

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1	Thermodynamische Systeme und Zustandsgrößen	1
1.2	Maße für Stoffmengen und stoffliche Zusammensetzungen. Molare Größen	4
1.3	Thermisches Gleichgewicht und der „Nullte Hauptsatz der Thermodynamik“. Ideales Gasgesetz	5
1.4	Gelöste Übungsaufgaben und Anwendungsbeispiele	10
1.4.1	Berechnung von Molarität, Molalität, Molenbruch und Gewichtsbruch	10
1.4.2	Umrechnung von Molenbruch in Gewichtsbruch	11
1.4.3	Molekülzahl im Hochvakuum	11
1.4.4	Airbags in Autos	11
1.4.5	Zusammensetzung einer Gasmischung aus Druck- und Massenbestimmung	12
1.4.6	Bestimmung der Molmasse von Trimethylamin	12
1.4.7	Kalibrierung eines Platin-Widerstandsthermometers	13
1.4.8	Funktionsweise eines Gasthermometers	14
1.4.9	Balance und Stabilität von Gaskolben auf einer Balkenwaage	15
1.4.10	Bestimmung des Anteils von Argon in der Luft	17
1.4.11	Zusammenhang von Molenbruch und Molalität	18
1.4.12	Mittlere Dichte eines heterogenen Systems am Beispiel der Erde	19
1.4.13	Berechnung der inneren Struktur des Saturn-Mondes Titan	20
1.4.14	Die Zahl verborgener Goldmünzen	20
1.4.15	Bergung einer im Meer versunkenen Gasdruckflasche	21
1.4.16	Anstieg des Meeresspiegels durch Schmelzwasser des Grönlandeises	22
1.4.17	Verdampfungsvolumen eines Metalls	22
1.4.18	Balance von schwimmenden Eiswürfeln	22
1.4.19	Die Masse der Erdatmosphäre	24

1.4.20	Szenario der Freisetzung des gesamten Kohlenstoffs der Erdoberfläche als CO <sub>2</sub> .....	24
1.4.21	Emission von Benzindämpfen aus Pkw's in Deutschland .....	25
1.4.22	Analyse des Versuches der „Magdeburger Halbkugeln“ .....	26
<b>2</b>	<b>Mathematische Grundlagen zur Behandlung von thermodynamischen Zustandsfunktionen</b> .....	<b>29</b>
2.1	Totales Differential, Wegunabhängigkeit des Integrals .....	29
2.2	Variablentransformationen .....	32
2.3	Der Schwarz'sche Satz .....	33
2.4	Homogene Funktionen und Euler'sche Gleichung .....	34
2.5	Legendre-Transformationen .....	36
2.6	Die Pfaff'sche Differentialform und der integrierende Nenner .....	38
2.7	Die Methode der Lagrange'schen Multiplikatoren .....	40
2.8	Kombinatorik und Binomialtheorem .....	43
2.9	Gelöste Übungsaufgaben und Anwendungsbeispiele .....	46
2.9.1	Nachweis der Homogenität einer Funktion vom Grad 1 .....	46
2.9.2	Homogenität von Funktionen mit mehreren Variablen .....	47
2.9.3	Legendre-Transformation und Rücktransformation einer Beispieldfunktion .....	48
2.9.4	Ermittlung des integrierenden Nenners einer Differentialform .....	48
2.9.5	Wegunabhängigkeit der Integration einer Funktion mit 2 Variablen .....	49
2.9.6	Homogene Funktionen und Legendretransformation .....	49
2.9.7	Beispiel für die Anwendung von Gl. (2.1) .....	50
2.9.8	Kürzester Abstand zum Ort der Funktion $y \cdot x = a$ .....	50
2.9.9	Beispiel für die Maximierung einer Funktion mit $N$ Variablen unter Nebenbedingungen .....	51
2.9.10	Das letzte gemeinsame Mittagessen von 8 Freunden .....	52
2.9.11	Zahl der Gestaltungsmöglichkeiten eines Turms aus LEGO-Bausteinen .....	52
2.9.12	Wie viel Fleisch ist in der Mensasuppe? .....	53
<b>3</b>	<b>Das Volumen als Zustandsfunktion</b> .....	<b>55</b>
3.1	Thermische Zustandsgleichung, Ausdehnungskoeffizient und Kompressibilität .....	55
3.2	Die van der Waals-Zustandsgleichung .....	58
3.3	Die verallgemeinerte Zustandsgleichung durch Virialentwicklung .....	62

3.4	Andere Zustandsgleichungen .....	64
3.5	Volumina von Mischungen, partielle molare Volumen .....	68
3.6	Partielle molare Volumina in realen Gasmischungen .....	72
3.7	Gelöste Übungsaufgaben und Anwendungsbeispiele .....	74
3.7.1	Temperaturabhängigkeit der Molarität .....	74
3.7.2	Bestimmung des partiellen molaren Volumens in einer flüssigen Mischung .....	74
3.7.3	Thermischer Ausdehnungskoeffizient eines v. d. Waals-Gases am kritischen Punkt .....	75
3.7.4	Kompressibilität eines v. d. Waals-Gases am kritischen Punkt .....	76
3.7.5	Thermischer Druckkoeffizient eines v. d. Waals-Gases am kritischen Punkt .....	76
3.7.6	Zweiter Virialkoeffizient nach der RK-Gleichung .....	77
3.7.7	Beweis der Formel für die Carnahan-Starling-Gleichung .....	77
3.7.8	Schwebezustand eines Heißluftballons .....	78
3.7.9	Zusammenhang von $\alpha_p$ und $\kappa_{T^*}$ .....	79
3.7.10	Berechnung von $\alpha_p$ und $\kappa_{T^*}$ einer Modellflüssigkeit .....	79
3.7.11	Berechnung des Gasdrucks in einer geschlossenen Stahlflasche .....	80
3.7.12	v.d.Waals-Parameter aus Messdaten des zweiten Virialkoeffizienten von Neon .....	81
3.7.13	Bestimmung des 2. Mischvirialkoeffizienten in einer realen Gasmischung .....	82
3.7.14	Druck- und Temperaturverlauf in der Erdkruste .....	84
3.7.15	Thermische Stabilität einer Bimetall-Münze .....	85
3.7.16	Die Dieterici-Zustandsgleichung .....	86
3.7.17	Zusammenhang zwischen Meeresspiegel und Meerwasser-Kompressibilität .....	88
3.7.18	Eine photometrische Bestimmungsmethode der isothermen Kompressibilität von Flüssigkeiten .....	89
3.7.19	Thermisches Verhalten von Eisenbahnschienen .....	89
3.7.20	Thermische Ausdehnung eines stromdurchflossenen Aluminiumdrahtes .....	90
3.7.21	Formulierung der partiellen molaren Volumina in der Molalitätsskala .....	91
3.7.22	Das Galilei-Thermometer .....	92
3.7.23	Thermische Ausdehnung von Wasser in Tee-, Wein- und Sektgläsern .....	94
3.7.24	Das Bimetallthermometer .....	96
3.7.25	Thermische Ausdehnung eines Überschall-Flugzeuges im Flug .....	97
3.7.26	Thermische Gangkorrektur von Pendeluhrn .....	98

3.7.27	Speicherung und Entsorgung von CO <sub>2</sub> in der Tiefsee? .....	101
3.7.28	Umrechnung von Volumen- in Druck-Virialkoeffizienten .....	103
3.7.29	Ein thermodynamisches Szenario des atmosphärischen Wassergehaltes in der frühen Erdgeschichte .....	104
3.7.30	Das Prinzip der korrespondierenden Zustände .....	106
<b>4</b>	<b>Der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b> .....	109
4.1	Der Zusammenhang von Arbeit, Wärme und innerer Energie .....	109
4.2	Die Enthalpie als Zustandsgröße. Der Joule-Thomson-Prozess .....	118
4.3	Enthalpieberechnungen und Exzessenthalpien flüssiger Mischungen .....	126
4.4	Reaktionsenthalpien chemischer Reaktionen .....	129
4.5	Standardbildungenthalpien .....	134
4.6	Weiterführende Beispiele und Anwendungen .....	136
4.6.1	Brennwert und Heizwert am Beispiel von „Wodka“ .....	136
4.6.2	Der Born-Haber'sche Kreisprozess .....	138
4.6.3	Thermodynamik von Sprengstoffen an einem Beispiel .....	141
4.6.4	Können Steine verbrennen? .....	144
4.6.5	Das Eiskalorimeter nach Bunsen .....	145
4.6.6	Thermodynamik der Akkretion und Massendifferenzierung bei der Entstehung von Planeten .....	147
4.6.7	Optimierung der CO <sub>2</sub> -Reduktion beim Biogasreaktor .....	151
4.7	Gelöste Übungsaufgaben .....	153
4.7.1	Einschlag eines Eisenmeteoriten auf Grönland .....	153
4.7.2	Erwärmung eines Wasserteichs durch Sonnenstrahlung .....	154
4.7.3	Beweis einer thermodynamischen Identität für die Druckabhängigkeit der Molwärme .....	154
4.7.4	Molwärme von Quecksilber und von Ammoniak bei höherem Druck .....	155
4.7.5	Bestimmung von $\bar{C}_V$ für Argon .....	156
4.7.6	Wasserkühlung bei der Produktion von Vinylchlorid .....	156
4.7.7	Standardreaktionsenthalpie der Wassergasreaktion .....	157
4.7.8	Standardreaktionsenthalpie für die Bildung von Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> aus Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und Fe .....	158
4.7.9	Thermochemische Bestimmung der Delokalisierungsenergie der $\pi$ -Elektronen in Benzen .....	158
4.7.10	Standardbildungenthalpie von Ethanol .....	159
4.7.11	Wärmehaushalt des menschlichen Körpers .....	160

4.7.12	Molare Enthalpie von Kalium . . . . .	161
4.7.13	Standardbildungsenthalpie von Glyzin aus der Verbrennungsenthalpie . . . . .	161
4.7.14	Berechnung von Mischungstemperaturen . . . . .	162
4.7.15	Molare Exzessenthalpie einer Modellmischung . . . . .	163
4.7.16	Standardreaktionsenthalpien von Hydrazin mit $\text{B}_2\text{H}_6$ und $\text{N}_2\text{O}_4$ . . . . .	164
4.7.17	Wärmeleitung beim Umsatz von Schießpulver . . . . .	164
4.7.18	Thermodynamik beim Bleigießen an Silvester . . . . .	165
4.7.19	Die Reaktionsenthalpie der Zersetzung von Ozon . . . . .	166
4.7.20	Temperaturänderung beim Mischen von Trimethylamin und Chloroform . . . . .	167
4.7.21	Selbstwärmender Kaffee und selbstkühlende Kompressen . . . . .	168
4.7.22	Thermodynamik des Thermit-Verfahrens . . . . .	169
4.7.23	Vergleich der Wärmeleitung und $\text{CO}_2$ -Bildung verschiedener fossiler Energieträger . . . . .	170
4.7.24	Temperaturänderung in einem Wasserstrahl . . . . .	171
4.7.25	Anwendung des Hess'schen Satzes zur Ermittlung der Umwandlungsenthalpie mineralischer Reaktionen . . . . .	172
4.7.26	Thermodynamik des Zusammenstoßes zweier Himmelskörper . . . . .	173
4.7.27	Druckabhängigkeit der Enthalpie aus einem Joule-Thomson-Experiment . . . . .	174
4.7.28	Umwandlung der Rotationsenergie wassergefüllter Zylinder in innere Energie . . . . .	175
4.7.29	Aufheizung von Blei durch radioaktiven Zerfall von $^{32}\text{P}$ . . . . .	176
4.7.30	Titrationskalorimetrie und integrale Lösungsenthalpie . . . . .	177
4.7.31	Thermodynamik einer Dampflokomotive . . . . .	180
4.7.32	Chemische Fixierung von $\text{CO}_2$ in Polypropylencarbonat . . . . .	182
4.7.33	Die Flammentemperatur von Erdgas-/Luft-Gemischen . . . . .	183
<b>5</b>	<b>Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .</b>	<b>187</b>
5.1	Quasistatische thermodynamische Prozesse: Isothermen und Adiabaten . . . . .	188
5.2	Die Verallgemeinerung von reversiblen (quasistatischen) Prozessführungen: polytrope Prozesse . . . . .	192
5.3	Der Carnot'sche Kreisprozess und die Definition der absoluten Temperatur . . . . .	195
5.4	Die Entropie als Zustandsfunktion und die Definition der absoluten Temperatur . . . . .	201

5.5	Aus der Entropie abgeleitete thermodynamische Beziehungen . . . . .	208
5.6	Dissipierte Arbeit und irreversible Prozesse . . . . .	212
5.7	Entropieproduktion und dissipierte Arbeit . . . . .	217
5.8	Kriterien für das thermodynamische Gleichgewicht. Die Zustandsgrößen freie Energie und freie Enthalpie . . . . .	220
5.9	Gibbs'sche Fundamentalgleichung, Thermodynamische Potentiale . . . . .	227
5.10	Thermodynamische Stabilitätsbedingungen . . . . .	232
5.11	Thermodynamisches Gleichgewicht in heterogenen Systemen ohne chemische Reaktionen. Phasengleichgewichte und Gibbs'sches Phasengesetz . . . . .	236
5.12	Die Maxwell-Konstruktion und Phasenumwandlungen reiner Stoffe . . . . .	241
5.13	Freie Standardbildungsenthalpien . . . . .	251
5.14	Thermodynamische Prozesse in offenen Systemen . . . . .	255
5.14.1	Austritt eines komprimierten Gases aus einem Hochdruckbehälter . . . . .	258
5.14.2	Aufheizung eines Raumes . . . . .	259
5.14.3	Befüllung eines evakuierten Volumens unter adiabatischen Bedingungen . . . . .	261
5.14.4	Analyse des Joule-Thomson-Prozesses als stationäres offenes System . . . . .	263
5.14.5	Stationärer Ausströmungsprozess eines Gases durch eine Düse . . . . .	264
5.14.6	Strömungsverhalten inkompressibler Flüssigkeiten. Die Bernoulli-Gleichung . . . . .	270
5.15	Weiterführende Beispiele und Anwendungen . . . . .	271
5.15.1	Thermodynamische Gleichgewichtsbedingungen im isolierten System: Maximierung der Entropie . . . . .	271
5.15.2	Bestimmung des Adiabatenkoeffizienten mit der Methode der schwingenden Kugel . . . . .	273
5.15.3	Thermodynamik in Planetenatmosphären . . . . .	276
5.15.4	Thermodynamik der Dehnung von Kautschukbändern und Metalldrähten . . . . .	278
5.15.5	Wie weit fliegt eine Kanonenkugel? . . . . .	286
5.15.6	Der fallende Kolben als irreversibler Prozess . . . . .	289
5.15.7	Kompressoren und Luftpumpen . . . . .	291
5.15.8	Verbrennungsmotoren als Kreisprozesse: der Otto-Motor, der Diesel-Motor, der Stirling-Motor . . . . .	293
5.15.9	Energieeffizienz beim Raumheizen . . . . .	299
5.15.10	Eine exotische Wärmekraftmaschine: Das Minto-Rad. . . . .	301
5.15.11	Berechnung des 2-Phasenbereiches Dampf-Flüssigkeit für Cyclohexan mit verschiedenen thermischen Zustandsgleichungen . . . . .	303

5.15.12	Molwärme im 2-Phasengebiet Flüssig-Dampf bei konstantem Volumen . . . . .	307
5.15.13	Verdampfungskühlung zur Erzeugung tiefer Temperaturen . . . . .	310
5.15.14	Zur Wirkungsweise von Geysiren . . . . .	312
5.15.15	Stabilität von Proteinen als Funktion von Temperatur und Druck. Anwendungen in der Nahrungsmittelindustrie . . . . .	314
5.15.16	Eis kann Felsen sprengen und Berge bewegen . . . . .	317
5.15.17	Korrespondierende Zustände: der kritische Punkt und kritische Exponenten . . . . .	320
5.15.18	Eine reale Carnot-Maschine . . . . .	324
5.15.19	Der Abwehrmechanismus des Bombardierkäfers – thermodynamische Aspekte eines biologischen Phänomens . . . . .	327
5.15.20	Die Dampfstrahlrakete . . . . .	330
5.15.21	Das freie Volumen nach der Carnahan Starling-Gleichung . . . . .	332
5.15.22	Wie bewegen sich Tintenfische? . . . . .	333
5.15.23	Überschallströmung mit Laval-Düsen . . . . .	335
5.15.24	Entropieproduktion bei Wärmeleitung und viskosem Fluss . . . . .	338
5.16	Gelöste Übungsaufgaben . . . . .	341
5.16.1	Quasistatische Arbeit im Grenzfall adiabatisch → isotherm . . . . .	341
5.16.2	Berechnung von $\bar{C}_V$ aus $\bar{C}_p$ für Quecksilber mit Hilfe von $pVT$ -Daten . . . . .	342
5.16.3	Zusammenhang von adiabatischer und isothermer Kompressibilität aus der Adiabatengleichung . . . . .	342
5.16.4	Berechnung der inneren Energieänderung beim adiabatischen Prozess aus der Adiabatengleichung . . . . .	343
5.16.5	Ableitung der Gibbs'schen Fundamentalgleichung $U(S, V)$ für zwei Beispiele . . . . .	344
5.16.6	Verdampfungskalorimetrische Bestimmung der inneren Energie und der Molwärme von Eisen . . . . .	345
5.16.7	Bildungsenthalpie der Benzoesäure in der Gasphase aus Verbrennungsenthalpie und Dampfdruckmessungen . . . . .	346
5.16.8	Temperaturänderung beim isobaren quasistatischen Prozess . . . . .	348
5.16.9	Unterschied zwischen arithmetischem und geometrischem Mittelwert . . . . .	348
5.16.10	Wärmekapazität entlang $p = aV^b$ . . . . .	349
5.16.11	Aufstieg einer Methan-Blase im Meerwasser . . . . .	350

5.16.12	Temperaturerhöhung von Flusswasser durch Kraftwerke . . . . .	351
5.16.13	Gewinnung nutzbarer Energie aus einem geothermischen Lager endlicher Größe . . . . .	352
5.16.14	Kühlleistung eines Kühlschranks . . . . .	352
5.16.15	Berechnung des Wirkungsgrades eines speziellen Kreisprozesses . . . . .	353
5.16.16	Isotherme quasistatische Arbeit in Flüssigkeiten und Festkörpern . . . . .	354
5.16.17	Entropieänderung von Kupfer bei tiefen Temperaturen . . . . .	355
5.16.18	$\bar{C}_p - \bar{C}_V$ in Festkörpern bei tiefen Temperaturen . . . . .	356
5.16.19	Entropie- und Enthalpieänderung von Quarz bei hohen Temperaturen und Drücken . . . . .	356
5.16.20	Bestimmung der Tiefe eines Brunnens . . . . .	358
5.16.21	Bestimmung der Molwärme von Ethanol aus Dichte- und Schallgeschwindigkeitsmessung . . . . .	359
5.16.22	Gay-Lussac-Koeffizient eines v. d. Waals Gases am Beispiel von $\text{CO}_2$ . . . . .	359
5.16.23	Abkühlung von $\text{N}_2$ im Joule-Thomson-Prozess . . . . .	360
5.16.24	Schallgeschwindigkeitsmessung als Tieftemperaturthermometer . . . . .	361
5.16.25	$\bar{C}_p - \bar{C}_V$ auf der Inversionskurve eines Fluids . . . . .	362
5.16.26	Beispiel für die Anwendung der Maxwell-Relation zur Berechnung von $(\partial \bar{C}_V / \partial \bar{V})_T$ und $(\partial \bar{C}_p / \partial p)_T$ . . . . .	363
5.16.27	Innere Energie und Molwärme eines v. d. Waals- und eines RK-Fluids . . . . .	364
5.16.28	Entropie, $\bar{C}_p - \bar{C}_V$ und Adiabatengleichung nach der v. d. Waals-Theorie . . . . .	365
5.16.29	Adiabatengleichung und Adiabatenarbeit für Wasser bei $0^\circ\text{C}$ . . . . .	367
5.16.30	Thermodynamische Bilanzen beim Mischen von Eis mit flüssigem Wasser . . . . .	369
5.16.31	Beispiel-Berechnung der inneren Energie aus einer hypothetischen thermischen Zustandsgleichung . . . . .	371
5.16.32	Verdampfungsenthalpie von Wasser aus der Antoine-Gleichung . . . . .	371
5.16.33	Verdampfungsprozess von $\text{CCl}_4$ im zylindrischen Rohr . . . . .	373
5.16.34	Siedetemperaturen von Wasser als Funktion der Höhe über dem Meeresspiegel . . . . .	375
5.16.35	Schmelzpunkt von Eis unter Druck . . . . .	376
5.16.36	Umwandlung von Graphit zu Diamant unter Berücksichtigung der Kompressibilitäten . . . . .	376
5.16.37	Phasenumwandlung von $\text{WF}_6$ im festen Zustand . . . . .	378

5.16.38	Berechnung des Dampfdruckes aus Standardbildungsgrößen am Beispiel von $\text{Br}_2$ und $\text{UF}_6$ .....	379
5.16.39	Überprüfung der Phasengleichgewichtsbedingungen von Zustandsgleichungen mit dem Carnahan-Starling-Term .....	381
5.16.40	Mechanische Stabilitätsbedingung aus der Legendre-Transformation von $F$ nach $G$ .....	382
5.16.41	Ableitung des Phasengesetzes aus der Gibbs-Duhem-Gleichung .....	382
5.16.42	Dissipierte Arbeit im geteilten Zylinder mit beweglichem Kolben .....	384
5.16.43	Die Methode von Clement und Desormes zur Bestimmung von Adiabatenkoeffizienten .....	386
5.16.44	Enthalpie- und Entropieänderung von flüssigem Benzol mit dem Druck .....	388
5.16.45	Regelung der Temperatur eines Kühlraumes (Joule-Prozess) .....	389
5.16.46	Bestimmung des Schmelzvolumens von Bismut .....	392
5.16.47	Kräftegleichgewicht im 2-Zylindersystem mit Doppelkolben .....	392
5.16.48	Entropieproduktion eines Turmspringers .....	394
5.16.49	Schallgeschwindigkeit in realen Gasen .....	394
5.16.50	Berechnung der freien Bildungsenthalpie von $\text{NH}_3$ bei 400 K und 1,5 bar .....	396
5.16.51	Ein Beispiel für die Bestimmung experimentell unzugänglicher partieller molarer Größen .....	397
5.16.52	Der Schnellkochtopf .....	398
5.16.53	Entropieproduktion beim Erstarren von unterkühltem Wasser .....	400
5.16.54	Funktionsweise von Saugtrichtern und Wasserstrahlpumpen .....	402
5.16.55	Berechnung der Verdampfungsenthalpie von Methanol vom Schmelzpunkt bis zum kritischen Punkt .....	405
<b>6</b>	<b>Thermodynamik der Wärmestrahlung .....</b>	<b>407</b>
6.1	Der allgemeine Zusammenhang zwischen Strahlung und Materie .....	407
6.2	Strahlungsdruck und Energiedichte der Wärmestrahlung .....	409
6.3	Thermodynamische Zustandsgrößen des Photonengases .....	413
6.4	Thermodynamische Prozesse des Photonengases .....	415
6.5	Strahlungsintensität und ihre spektrale Verteilung .....	417
6.6	Strahlungsgleichgewicht und Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz .....	422
6.7	Stationäre Nichtgleichgewichte der Wärmestrahlung .....	423

6.8	Verallgemeinerter Strahlungsaustausch . . . . .	426
6.9	Weiterführende Beispiele und Anwendungen . . . . .	430
6.9.1	Sonnenlichtkollektoren als Wärmespeicher und Energiequellen . . . . .	430
6.9.2	Druckerhöhung in einem Flüssiggas-Tank bei Sonneneinstrahlung . . . . .	434
6.9.3	Leistung, Fadentemperatur und Lichtausbeute einer Glühlampe . . . . .	435
6.9.4	Sonnensegel im interplanetaren Raum . . . . .	437
6.9.5	Superwärmespeicherung . . . . .	440
6.9.6	Schwarze Löcher im Kosmos – eine thermodynamische Analyse . . . . .	443
6.9.7	Infrarot-Fotografie . . . . .	449
6.10	Übungsaufgaben . . . . .	451
6.10.1	Alternative Ableitung der Entropie des Photonengases . . . . .	451
6.10.2	Enthalpie des Photonengases . . . . .	451
6.10.3	Das isentrope Photonengas . . . . .	451
6.10.4	Adiabatenkoeffizient des Photonengases . . . . .	452
6.10.5	Bedingung der Druckgleichheit von Photonengas und Ionenplasma . . . . .	452
6.10.6	Irreversible Expansion des Photonengases . . . . .	453
6.10.7	Thermodynamik eines Goldkorns im Gleichgewicht mit dem Photonengas . . . . .	454
6.10.8	Volumenkontraktion des Weltalls bei 300 K der kosmischen Hintergrundstrahlung . . . . .	455
6.10.9	Volumenspezifische Wärmekapazität des Photonengases . . . . .	456
6.10.10	Sonnenabstand eines Chondriten bei seinem Schmelzpunkt . . . . .	456
6.10.11	Die Planck'sche Strahlungsformel als Funktion der Wellenlänge $\lambda$ . . . . .	456
6.10.12	Schwarzkörperstrahlung als Thermometer . . . . .	457
6.10.13	Maximal mögliche Leistung der Sonneneinstrahlung auf der Erde . . . . .	458
6.10.14	Thermische Halbwertszeit eines Hg-Thermometers beim Wärmestrahlungsaustausch . . . . .	459
6.10.15	Strahlungsenergie- und -entropie-Transport unterschiedlich temperierter konzentrischer Rohre . . . . .	460
6.10.16	Strahlungskorrektur bei Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Gasen . . . . .	461
6.10.17	Eigenschaften der Atmosphäre des Neptun-Mondes Triton . . . . .	463
6.10.18	Schallgeschwindigkeit im Photonengas . . . . .	465

6.10.19	Die innere Wärmeproduktion der Planeten Jupiter und Saturn .....	466
6.10.20	Thermodynamik der Paarbildung aus Photonen .....	467
6.10.21	Die Gibbs'sche Fundamentalgleichung für das Photonengas .....	468
6.10.22	Carnotprozess des Photonengases .....	469
6.10.23	Bedingung für den Zerfall schwarzer Löcher im Weltall .....	470
6.10.24	Vereinigung zweier schwarzer Löcher .....	471
6.10.25	Temperaturschwankungen der Planeten auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne .....	472
6.10.26	Unterschiedlicher Energieverlust bei Säugetieren durch Wärmestrahlung .....	473
<b>7</b>	<b>Anhänge .....</b>	<b>475</b>
A	Drei mathematische Sätze über die Existenz und Eigenschaften integrierender Nenner. Existenznachweis der Entropie als Zustandsgröße .....	475
B	Einführung der absoluten Temperatur nach Lord Kelvin .....	480
C	Berechnung der Joule-Thomson-Inversionskurve beim v. d. Waals-Fluid .....	482
D	Thermodynamische Stabilitätsbedingungen nach der Fluktuationstheorie .....	485
E	Temperaturabhängigkeit der Verdampfungsenthalpie .....	489
F	Tabellen: Thermodynamische Stoffdaten (Auswahl) .....	491
F.1	Siedetemperaturen und kritische Daten .....	491
F.2	Molwärmen .....	492
F.3	Thermodynamische Standardbildungsgrößen .....	493
G	Allgemeines zum Konzept des freien Volumens .....	502
H	Schallgeschwindigkeit in fluiden Medien .....	503
I	Weitere thermodynamische Potentiale .....	506
J	SI-Einheiten physikalischer Größen und Fundamentalkonstanten .....	509
K	Ergänzende und weiterführende Literatur .....	511
	Klassiker der chemischen und allgemeinen Thermodynamik .....	511
	Grundlagenbücher .....	512
	Schwerpunkte Verfahrenstechnik und technische Thermodynamik .....	512
	Schwerpunkt Biochemie .....	513
	Schwerpunkt Physik .....	513
	Schwerpunkt: kondensierter Zustand .....	513
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>515</b>