

Inhaltsverzeichnis

1	Arbeitshinweise und allgemeine Grundlagen	1
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
2	Wärmelehre	8
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	19
2.7	Spezifische Wärmekapazität; Gaskonstante	22
2.8	Berechnung der Entropie und der 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

3 Verbrennung	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
4 Kreisprozesse	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
5 Kolbenmaschinen	89
5.1 Wechselwirkung zwischen Kolben und Fluid; die wichtigsten Einflußgrößen	89
5.2 Der Kurbeltrieb	91
6 Verbrennungsmotoren	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 Winkel	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

7 Kolbenverdichter	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
8 Kolbenpumpen	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
9 Einführung in die Strömungslehre	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
10	Strömungsmaschinen	258
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
11	Kreiselpumpen	269
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 Lauf- raddurchmesser	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	Nutzeistung	291
11.9.2	Innere Leistung	291
11.9.3	Kupplungsleistung	291
11.10	Selbstansaugung	291

12 Wasserturbinen	292
12.1 Peltonturbinen	293
12.2 Francisturbinen	298
12.3 Kaplanturbinen	301
12.4 Einige Kenngrößen der Wasserturbinen	302
12.5 Vergleich, Einsatz und Größenordnung	305
12.6 Leistungsberechnung	305
12.7 Wasserkraftwerke	305
13 Der Aggregatzustand und seine Änderung	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
14 Die Dampferzeugung	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
15 Dampfturbinen	342
15.1 Allgemeiner Aufbau und Wirkungsweise	342
15.2 Laval-Turbine	344
15.2.1 Die Gleichdruckbeschauflung	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
16 Gasturbinen (Raketen- und Strahltriebwerke)	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
17	Entwicklungstendenzen	390
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
Anhang	397
A 1	Symbole und Einheiten	397
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 Umrechnungsbeziehungen	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
A 3 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 Dampftafel für das Naßdampfgebiet von H_2O	427
A 3.2.4 Dampftafel 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 Rohrrreibungszahl	436
A 3.3.3 Widerstandszahlen für verschiedene Rohrleitungseinbauten	436
A 3.3.4 Absolute Wandrauhigkeit k	438
A 3.3.5 Durchflußzahlen α für glatte Rohre von 50 bis 1000 mm Innendurchmesser nach DIN 1952	438
A 3.3.6 Expansionszahlen ϵ 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