

# 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

<b>Formelzeichen und Einheiten</b> . . . . .	13
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	15
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung . . . . .	15
1.2 Geschichtliche Entwicklung des Energiebegriffes. . . . .	17
1.3 Energieumwandlung in der Technik . . . . .	19
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	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 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 $T$ , $h$ -Diagramm. . . . .	67
2.3.15.2 Nutzarbeit im $h$ , $s$ -Diagramm. . . . .	68
2.3.15.3 Nutzarbeit im $p$ , $u$ -Diagramm. . . . .	69

2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	70
2.3.16.1	Das $h, \tau$ -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
<b>Die Kolbenmaschinen</b>		<b>91</b>
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
<b>4</b>	<b>Die Strömungsmaschinen . . . . .</b>	<b>194</b>
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 $\beta_2$ 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
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Energiewirtschaft. . . . .</b>	<b>324</b>
5.1	Energiespeicherung. . . . .	327
5.2	Bedarfsdeckung. . . . .	328
5.3	Energieverteilung. . . . .	330
5.4	Deckung von Bedarfsabweichungen. . . . .	330 <sup>if</sup>
5.5	Energieentstehungskosten. . . . .	331
5.5.1	Feste Kosten. . . . .	332
5.5.2	Veränderliche Kosten. . . . .	334
5.6	Einteilung der Kraftwerke (Energieanlagen). . . . .	334
<b>6</b>	<b>Wasserkraftwerke. . . . .</b>	<b>336</b>
6.1	Pumpspeicherkraftwerke. . . . .	338
6.2	Gezeitenkraftwerke. . . . .	339
6.2.1	Doppelt wirkende Einbeckenanlage. . . . .	341/
6.2.2	Zweibeckenanlage. . . . .	341
<b>7</b>	<b>Dampfkraftwerke. . . . .</b>	<b>343</b>
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
<b>8</b>	<b>Kernkraftwerke . . . . .</b>	<b>377</b>
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
<b>9</b>	<b>Gasturbinenkraftanlagen . . . . .</b>	<b>389</b>
9.1	Einsatz von Gasturbinenkraftanlagen . . . . .	389
9.2	Gasturbinenanlagen als Speicherkraftwerke . . . . .	391
<b>10</b>	<b>Ausnutzung der Windkräfte . . . . .</b>	<b>393</b>
<b>11</b>	<b>Geothermische Kraftanlagen . . . . .</b>	<b>395</b>
<b>12</b>	<b>Verwertung von Abfallenergie . . . . .</b>	<b>398</b>
12.1	Abhitzeessel . . . . .	398
12.2	Wärmepumpen . . . . .	399
12.3	Müllverbrennung . . . . .	399
<b>13</b>	<b>Schutz der Umwelt vor der Technik . . . . .</b>	<b>402</b>
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
	<b>Weiterführende Literatur . . . . .</b>	<b>415</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>417</b>