

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen	XV
I. Aufgabe und Grundbegriffe der Thermodynamik	1
1. Aufgabe der Thermodynamik	1
2. Thermodynamische Systeme	3
3. Die Koordinaten des Systems	4
4. Einige Eigenschaften von Zustandsgrößen	6
II. Das thermodynamische Gleichgewicht und die empirische Temperatur	9
1. Das thermische Gleichgewicht	9
2. Der nullte Hauptsatz und die empirische Temperatur	11
3. Die internationale Temperaturskala	16
4. Praktische Temperaturmessung	19
a) Flüssigkeitsthermometer	19
b) Widerstandsthermometer	22
c) Thermoelemente	23
d) Strahlungsthermometer	25
5. Maßsysteme und Einheiten. Größengleichungen	25
6. Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase	31
6.1. Die Einheit der Stoffmenge. Die Gaskonstante und das Gesetz von Avogadro	36
III. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	40
1. Allgemeine Formulierung des ersten Hauptsatzes	40
2. Die Energieform Arbeit	42
2.1 Mechanische Energie	43
2.2 Volumarbeit	45
2.3 Die Arbeit einiger anderer Prozesse. Verallgemeinerung des Be- griffs der Arbeit	49
a) Der elastische Stab	49

b) Oberflächenfilme	50
c) Elektrochemische Zellen	50
d) Polarisation in einem Dielektrikum	51
e) Magnetisierung	55
f) Elektromagnetische Felder	58
g) Verallgemeinerung des Begriffs Arbeit	59
2.4 Die dissipierte Arbeit	60
3. Die innere Energie	62
3.1 Kinetische Deutung der inneren Energie	63
4. Die Energieform Wärme	68
5. Anwendung des ersten Hauptsatzes auf geschlossene Systeme	69
6. Messung und Eigenschaften von innerer Energie und Wärme	70
7. Anwendung des ersten Hauptsatzes auf stationäre Prozesse in offenen Systemen	73
8. Anwendung des ersten Hauptsatzes auf instationäre Prozesse in offenen Systemen	80
9. Die kalorischen Zustandsgleichungen und die spezifischen Wärmekapazitäten	83
9.1 Die kalorischen Zustandsgleichungen und die spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase	85
9.2 Die spezifischen Wärmekapazitäten der wirklichen Gase	88
10. Einfache Zustandsänderungen idealer Gase	97
a) Zustandsänderung bei konstantem Volum oder Isochore	97
b) Zustandsänderung bei konstantem Druck oder Isobare	98
c) Zustandsänderung bei konstanter Temperatur oder Isotherme	98
d) Quasistatische adiabate Zustandsänderungen	100
e) Polytrope Zustandsänderungen	103
f) Logarithmische Diagramme zur Darstellung von Zustandsänderungen	106
11. Das Verdichten von Gasen und der Arbeitsgewinn durch Gasentspannung	107
IV. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	112
1. Das Prinzip der Irreversibilität	112
2. Entropie und absolute Temperatur	116
3. Die Entropie als vollständiges Differential und die absolute Temperatur als integrierender Nenner	121
4. Einführung des Entropiebegriffes und der absoluten Temperaturskala mit Hilfe des integrierenden Nenners	127

5. Statistische Deutung des zweiten Hauptsatzes	131
5.1 Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Zustandes	131
5.2 Entropie und thermodynamische Wahrscheinlichkeit	135
5.3 Die endliche Größe der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit, Quantentheorie, Nernstsches Wärmetheorem	136
6. Eigenschaften der Entropie bei Austauschprozessen	138
7. Allgemeine Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermo- dynamik	141
7.1 Einige andere Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	143
7.2 Schlußfolgerungen aus den verschiedenen Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	145
a) Zusammenhang zwischen Entropie und Wärme	145
b) Zustandsänderungen adiabater Systeme	147
c) Isentrope Zustandsänderungen	148
7.3 Aussagen des ersten und zweiten Hauptsatzes über quasistati- sche und über irreversible Prozesse	148
7.4 Die Fundamentalgleichung	152
7.5 Die Entropie idealer Gase und anderer Körper	155
7.6 Die Entropiediagramme	159
7.7 Das Entropiediagramm der idealen Gase	160
7.8 Beweis, daß die innere Energie idealer Gase nur von der Tempe- ratur abhängt	162
8. Spezielle nichtumkehrbare Prozesse	163
a) Reibungsbehaftete Prozesse	163
b) Wärmeleitung unter Temperaturgefälle	169
c) Drosselung	171
d) Mischung und Diffusion	173
9. Anwendung des zweiten Hauptsatzes auf Energieumwandlungen	177
9.1 Einfluß der Umgebung auf Energieumwandlungen	177
9.2 Berechnung von Exergien	179
a) Die Exergie eines geschlossenen Systems	179
b) Die Exergie eines offenen Systems	181
c) Die Exergie einer Wärme	182
d) Die Exergie bei der Mischung zweier idealer Gase	186
9.3 Verluste durch Nichtumkehrbarkeiten	187
V. Thermodynamische Eigenschaften der Materie	192
1. Darstellung der Eigenschaften durch Zustandsgleichungen. Messung von Zustandsgrößen	192
2. Gase und Dämpfe, die p, v, T -Diagramme	194
2.1 Die kalorischen Zustandsgrößen von Dämpfen	203

2.2 Tabellen und Diagramme der Zustandsgrößen von Dämpfen	207
2.3 Einfache Zustandsänderungen von Dämpfen	214
a) Isobare Zustandsänderung	214
b) Isochore Zustandsänderung	214
c) Reversible adiabate Zustandsänderung	215
d) Adiabate Drosselung	217
2.4 Die Gleichung von Clausius und Clapeyron	218
2.5 Das schwere Wasser	222
3. Das Erstarren und der feste Zustand	223
3.1 Das Gefrieren und der Tripelpunkt	223
3.2 Die spezifische Wärmekapazität und die Entropie fester Körper	225
4. Abweichung der realen Gase von der Zustandsgleichung der idealen Gase	227
4.1 Die Zustandsgleichung realer Gase	227
4.2 Die van-der-Waalssche Zustandsgleichung	232
4.3 Das erweiterte Korrespondenzprinzip	238
4.4 Zustandsgleichungen für den praktischen Gebrauch	239
a) Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	242
4.5 Beziehung zwischen den kalorischen Zustandsgrößen und der thermischen Zustandsgleichung	246
4.6 Die Entropie als Funktion der einfachen Zustandsgrößen	247
4.7 Die Enthalpie und die innere Energie als Funktion der einfachen Zustandsgrößen	252
4.8 Die spezifischen Wärmekapazitäten	255
4.9 Die Drosselung realer Gase und die Ermittlung der kalorischen und thermischen Zustandsgleichung aus kalorischen Messungen	257
VI. Thermodynamische Prozesse	260
1. Der Carnotsche Kreisprozeß und seine Anwendung auf das ideale Gas	264
2. Die Umkehrung des Carnotschen Kreisprozesses	269
3. Die Heißluftmaschine und die Gasturbine	270
4. Der Stirling-Prozeß und der Philips-Motor	277
4.1 Die Umkehrung des Stirling-Prozesses	280
5. Die Arbeitsprozesse bei Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung. Otto- und Diesel-Motor	282
a) Das Otto- oder Verpuffungsverfahren	284
b) Das Diesel- oder Gleichdruckverfahren	286
c) Der gemischte Vergleichsprozess	288
d) Abweichungen des Vorganges in der wirklichen Maschine vom theoretischen Vergleichsprozess; Wirkungsgrade	290
e) Exergetischer Wirkungsgrad der Kreisprozesse	292

6. Der technische Luftverdichter	293
7. Die Dampfkraftanlage — der Clausius-Rankine-Prozeß	296
7.1 Besondere Arbeitsverfahren im Zusammenhang mit dem Clausius-Rankine-Prozeß	304
a) Die Verwendung von Dampf in der Nähe des kritischen Zustandes	304
b) Verluste beim Clausius-Rankine-Prozeß und Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades	305
c) Quecksilber, fluorierte bzw. chlorierte Kohlenwasserstoffe und andere Stoffe als Arbeitsmittel für Kraftanlagen	310
d) Binäre Gemische als Arbeitsmittel	313
8. Die Umkehrung der Dampfmaschine	314
a) Die Kaltdampfmaschine als Kältemaschine	314
b) Die reversible Heizung und die Wärmepumpe	316
 VII. Strömende Bewegung von Gasen und Dämpfen	 320
1. Laminare und turbulente Strömung, Geschwindigkeitsverteilung und mittlere Geschwindigkeit	320
2. Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie	323
3. Meßtechnische Anwendungen, Staurohr, Düse und Blende	326
4. Enthalpie und kinetische Energie der Strömung	330
5. Die Strömung eines idealen Gases durch Düsen und Mündungen	331
6. Die Schallgeschwindigkeit in Gasen und Dämpfen	335
7. Die erweiterte Düse nach de Laval	339
8. Verdichtungsstöße	346
 VIII. Der Luftstrahlantrieb	 355
1. Das Schubrohr (Lorin-Düse)	357
2. Der Turbinenstrahlantrieb	360
a) Der Turbinenstrahlantrieb im Stand	361
b) Der Turbinenstrahlantrieb im Fluge	361
c) Leistungssteigerung durch Nachverbrennung und Wassereinspritzung	364
 IX. Die Grundbegriffe der Wärmeübertragung	 365
1. Allgemeines	365
2. Stationäre Wärmeleitung	366

3. Wärmeübergang und Wärmedurchgang	370
4. Nichtstationäre Wärmeleitung	374
5. Die Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung	381
6. Grundlagen der Wärmeübertragung durch Konvektion	386
6.1 Dimensionslose Kenngrößen und Beschreibung des Wärme- transportes in einfachen Strömungsfeldern	389
6.2 Einzelprobleme der Wärmeübertragung ohne Phasenumwand- lung	397
a) Erzwungene Konvektion	397
b) Freie Konvektion	404
7. Wärmeübertragung beim Sieden und Kondensieren	409
7.1 Wärmeübergang beim Sieden	409
7.2 Wärmeübergang beim Kondensieren	417
8. Wärmeübertrager — Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom	421
8.1 Gleichstrom	422
8.2 Gegenstrom	424
8.3 Kreuzstrom	425
9. Die Wärmeübertragung durch Strahlung	428
9.1 Grundbegriffe, Emission, Absorption, das Gesetz von Kirch- hoff	428
9.2 Die Strahlung des schwarzen Körpers	432
9.3 Die Strahlung technischer Oberflächen	435
9.4 Der Wärmeaustausch durch Strahlung	438
Anhang: Dampftabellen	445
Lösungen der Übungsaufgaben	470
Namen- und Sachverzeichnis	496