

Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

**Kolbenmaschinen
Strömungsmaschinen
Energierstationen (Kraftwerke)**

mit 313 Bildern und 11 Tafeln

von Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Kalide

6., völlig neubearbeitete Auflage des Titels
Kalide/Hansen, Kraft- und Arbeitsmaschinen



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 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 Das p, 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, s -Diagramm	67
2.3.15.2 Nutzarbeit im h, s -Diagramm	68
2.3.15.3 Nutzarbeit im p, v -Diagramm	69

2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	70
2.3.16.1	Das h, T -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
3	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 Gesamttangentialkraft	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
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	383
8.4	Reaktorregelung	384
8.5	„Brüter“, der Leistungsreaktor der Zukunft	385
8.6	Reaktortypen	386
9	Gasturbinenkraftanlagen	389
9.1	Einsatz von Gasturbinenkraftanlagen	389
9.2	Gasturbinenanlagen als Speicherkraftwerke	391
10	Ausnutzung der Windkräfte	393
11	Geothermische Kraftanlagen	394
12	Verwertung von Abfallenergie	397
12.1	Abhitzeessel	397
12.2	Wärmepumpen	398
12.3	Müllverbrennung	398
	Weiterführende Literatur	401
	Stichwortverzeichnis	403