

Hermann Th. Wagner  
Klaus Jürgen Fischer  
Joachim-Dietrich von Frommann

# **Strömungs- und Kolbenmaschinen**

**Lern- und Übungsbuch**

4., überarbeitete Auflage

Mit 270 Bildern



Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig / Wiesbaden

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Arbeitshinweise und allgemeine Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Numerierung	1
1.2	Notwendige Kenntnisse	1
1.3	Gleichungen	2
1.4	Einheiten	2
1.5	Einheitenumrechnung	2
1.6	Durchführen von Rechnungen	3
1.7	Ablezen von Tabellenwerten	4
1.8	Spezifische Größen; Dichte, Wichte	5
1.9	Molare Größen	6
1.10	Ströme	6
1.11	Normierte Größen	8
<b>2</b>	<b>Wärmelehre</b>	<b>9</b>
2.1	Das geschlossene System	9
2.2	Der Zustand	10
2.3	Die innere Energie	13
2.4	Der erste Hauptsatz der Wärmelehre für geschlossene Systeme	15
2.5	Volumenänderungsarbeit	17
2.6	Wärme, Entropie	20
2.7	Spezifische Wärmekapazität; Gaskonstante	23
2.8	Entropie, Entropiedifferenz	27
2.9	Enthalpie	29
2.10	Technische Arbeit	31
2.11	Zustandsänderungen	33
2.11.1	Isochore	34
2.11.2	Isobare	43
2.11.3	Isotherme	44
2.11.4	Adiabate	46
2.12	Dissipation	54
2.12.1	Wärmeaustausch	54
2.12.2	Reibung	56
2.12.3	Drosselung	57
2.12.4	Mischung	58
2.13	Exergie und Anergie	59
2.13.1	Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre	59
2.13.2	Exergieanteile	59
2.13.3	Das Exergie-Anergie-Flußschaubild	63

<b>3</b>	<b>Verbrennung</b> .....	67
3.1	Physikalische Grundlagen .....	67
3.2	Chemische Grundlagen .....	68
3.3	Mengenberechnung .....	71
3.3.1	Feste und flüssige Brennstoffe .....	71
3.3.2	Gasförmige Brennstoffe .....	73
3.4	Brenn- und Heizwert .....	74
3.5	Das Enthalpie-Temperatur-Diagramm .....	76
3.6	Praktische Verbrennungsdurchführung .....	78
3.6.1	Brennstoff .....	78
3.6.2	Zündung und Verbrennung .....	78
3.6.3	Rauchgas .....	79
<b>4</b>	<b>Kreisprozesse</b> .....	81
4.1	Grundsätzliches .....	81
4.2	Der Carnot-Kreisprozeß .....	82
4.3	Der mittlere Druck .....	84
4.4	Wirkungsgrade .....	85
4.5	Verluste .....	87
4.6	Vergrößerung des Wirkungsgrads durch Umgehen der Kreisprozesse .....	89
4.6.1	Direkte Umwandlung chemischer in elektrische Energie ..	90
4.6.2	Umwandlung chemischer in elektrische Energie über Wärme .....	90
<b>5</b>	<b>Kolbenmaschinen</b> .....	92
5.1	Wechselwirkung zwischen Kolben und Fluid .....	92
5.2	Der Kurbeltrieb .....	94
5.3	Massenkräfte .....	96
5.4	Massenausgleich .....	98
<b>6</b>	<b>Verbrennungsmotoren</b> .....	101
6.1	Viertakt-Ottomotor .....	101
6.1.1	Grundsätzlicher Aufbau und Arbeitsweise .....	101
6.1.2	Konstruktion .....	104
6.1.3	Gemischbildung .....	109
6.1.4	Zündung und Verbrennung .....	114
6.1.5	Beurteilungs- und Kenngrößen .....	115
6.2	Viertakt-Dieselmotor .....	116
6.2.1	Grundsätzlicher Aufbau und Arbeitsweise .....	117
6.2.2	Konstruktion .....	119
6.2.3	Gemischbildung .....	127

6.2.4	Selbstzündung und Verbrennung .....	131
6.2.5	Beurteilungs- und Kenngrößen .....	133
6.3	Zweitakt-Ottomotor .....	135
6.3.1	Grundsätzlicher Aufbau und Arbeitsweise .....	136
6.3.2	Spülverfahren und Steuerung .....	139
6.3.3	Beurteilungs- und Kenngrößen .....	142
6.4	Zweitakt-Dieselmotor .....	143
6.4.1	Aufbau und Arbeitsweise .....	143
6.4.2	Beurteilungs- und Kenngrößen .....	147
6.5	Kreiskolbenmotor von Wankel .....	148
6.5.1	Konstruktion und Arbeitsweise .....	149
6.6	Mehrzylindermotoren .....	151
6.6.1	Lage und Anordnung der Zylinder .....	151
6.6.2	Das Ansaug- und Auspuffverhalten .....	153
6.7	Aufladung .....	154
6.7.1	Aufladeverfahren .....	155
6.7.2	Der Abgasturbolader .....	156
6.7.3	Leistungssteigerung durch Aufladung .....	157
6.8	Leistung und Wirkungsgrad .....	160
6.8.1	Die Ermittlung der Leistung .....	160
6.8.2	Wirkungsgrade .....	162
6.9	Idealisierte Vergleichsprozesse für Verbrennungsmotoren .....	166
6.9.1	Der Gleichraumprozeß .....	166
6.9.2	Der Gleichdruckprozeß .....	168
6.9.3	Der kombinierte Gleichraum-Gleichdruckprozeß .....	171
6.9.4	Der wirkliche Verbrennungsmotor .....	173
<b>7</b>	<b>Kolbenverdichter .....</b>	<b>175</b>
7.1	Konstruktion und Arbeitsweise .....	175
7.1.1	Hubkolbenverdichter .....	175
7.1.2	Membranverdichter .....	177
7.1.3	Umlaufkolbenverdichter .....	177
7.2	Der Kreisprozeß im Kolbenverdichter .....	181
7.2.1	Theoretischer Arbeitsablauf eines einstufigen Hubkolbenverdichters .....	181
7.2.2	Der wirkliche Arbeitsablauf in einem einstufigen Hubkolbenverdichter .....	183
7.3	Der mehrstufige Verdichter mit Zwischenkühlung .....	190
7.4	Einsatz und Größenordnung .....	193

<b>8</b>	<b>Kolbenpumpen</b>	195
8.1	Einfachwirkende Kolbenpumpen	195
8.1.1	Wirkungsweise	195
8.1.2	Arbeitsdiagramm	202
8.2	Ermittlung der Antriebsleistung	203
8.3	Bauarten	205
8.3.1	Mehrfachwirkende Hubkolbenpumpen	205
8.3.2	Membranpumpen	208
8.3.3	Zahnradpumpen	209
8.3.4	Flügelzellenpumpen	210
8.3.5	Schraubepumpen	211
8.4	Einsatzgebiete und Größenordnung	212
<b>9</b>	<b>Einführung in die Strömungslehre</b>	213
9.1	Hydrostatik	213
9.2	Kennzeichnung von Strömungen	214
9.3	Kontinuitätsgesetz	215
9.4	Der erste Hauptsatz für offene Systeme	218
9.4.1	Stoff- und nicht stoffgebundene Energieformen	219
9.4.2	Anwendung des Energieerhaltungssatzes	220
9.4.3	Berechnungsbeispiel	222
9.5	Strömungsverluste	231
9.5.1	Fluidreibung, Zähigkeit	231
9.5.2	Strömungsformen	232
9.5.3	Rohrleitungsverluste	233
9.5.4	Reversible Strömungsarbeit; Wirkungsgrad	233
9.5.5	Berechnungsbeispiel	237
9.5.6	Rohrleitungskennlinie	243
9.6	Strömungstechnische Besonderheiten	244
9.6.1	Messungen	244
9.6.2	Kavitation	249
9.6.3	Mündung, Düse, Diffusor	250
<b>10</b>	<b>Strömungsmaschinen</b>	255
10.1	Der Geschwindigkeitsplan	255
10.1.1	Komponenten	255
10.1.2	Relativ- und Systemgeschwindigkeit	257
10.2	Impulsübertragung	260
10.2.1	Impulssatz	260
10.2.2	Eulersche Turbinen- und Hauptgleichung	260
10.3	Das Enthalpie-Entropie-Diagramm	262
10.4	Vergleich zu Kolbenmaschinen	264

<b>11 Kreiselpumpen</b> .....	266
11.1 Aufbau .....	266
11.2 Strömung im Laufrad .....	270
11.3 Spezielle Kennziffern .....	274
11.3.1 Abhängigkeit der spezifischen Förderarbeit bzw. Förderhöhe von Drehzahl und Laufraddurchmesser .....	274
11.3.2 Abhängigkeit des Förderstroms von Drehzahl und Laufraddurchmesser .....	275
11.3.3 Abhängigkeit der Leistung von Drehzahl und Laufraddurchmesser .....	275
11.3.4 Spezifische Drehzahl .....	276
11.4 Entstehung der Drosselkurve .....	277
11.5 Bestimmung des Betriebspunktes .....	280
11.6 Regelung .....	282
11.6.1 Drosselregelung .....	282
11.6.2 Drehzahlregelung .....	283
11.7 Stabile und labile Förderung .....	284
11.7.1 Stabile Förderung .....	284
11.7.2 Labile Förderung .....	284
11.8 Wirkungsgrade .....	285
11.8.1 Hydraulischer Wirkungsgrad .....	285
11.8.2 Liefergrad, volumetrischer Wirkungsgrad .....	286
11.8.3 Radseitenreibung und innerer Wirkungsgrad .....	286
11.8.4 Mechanischer Wirkungsgrad .....	287
11.9 Antriebsleistung .....	287
11.10 Selbstansaugung .....	288
 <b>12 Wasserturbinen</b> .....	 289
12.1 Peltonturbinen .....	290
12.2 Francisturbinen .....	296
12.3 Kaplanurbinen .....	299
12.4 Kenngrößen von Wasserturbinen .....	300
12.5 Vergleich, Einsatz und Größenordnung .....	302
12.6 Leistungsberechnung .....	303
12.7 Wasserkraftwerke .....	303
 <b>13 Der Aggregatzustand und seine Änderung</b> .....	 304
13.1 Begriffe .....	304
13.2 Energiebilanz .....	307
13.3 Das Druck-Volumen-Temperatur-Diagramm .....	311
13.4 Das $T$ - $S$ - und das $h$ - $s$ -Diagramm .....	313
13.5 Diagrammvergleiche .....	315

<b>14 Die Dampferzeugung</b> .....	318
14.1 Energieformen und -umwandlung .....	318
14.2 Dampferzeuger .....	321
14.2.1 Feuerung .....	321
14.2.2 Großwasserraumkessel .....	323
14.2.3 Wasserrohrkessel .....	323
14.3 Der Wasser-Wasserdampf-Kreisprozeß .....	330
14.3.1 Kesselwirkungsgrad .....	331
14.3.2 Anlagenwirkungsgrad .....	333
14.4 Kernreaktoren .....	339
14.4.1 Energieerzeugung im Kernkraftwerk .....	340
14.4.2 Reaktortypen .....	340
14.5 Umweltschutz .....	342
<b>15 Dampfturbinen</b> .....	344
15.1 Allgemeiner Aufbau und Wirkungsweise .....	344
15.2 Laval-Turbine .....	346
15.2.1 Die Gleichdruckbeschaufelung .....	346
15.3 Curtis-Turbine .....	349
15.4 Zoelly-Turbine .....	351
15.5 Parsons-Turbine .....	352
15.6 Ausgeführte Großturbinen und Vergleich .....	356
15.7 Verluste .....	360
<b>16 Gasturbinen (Raketen- und Strahltriebwerke)</b> .....	363
16.1 Raketentriebwerke .....	363
16.1.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	363
16.1.2 Berechnung des Schubes und des Wirkungsgrades .....	365
16.2 Luftstrahltriebwerke .....	367
16.2.1 Berechnung des Schubes und des Wirkungsgrades .....	368
16.2.2 Staustrahltriebwerk (Lorin-Düse) .....	368
16.3 Turbinenluftstrahltriebwerke .....	372
16.3.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	372
16.3.2 Einsatzbereich, Vor- und Nachteile .....	373
16.4 Der offene Gleichdruckprozeß für stationäre Gasturbinen .....	374
16.4.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	374
16.4.2 Das Arbeits- und Wärmediagramm .....	377
16.4.3 Ermittlung des Wirkungsgrades .....	378
16.4.4 Der reale offene Kreisprozeß .....	380
16.5 Der geschlossene Gleichdruckprozeß für stationäre Gasturbinen .....	385
16.5.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	385
16.5.2 Das Wärmediagramm .....	386

16.5.3	Der reale geschlossene Kreisprozeß .....	387
16.5.4	Hauptkennwerte und Wirkungsgrade .....	387
16.5.5	Die Vor- und Nachteile der geschlossenen gegenüber der offenen Gasturbinenanlage .....	389
16.6	Teilgeschlossene Gasturbinenprozesse .....	389
16.7	Werkstoffe .....	389
16.8	Einsatzgebiete und Größenordnung .....	390
<b>Anhang</b>	.....	<b>392</b>
A1	Symbole und Einheiten .....	392
A1.1	Symbole .....	392
A1.1.1	Das griechische Alphabet .....	392
A1.1.2	Formelbuchstaben und deren Bedeutung; Einheiten .....	392
A1.1.3	Indizes und deren Bedeutung .....	397
A1.2	Einheiten .....	400
A1.2.1	Die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems ..	400
A1.2.2	Vorsätze von Einheiten und deren Kurzzeichen .....	401
A1.2.3	Die wichtigsten Einheiten und Umrechnungsbeziehungen ..	401
A2	Formelsammlung .....	404
A2.1	Wärmelehre .....	404
A2.1.1	Zustandsänderungen .....	404
A2.1.2	Exergie, Anergie, Dissipation, Exergieverlust .....	405
A2.1.3	Verbrennung .....	405
A2.2	Strömungslehre .....	407
A2.3	Wirkungsgrade und Maschinen .....	409
A3	Tabellen und Diagramme .....	414
A3.1	Physikalische und Stoffkonstanten .....	414
A3.1.1	Physikalische Konstanten .....	414
A3.1.2	Die chemischen Elemente .....	415
A3.1.3	Stoffwerte fester Stoffe .....	418
A3.1.4	Stoffwerte von Flüssigkeiten .....	419
A3.1.5	Stoffwerte von Gasen .....	420
A3.2	Wärmelehre .....	421
A3.2.1	Die spezifische Wärmekapazität der wichtigsten Gase ....	421
A3.2.2	Die spezifische absolute Entropie der wichtigsten Gase ...	421
A3.2.3	Dampf tabel für das Naßdampfgebiet von H <sub>2</sub> O .....	422
A3.2.4	Dampf tabel für überhitzten Wasserdampf .....	424
A3.2.5	Das Enthalpie-Entropie-Diagramm von H <sub>2</sub> O .....	425
A3.2.6	Das Temperatur-Entropie-Diagramm von CO <sub>2</sub> .....	426
A3.2.7	Zeichensymbole nach DIN 2481 .....	427
A3.3	Strömungslehre .....	430
A3.3.1	Die kinematische Viskosität der wichtigsten Flüssig- keiten und Gase .....	430

A3.3.2 Die Rohrreibungszahl .....	431
A3.3.3 Widerstandszahlen für Rohrleitungseinbauten .....	431
A3.3.4 Absolute Wandrauhigkeit $k$ .....	433
A3.3.5 Durchflußzahlen $\alpha$ für glatte Rohre .....	433
A3.3.6 Expansionszahlen $\epsilon$ für beliebige Gase und Dämpfe .....	434
A3.4 Verbrennung .....	435
A3.4.1 Heizwert und Zusammensetzung fester und flüssiger Brennstoffe in Massenteilen .....	435
A3.4.2 Heizwert und Zusammensetzung gasförmiger Brennstoffe in Raumteilen .....	435
A3.4.3 Brenn- und Heizwert einiger Stoffe .....	436
A3.4.4 Das Enthalpie-Temperatur-Diagramm eines typischen Rauchgases .....	436
<b>Lösung der Übungsaufgaben .....</b>	<b>437</b>
<b>Ergänzende und weiterführende Literatur .....</b>	<b>440</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>442</b>