.1.3	Leistungsbegriffe, Verluste, Wirkungsgrade.	208
4.4.1.1.4	Schaufelwinkel β_2 am Austritt.	212
4.4.1.1.5	Affinitätsgesetze. *	214
4.4.1.1.6	Die Kenngrößen von Strömungsarbeitsmaschinen.	216
4.4.1.1.6.1	Die spezifische Drehzahl	216
4.4.1.1.6.2	Die Druckzahl.	218
4.4.1.1.6.3	Die Lieferzahl	218
4.4.1.1.6.4	Die Radformzahl	218
4.4.1.1.6.5	Der spezifische Durchmesser.	219
4.4.1.1.7	Festlegung der Stufenzahl.	221
4.4.1.1.8	Der Achsschub.	222
4.4.1.1.9	Leitapparat und Spiralgehäuse.	223

4.4.1.2	Axial durchströmte Maschinen	224
4.4.1.2.1	Energieumsetzung	225
4.4.1.2.2	Die Kenngrößen bei Axialrädern	227
4.4.1.2.3	Reaktionsgrade und Schaufelform	228
4.4.1.2.4	Axialschaufeln als Tragflügel	232
4.4.2	Festlegung der Schaufelzahl	234
4.4.3	Das Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen	235
4.4.3.1	Betriebspunkt	235
4.4.3.2	Das Kennliniendiagramm	236
4.4.3.3	Drehzahlregelung	237
4.4.3.4	Labiler Zweig der Kennlinie	238
4.4.3.5	Parallelförderung von Kreiselpumpen	239
4.4.3.6	Das Pumpen bei Kreiselerdichtern	239
4.4.3.7	Betriebsverhalten der Radialverdichter	241
4.4.3.8	Betriebsverhalten der Axialverdichter	241
4.4.4	Vergleich der Kolben- und Strömungsmaschinen	242
4.4.5	Die Kreiselpumpen	242
4.4.5.1	Leistung und spezifische Förderarbeit	242
4.4.5.2	Saughöhe und Kavitation	243
4.4.5.3	Spezifische Drehzahl und Bauarten	245
4.4.5.4	Ausgleich des Achsschubes	246
4.4.5.5	Sonderformen der Kreiselpumpe	249
4.4.5.5.1	Selbstansaugende Kreiselpumpen	249
4.4.5.5.2	Tiefsaugerpumpen	250
4.4.5.5.3	Kanalradpumpen	250
4.4.5.5.4	Säurefeste Kreiselpumpen	250
4.4.5.5.5	Bohrlochpumpen	251
4.4.5.5.6	Pumpen für Großdampfkessel	252
4.4.6	Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)	252
4.4.7	Die Turboverdichter	253
4.4.7.1	Thermodynamik der Turboverdichter	253
4.4.7.1.1	Einstufige Verdichtung	253
4.4.7.1.2	Mehrstufige Verdichtung	257
4.4.7.1.3	Leistungen und Wirkungsgrade	260
4.4.7.2	Radialverdichter	263
4.4.7.3	Axialverdichter	266
4.4.8	Propeller	267
4.4.8.1	Luftschrauben	268
4.4.8.2	Schiffsschrauben	270
4.5	Strömungskraftmaschinen	270
4.5.1	Energieumwandlung im Leitapparat	* 272
4.5.2	Energieumwandlung im Laufrad	273
4.5.3	Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe	276
4.5.4	Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen	280
4.5.5	Wasserturbinen	284
4.5.5.1	Francis-Turbine	284
4.5.5.1.1	Konstruktion und Bauarten	286
4.5.5.2	Kaplan-Turbine	286
4.5.5.3	Laufradformen	289
4.5.5.4	Saugrohr	291

4.5.5.5	Freistrahl-(Pelton-)Turbine.	293
4.5.5.5.1	Düse.	294
4.5.5.5.2	Becher.	294
4.5.5.5.3	Wirkungsweise.	295
4.5.5.6	Wirkungsgrade von Wasserturbinen.	296
4.5.5.7	Durchströmturbine.	297
4.5.6	Dampfturbinen.	297
4.5.6.1	Leitapparate.	299
4.5.6.2	Gleichdruckstufe.	302
4.5.6.3	Überdruckstufe.	302
4.5.6.4	Geschwindigkeitsstufung.	305
4.5.6.5	Druckstufung.	308
4.5.6.6	Die Regelung der Dampfturbinen.	310
4.5.6.7	Mehrstufige Großturbinen.	313
4.5.6.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen.	316
4.5.7	Gasturbinen.	317
4.5.7.1	Offene Gasturbinenanlagen.	317
4.5.7.1.1	Einstufige Anlagen ohne Luftvorwärmer.	317
4.5.7.1.2	Einstufige Anlage mit Luftvorwärmer.	320
4.5.7.1.3	Zweistufige Anlage mit Luftvorwärmer.	320
4.5.7.1.4	Brennkammer.	321
4.5.7.1.5	Luftvorwärmer.	322
4.5.7.2	Geschlossene Gasturbinenanlagen.	322
5	Grundlagen der Energiewirtschaft.	324
5.1	Energiespeicherung.	327
5.2	Bedarfsdeckung.	328
5.3	Energieverteilung.	330
5.4	Deckung von Bedarfsabweichungen.	330 ^{if}
5.5	Energieentstehungskosten.	331
5.5.1	Feste Kosten.	332
5.5.2	Veränderliche Kosten.	334
5.6	Einteilung der Kraftwerke (Energieanlagen).	334
6	Wasserkraftwerke.	336
6.1	Pumpspeicherkraftwerke.	338
6.2	Gezeitenkraftwerke.	339
6.2.1	Doppelt wirkende Einbeckenanlage.	341/
6.2.2	Zweibeckenanlage.	341
7	Dampfkraftwerke.	343
7.1	Kondensationskraftwerke.	343
7.2	Kopplung von Kraft und Wärme.	349
7.3	Die Regelung in Dampfkraftwerken.	352
7.3.1	Festdruck- oder Gleitdruckbetrieb.	355
7.3.1.1	Festdruckbetrieb.	356
7.3.1.2	Gleitdruckbetrieb.	356
7.3.1.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb.	357
7.4	Dampferzeugung.	358
7.4.1	Wärmeumsatz.	358
7.4.2	Das Prinzip der technischen Dampferzeugung.	359

7.4.3	Dampferzeuger	361
7.4.3.1	Wasserrohrkessel mit Naturumlauf	363
7.4.3.2	Wasserrohrkessel mit Zwangsumlauf	363
7.4.3.3	Wasserrohrkessel mit Zwangsdurchlauf	364
7.4.3.4	Schiffskessel	366
7.4.3.5	Kessel mit Druckfeuerung	366
7.4.4	Feuerungen	367
7.4.4.1	Schmelzfeuerungen	371
7.4.5	Luftvorwärmer	373
7.4.6	Zugerzeugung	373
7.4.6.1	Schornsteinzug	374
7.4.6.2	Saugzug	375
7.4.7	Speisewasseraufbereitung	376
8	Kernkraftwerke	377
8.1	Reaktorphysik	377
8.2	Reaktoren	382
8.3	Aufbau und Arbeitsprinzip eines Leistungsreaktors	382
8.4	Reaktorregelung	384
8.5	Sicherheitsprobleme beim Reaktorbetrieb	384
8.6	Maßeinheiten der Radioaktivität und der Strahlendosis	388
9	Gasturbinenkraftanlagen	389
9.1	Einsatz von Gasturbinenkraftanlagen	389
9.2	Gasturbinenanlagen als Speicherkraftwerke	391
10	Ausnutzung der Windkräfte	393
11	Geothermische Kraftanlagen	395
12	Verwertung von Abfallenergie	398
12.1	Abhitzeessel	398
12.2	Wärmepumpen	399
12.3	Müllverbrennung	399
13	Schutz der Umwelt vor der Technik	402
13.1	Quellen der Umweltverschmutzung	402
13.2	Schadenergien	404
13.2.1	Abwärme	404
13.2.2	Strahlung	405
13.2.3	Lärm	407
13.3	Schadstoffe	407
13.3.1	Schadstoffe aus Verbrennungsmaschinen	408
13.3.2	Schadstoffe aus kohle-, öl- und gasbefeuerten Kraftanlagen	409
13.3.3	Umweltbelastung durch Schadstoffe	409
13.4	Maßnahmen zum Schütze der Umwelt	410
13.4.1	Vermeidung schädlicher Emissionen	411
13.4.2	Verringerung der Schadstoffemissionen	412
13.4.3	Umwandlung von Schaden in Nutzen	414
13.5	Einschlägige Gesetze usw.	414
	Weiterführende Literatur	415
	Stichwortverzeichnis	417