

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

# **Strömungs- und Kolbenmaschinen**

**Lern- und Übungsbuch**

3., verbesserte Auflage

Mit 270 Bildern



**Friedr. Vieweg & Sohn    Braunschweig / Wiesbaden**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 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 Ablesen von Tabellenwerten . . . . .	4
1.8 Spezifische Größen; Dichte, Wichte . . . . .	5
1.9 Molare Größen . . . . .	6
1.10 Ströme . . . . .	6
<b>2 Wärmelehre</b> . . . . .	<b>8</b>
2.1 Das geschlossene System . . . . .	8
2.2 Der Zustand . . . . .	9
2.3 Die innere Energie . . . . .	12
2.4 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre für geschlossene Systeme . . . . .	14
2.5 Volumenänderungsarbeit . . . . .	16
2.6 Wärme, Entropie . . . . .	19
2.7 Spezifische Wärmekapazität; Gaskonstante . . . . .	22
2.8 Entropie, Entropiedifferenz . . . . .	26
2.9 Enthalpie . . . . .	28
2.10 Technische Arbeit . . . . .	30
2.11 Zustandsänderungen . . . . .	32
2.11.1 Isochore . . . . .	33
2.11.2 Isobare . . . . .	42
2.11.3 Isotherme . . . . .	43
2.11.4 Adiabate . . . . .	45
2.12 Dissipation . . . . .	53
2.12.1 Wärmeaustausch . . . . .	53
2.12.2 Reibung . . . . .	55
2.12.3 Drosselung . . . . .	56
2.12.4 Mischung . . . . .	57
2.13 Exergie und Anergie . . . . .	58
2.13.1 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	58
2.13.2 Exergieanteile . . . . .	58
2.13.3 Das Exergie-Anergie-Flußschaubild . . . . .	62

<b>3</b>	<b>Verbrennung</b>	66
3.1	Physikalische Grundlagen	66
3.2	Chemische Grundlagen	67
3.3	Mengenberechnung	70
3.3.1	Feste und flüssige Brennstoffe	70
3.3.2	Gasförmige Brennstoffe	72
3.4	Brenn- und Heizwert	73
3.5	Das Enthalpie-Temperatur-Diagramm	75
3.6	Praktische Verbrennungsdurchführung	77
3.6.1	Brennstoff	77
3.6.2	Zündung und Verbrennung	77
3.6.3	Rauchgas	78
<b>4</b>	<b>Kreisprozesse</b>	80
4.1	Grundsätzliches	80
4.2	Der Carnot-Kreisprozeß	81
4.3	Der mittlere Druck	83
4.4	Wirkungsgrade	84
4.5	Verluste	85
<b>5</b>	<b>Kolbenmaschinen</b>	89
5.1	Wechselwirkung zwischen Kolben und Fluid; die wichtigsten Einflußgrößen	89
5.2	Der Kurbeltrieb	91
<b>6</b>	<b>Verbrennungsmotoren</b>	93
6.1	Viertakt-Ottomotor	93
6.1.1	Der grundsätzliche Aufbau des Viertakt-Ottomotors	93
6.1.2	Arbeitsweise des Viertakt-Ottomotors	94
6.1.3	Das Indikatordiagramm	95
6.1.4	Kennzeichnende Merkmale	95
6.1.5	Konstruktion	96
6.1.6	Wichtige Bauteile	96
6.1.7	Gemischbildung	100
6.1.8	Zündung und Verbrennung	105
6.1.9	Steuerung	106
6.1.10	Beurteilungsgrößen	107
6.1.11	Kennlinien	108
6.2	Viertakt-Dieselmotor	109
6.2.1	Der grundsätzliche Aufbau des Viertakt-Dieselmotors	109
6.2.2	Arbeitsweise des Viertakt-Dieselmotors	110
6.2.3	Das Indikatordiagramm	110
6.2.4	Kennzeichnende Merkmale	111

6.2.5	Konstruktion	111
6.2.6	Wichtige Bauteile	114
6.2.7	Gemischbildung	118
6.2.8	Selbstzündung und Verbrennung	123
6.2.9	Steuerung	124
6.2.10	Beurteilungsgrößen	125
6.2.11	Kennlinien	127
6.3	Zweitakt-Ottomotor	127
6.3.1	Der grundsätzliche Aufbau des Zweitakt-Ottomotors	128
6.3.2	Die Arbeitsweise des Zweitakt-Ottomotors	128
6.3.3	Das Indikatordiagramm	129
6.3.4	Kennzeichnende Merkmale	129
6.3.5	Konstruktion	131
6.3.6	Spülverfahren	131
6.3.7	Beurteilungsgrößen und Kennlinien	134
6.4	Zweitakt-Dieselmotor	135
6.4.1	Aufbau und Arbeitsweise des Zweitakt-Dieselmotors	135
6.4.2	Kennzeichnende Merkmale, Indikatordiagramm	139
6.4.3	Beurteilungsgrößen und Kennlinien	140
6.5	Kreiskolbenmotor von Wankel	140
6.5.1	Konstruktion und Arbeitsweise	141
6.5.2	Vor- und Nachteile	143
6.6	Mehrzylindermotoren	143
6.6.1	Lage und Anordnung der Zylinder	143
6.6.2	Das Ansaug- und Auspuffverhalten	145
6.6.3	Massenkräfte und Massenausgleich	146
6.7	Aufladung	151
6.7.1	Aufladeverfahren	152
6.7.2	Der Abgasturbolader	153
6.7.3	Berechnung der Leistungssteigerung durch Aufladung	155
6.8	Ermittlung von Leistung und Wirkungsgrad	157
6.8.1	Die Ermittlung der Leistung	157
6.8.2	Wirkungsgrade	161
6.9	Idealisierte Vergleichsprozesse für Verbrennungsmotoren	165
6.9.1	Der Gleichraumprozeß	166
6.9.2	Der Gleichdruckprozeß	168
6.9.3	Der kombinierte Gleichraum-Gleichdruckprozeß	171
6.10	Der wirkliche Verbrennungsmotor	173
6.10.1	Die Verluste des vollkommenen Motors	174
6.10.2	Die Verluste des wirklichen Motors	175

<b>7</b>	<b>Kolbenverdichter</b>	176
7.1	Konstruktion und Arbeitsweise	176
7.1.1	Hubkolbenverdichter	176
7.1.2	Membranverdichter	179
7.1.3	Umlaufkolbenverdichter	179
7.2	Der Kreisprozeß im Kolbenverdichter	183
7.2.1	Theoretischer Arbeitsablauf eines einstufigen Hubkolbenverdichters	183
7.2.2	Der wirkliche Arbeitsablauf in einem einstufigen Hubkolbenverdichter	185
7.3	Der mehrstufige Verdichter mit Zwischenkühlung	192
7.4	Einsatz und Größenordnung	195
<b>8</b>	<b>Kolbenpumpen</b>	197
8.1	Einfachwirkende Kolbenpumpen	197
8.1.1	Wirkungsweise	197
8.1.2	Arbeitsdiagramm	204
8.2	Ermittlung der Antriebsleistung	205
8.3	Bauarten	208
8.3.1	Mehrfachwirkende Hubkolbenpumpen	208
8.3.2	Membranpumpen	210
8.3.3	Zahnradpumpen	211
8.3.4	Flügelzellenpumpen	213
8.3.5	Schraubenpumpen	213
8.4	Einsatzgebiete und Größenordnung	214
<b>9</b>	<b>Einführung in die Strömungslehre</b>	216
9.1	Ein wenig Hydrostatik	216
9.2	Grundbegriffe zur Kennzeichnung von Strömungen	217
9.3	Kontinuitätsgesetz	218
9.4	Der erste Hauptsatz für offene Systeme	221
9.4.1	Stoff- und nicht-stoffgebundene Energieformen	222
9.4.2	Anwendung des Energieerhaltungssatzes	223
9.4.3	Berechnungsbeispiel	225
9.5	Strömungsverluste	234
9.5.1	Fluidreibung, Zähigkeit	234
9.5.2	Strömungsformen	235
9.5.3	Rohrleitungsverluste	236
9.5.4	Reversible Strömungsarbeit; Wirkungsgrad	236
9.5.5	Berechnungsbeispiel	240
9.5.6	Rohrleitungskennlinie	246

9.6	Strömungstechnische Besonderheiten	247
9.6.1	Messungen	247
9.6.2	Kavitation	252
9.6.3	Mündung, Düse, Diffusor	253
<b>10</b>	<b>Strömungsmaschinen</b>	<b>258</b>
10.1	Der Geschwindigkeitsplan	258
10.1.1	Komponenten	258
10.1.2	Relativ- und Systemgeschwindigkeit	260
10.2	Impulsübertragung	263
10.2.1	Impulssatz	263
10.2.2	Eulersche Turbinen- und Hauptgleichung	263
10.3	Das Enthalpie-Entropie-Diagramm	265
10.4	Vergleich zu Kolbenmaschinen	267
<b>11</b>	<b>Kreiselpumpen</b>	<b>269</b>
11.1	Aufbau einer Kreiselpumpe	269
11.2	Strömung im Laufrad	269
11.3	Spezielle Kennziffern	273
11.3.1	Abhängigkeit der spezifischen Förderarbeit bzw. Förderhöhe von der Drehzahl und dem Laufraddurchmesser	277
11.3.2	Abhängigkeit des Förderstromes von der Drehzahl und dem Laufraddurchmesser	278
11.3.3	Abhängigkeit der Leistung von der Drehzahl und dem Laufraddurchmesser	278
11.3.4	Spezifische Drehzahl	279
11.4	Entstehung der Drosselkurve	280
11.5	Bestimmung des Betriebspunktes	283
11.6	Regelung	285
11.6.1	Drosselregelung	285
11.6.2	Drehzahlregelung	286
11.7	Stabile und labile Förderung	287
11.7.1	Stabile Förderung	287
11.7.2	Labile Förderung	287
11.8	Wirkungsgrade	288
11.8.1	Hydraulischer Wirkungsgrad	289
11.8.2	Liefergrad, volumetrischer Wirkungsgrad	289
11.8.3	Radseitenreibung und innerer Wirkungsgrad	289
11.8.4	Mechanischer Wirkungsgrad	290
11.9	Antriebsleistung	290
11.9.1	Nutzleistung	291
11.9.2	Innere Leistung	291
11.9.3	Kupplungsleistung	291
11.10	Selbstansaugung	291

<b>12 Wasserturbinen</b> .....	292
12.1 Pelton-turbinen .....	293
12.2 Francisturbinen .....	298
12.3 Kaplan-turbinen .....	301
12.4 Einige Kenngrößen der Wasserturbinen .....	302
12.5 Vergleich, Einsatz und Größenordnung .....	305
12.6 Leistungsberechnung .....	305
12.7 Wasserkraftwerke .....	305
<b>13 Der Aggregatzustand und seine Änderung</b> .....	306
13.1 Begriffe .....	306
13.2 Energiebilanz .....	309
13.3 Das Druck-Volumen-Temperatur-Diagramm .....	313
13.4 Das $T$ - $s$ - und das $h$ - $s$ -Diagramm .....	315
13.5 Diagrammvergleiche .....	317
<b>14 Die Dampferzeugung</b> .....	320
14.1 Energieformen und -umwandlung .....	320
14.2 Dampferzeuger .....	323
14.2.1 Feuerung .....	323
14.2.2 Großwasserraumkessel .....	325
14.2.3 Wasserrohrkessel .....	325
14.3 Der Wasser-Wasserdampf-Kreisprozeß .....	332
14.3.1 Kesselwirkungsgrad .....	333
14.3.2 Anlagenwirkungsgrad .....	335
<b>15 Dampfturbinen</b> .....	342
15.1 Allgemeiner Aufbau und Wirkungsweise .....	342
15.2 Laval-Turbine .....	344
15.2.1 Die Gleichdruckbeschaufelung .....	344
15.3 Curtis-Turbine .....	347
15.4 Zoelly-Turbine .....	349
15.5 Parsons-Turbine .....	350
15.6 Ausgeführte Großturbinen und Vergleich .....	354
15.7 Verluste .....	358
<b>16 Gasturbinen (Raketen- und Strahltriebwerke)</b> .....	361
16.1 Raketentriebwerke .....	361
16.1.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	361
16.1.2 Berechnung des Schubes und des Wirkungsgrades .....	363
16.1.3 Beispiel .....	365

16.2	Luftstrahltriebwerke	365
16.2.1	Berechnung des Schubes und des Wirkungsgrades	366
16.2.2	Staustrahltriebwerk (Lorin-Düse)	366
16.2.3	Beispiel	368
16.3	Turbinenluftstrahltriebwerke	370
16.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	370
16.3.2	Einsatzbereich, Vor- und Nachteile	371
16.4	Der offene Gleichdruckprozeß für stationäre Gasturbinen	372
16.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	372
16.4.2	Das Arbeits- und Wärmediagramm	375
16.4.3	Ermittlung des Wirkungsgrades	376
16.4.4	Der reale offene Kreisprozeß	378
16.4.5	Beispiele	380
16.5	Der geschlossene Gleichdruckprozeß für stationäre Gasturbinen	383
16.5.1	Aufbau und Wirkungsweise	383
16.5.2	Das Wärmediagramm	384
16.5.3	Der reale geschlossene Kreisprozeß	385
16.5.4	Hauptkennwerte und Wirkungsgrade	385
16.5.5	Die Vor- und Nachteile der geschlossenen gegenüber der offenen Gasturbinenanlage	387
16.6	Teilgeschlossene Gasturbinenprozesse	388
16.7	Werkstoffe	388
16.8	Einsatzgebiete und Größenordnung	388
<b>17</b>	<b>Entwicklungstendenzen</b>	<b>390</b>
17.1	Kernreaktoren	390
17.1.1	Energieerzeugung im Kernkraftwerk	390
17.1.2	Reaktortypen	390
17.2	Vergrößerung des Wirkungsgrades	392
17.3	Direkte Umwandlung chemischer in elektrische Energie	393
17.4	Umwandlung chemischer in elektrische Energie über Wärme	393
17.5	Umweltschutz	395
<b>Anhang</b>		<b>397</b>
<b>A 1</b>	<b>Symbole und Einheiten</b>	<b>397</b>
A 1.1	Symbole	397
A 1.1.1	Das griechische Alphabet	397
A 1.1.2	Formelbuchstaben und deren Bedeutung; Einheiten	397
A 1.1.3	Indizes und deren Bedeutung	402

A 1.2	Einheiten	405
A 1.2.1	Die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems	405
A 1.2.2	Vorsätze von Einheiten und deren Kurzzeichen	406
A 1.2.3	Die wichtigsten Einheiten und Umrechnungs- beziehungen	406
A 2	Formelsammlung	409
A 2.1	Wärmelehre	409
A 2.1.1	Zustandsänderungen	409
A 2.1.2	Exergie, Anergie, Dissipation, Exergieverlust	410
A 2.1.3	Verbrennung	410
A 2.2	Strömungslehre	412
A 2.3	Wirkungsgrade und Maschinen	414
A3	Tabellen und Diagramme	419
A 3.1	Physikalische und Stoffkonstanten	419
A 3.1.1	Physikalische Konstanten	419
A 3.1.2	Die chemischen Elemente	420
A 3.1.3	Stoffwerte fester Stoffe	423
A 3.1.4	Stoffwerte von Flüssigkeiten	424
A 3.1.5	Stoffwerte von Gasen	425
A 3.2	Wärmelehre	426
A 3.2.1	Die spezifische Wärmekapazität der wichtigsten Gase	426
A 3.2.2	Die spezifische absolute Entropie der wichtigsten Gase	426
A 3.2.3	Dampf tabel für das Naßdampfgebiet von $H_2O$	427
A 3.2.4	Dampf tabel für überhitzten Wasserdampf	429
A 3.2.5	Das Enthalpie-Entropie-Diagramm von $H_2O$	430
A 3.2.6	Das Temperatur-Entropie-Diagramm von $CO_2$	431
A 3.2.7	Zeichensymbole nach DIN 2481	432
A 3.3	Strömungslehre	435
A 3.3.1	Die kinematische Viskosität der wichtigsten Flüssigkeiten und Gase	435
A 3.3.2	Die Rohrreibungszahl	436
A 3.3.3	Widerstandszahlen für verschiedene Rohrleitungseinbauten	436
A 3.3.4	Absolute Wandrauigkeit $k$	438
A 3.3.5	Durchflußzahlen $\alpha$ für glatte Rohre von 50 bis 1000 mm Innendurchmesser nach DIN 1952	438
A 3.3.6	Expansionszahlen $\epsilon$ für beliebige Gase und Dämpfe nach DIN 1952	439

A 3.4 Verbrennung .....	440
A 3.4.1 Heizwert und Zusammensetzung fester und flüssiger Brennstoffe in Massenteilen in Prozent .....	440
A 3.4.2 Heizwert und Zusammensetzung gasförmiger Brennstoffe in Raumteilen in Prozent .....	440
A 3.4.3 Brenn- und Heizwert einiger Stoffe .....	441
A 3.4.4 Das Enthalpie-Temperatur-Diagramm eines typischen Rauchgases .....	441
Lösung der Übungsaufgaben .....	442
Ergänzende und weiterführende Literatur .....	445
Sachwortverzeichnis .....	447