

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zum Gesamtwerk</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Die historische Entwicklung der Thermodynamik (H. Lochhaas)</b> .....	<b>7</b>
2.1 Die Anfänge .....	7
2.1.1 Ordnen der vielfältigen Erscheinungen .....	7
2.1.2 Das aristotelische System .....	7
2.2 Vom Qualitativen zum Quantitativen .....	8
2.2.1 Der Weg zum Temperaturbegriff .....	8
2.2.2 Temperatur und Wärme – Kalorimetrie .....	8
2.3 Wärmetheorien .....	9
2.3.1 Wärmestoff .....	9
2.3.2 Mechanische Wärmetheorie .....	10
2.3.3 Wärme als Energie .....	10
2.4 Thermodynamik .....	11
2.4.1 Phänomenologische Thermodynamik .....	11
2.4.2 Statistische Thermodynamik .....	13
2.5 Technische Thermodynamik .....	14
2.5.1 Von Guericke bis Watt .....	14
2.5.2 Theoretische Begründung .....	15
2.5.3 Verbrennungsmotoren .....	16
2.5.4 Weitere Entwicklung .....	16
2.6 Nichtgleichgewichtsthermodynamik .....	16
<b>3 Ideale Gase: nullter und erster Hauptsatz der klassischen Thermodynamik</b> (R. Butt, E. Schwarzer, H. Lochhaas) .....	<b>19</b>
3.1 Begriffe der Thermodynamik .....	19
3.2 Thermisches Gleichgewicht, Temperatur und nullter Hauptsatz .....	19
3.3 Ideale Gase und allgemeine Gasgleichung .....	21
3.3.1 Gasgesetze .....	21
3.3.2 Die universelle Gaskonstante .....	37
3.4 Erster Hauptsatz .....	40
3.4.1 Die innere Energie als Zustandsgröße eines Systems .....	41
3.4.2 Die molaren Wärmekapazitäten idealer Gase .....	46
3.4.3 Bestimmung des Adiabatenkoeffizienten .....	53
<b>4 Ideale Gase: zweiter Hauptsatz der klassischen Thermodynamik und Kreisprozesse</b> (R. Butt, E. Schwarzer) .....	<b>68</b>
4.1 Einfache Prozesse .....	69
4.2 Kreisprozesse .....	71
4.2.1 Einfache Kreisprozesse .....	71
4.2.2 Der Stirlingprozess .....	73
4.2.2.1 Experimente mit dem Heißluftmotor der Fa. Leybold .....	74
4.2.3 Experimente mit dem Wasser-Wasser-Wärmepumpenmodell der Firma Phywe .....	80

4.2.4	Bestimmung der Leistungsziffer einer Wärmepumpe mit Hilfe eines umgebauten Kühlschranks .....	82
<b>5</b>	<b>Thermodynamische Eigenschaften realer Stoffe (E. Schwarzer, H. Lochhaas)</b> .....	<b>85</b>
5.1	Zustandsgrößen .....	85
5.2	Reale Gase .....	86
5.2.1	Gerät zum kritischen Punkt .....	86
5.2.2	Gasgleichungen .....	87
5.2.2.1	Abweichungen vom Boyle-Marriotteschen Gesetz .....	87
5.2.2.2	Clausius'sche Virialgleichung .....	87
5.2.2.3	Van-der-Waals-Gleichung und kritischer Punkt .....	89
5.2.2.4	Reduzierte Zustandsgleichung .....	94
5.2.3	Parameter realer Gase .....	96
5.2.3.1	Volumenausdehnungskoeffizient .....	96
5.2.3.2	Dampfspannungskoeffizient (Isochorer Spannungskoeffizient) .....	97
5.3	Phasenübergänge .....	97
5.3.1	Phasenübergänge „flüssig - gasförmig“ .....	98
5.3.1.1	Dampfdruckkurven .....	99
5.3.1.2	Luftfeuchtigkeit .....	102
5.3.2	Phasenübergang „fest-flüssig“ .....	104
5.3.3	Tripelpunkt .....	106
5.4	Tiefe Temperaturen .....	107
<b>6</b>	<b>Thermodynamische Effekte und Elektrochemie (E. Schwarzer)</b> .....	<b>111</b>
6.1	Demonstrationsgerät für thermoelektrische Effekte .....	111
6.2	Seebeck-Effekt .....	111
6.3	Peltier-Effekt .....	117
6.4	Thomson-Effekt .....	119
<b>7</b>	<b>Statistische Thermodynamik (H. Lochhaas)</b> .....	<b>121</b>
7.1	Mikrophysikalische Deutung thermischer Systeme und Prozesse .....	121
7.1.1	Kinetische Deutung thermischer Prozesse und Gleichgewichte – qualitativ .....	121
7.1.2	Experimentelle Bestimmung der Avogadro-Konstanten .....	124
7.1.3	Kinetische Deutung der Wärmeleitung .....	126
7.2	Kinetische Gastheorie – Gleichverteilungsprinzip .....	129
7.2.1	Molekularkinetisches Modell der idealen Gase .....	129
7.2.2	Theoretische Berechnung des Gasdrucks .....	134
7.2.2.1	Kinetische Deutung der Temperatur – Gleichverteilungssatz .....	136
7.2.2.2	Verallgemeinerung des Gleichverteilungsprinzips .....	137
7.2.3	Weitere Anwendungen der kinetischen Gastheorie .....	137
7.2.3.1	Barometrische Höhenformel .....	139
7.2.3.2	Innere Energie und Temperatur eines idealen Gases .....	141
7.2.4	Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung .....	142
7.2.4.1	Experimentelle Bestätigung der Geschwindigkeitsverteilung .....	144
7.3	Wärmekapazitäten – Reale Gase .....	147
7.3.1	Theorie der molaren Wärmekapazitäten .....	147
7.3.1.1	Molwärmen einatomiger idealer Gase .....	147
7.3.1.2	Molwärmen mehratomiger idealer Gase .....	148
7.3.1.3	Molwärmen von Festkörpern .....	149

7.3.2	Verhalten realer Gase .....	151
7.3.2.1	Van-der-Waals'sche Zustandsgleichung .....	152
7.4	Statistische Physik .....	153
7.4.1	Mit Boltzmann begann alles .....	153
7.4.2	Boltzmann-Statistik .....	154
7.4.3	Quantenstatistik .....	156
<b>8</b>	<b>Nichtgleichgewichtsthermodynamik (M. Möller) .....</b>	<b>160</b>
8.1	Das Wesen irreversibler Prozesse .....	160
8.1.1	Irreversibilität und Reduktion .....	160
8.1.2	Informationsreduktion von der mikroskopischen Mechanik zur Thermodynamik .....	160
8.1.3	Boltzmann-Gleichung .....	162
8.1.4	Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung .....	162
8.1.5	H-Theorem .....	163
8.1.6	Diskussion der Boltzmann-Gleichung und des H-Theorems .....	164
8.1.7	Welche Bedeutung hat die Unschärfe der Verteilungsfunktion .....	166
8.2	Zerfall von Strukturen bei irreversiblen Prozessen – Monotone Gesetze .....	170
8.2.1	Viskosität, Strömungslehre .....	170
8.2.1.1	Zurückführung der Viskosität von Gasen auf einen mikroskopischen Mechanismus .....	171
8.2.1.2	Navier-Stokes-Gleichung .....	172
8.2.1.3	Gesetz von Hagen-Poiseuille .....	173
8.2.2	Reibung .....	174
8.2.3	Teilchendiffusion und Brownsche Bewegung .....	177
8.2.3.1	Diffusionsgleichung .....	177
8.2.3.2	Diffusionsstrom durch ein Rohr .....	179
8.2.3.3	Fundamentallösung der Diffusionsgleichung .....	179
8.2.3.4	Bestimmung der Avogadro-Konstanten mit Hilfe der Brownschen Bewegung .....	181
8.2.3.5	Chromatographie .....	181
8.2.4	Wärmeleitung .....	182
8.2.4.1	Wärmeleitung in Gasen, Wärmeleitungsgleichung .....	182
8.2.4.2	Wärmeleitung in Festkörpern .....	183
8.2.4.3	Wärmeleitung durch homogene Medien .....	184
8.2.5	Elektrischer Leitungsstrom .....	185
8.2.5.1	Ohmsches Gesetz .....	185
8.2.5.2	Elektrischer Strom durch einen Leiter .....	186
8.2.5.3	Beziehung zwischen elektrischer und Wärmeleitfähigkeit: Gesetz von Wiedemann-Franz ...	187
8.2.5.4	Elektrische Relaxation .....	187
8.2.5.5	Eindringen eines elektromagnetischen Feldes in ein Medium .....	188
8.2.6	Chemische Reaktionskinetik .....	189
8.2.6.1	Chemische Bruttogleichung und kinetische Gleichung .....	190
8.2.6.2	Beispiel: Reaktionen vom Typ $A + B \rightarrow C + D$ .....	190
8.2.6.3	Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten .....	192
8.3	Gemeinsamkeit der vorangegangenen Phänomene, Verallgemeinerung, Weiterführung .....	193
8.3.1	Transportphänomene und Relaxationsprozesse .....	193
8.3.2	Aristoteles – Newton – Boltzmann – Aristoteles .....	195
8.3.3	Monotone Relaxationsprozesse .....	195
8.3.4	Mpemba-Effekt .....	196
8.3.5	Einfache Beispiele schwingender Relaxationsprozesse .....	197
8.3.6	Umwandlung von Ungleichgewichten .....	197

8.3.7	Relaxationsprozesse mit mehreren Freiheitsgraden	198
8.4	Dissipative Strukturen	199
8.4.1	Definition	199
8.4.2	Thermomechanische und mechanokalorischer Effekt	199
8.4.3	Thermoelektrischer Effekt	201
8.4.4	Einfache Räuber-Beute-Systeme	202
8.4.5	Oszillierende chemische Reaktionen	203
8.4.6	Bénard-Konvektion	206
8.4.7	Taylor-Instabilität	207
8.4.8	Schlussbetrachtung	209
<b>9</b>	<b>Temperaturstrahlung (H. Lochhaas, R. Butt)</b>	<b>210</b>
9.1	Energieübertragung durch Strahlung	210
9.1.1	Begriffe	210
9.1.2	Qualitative Versuche	211
9.1.3	Hohlraum als Schwarzer Strahler	214
9.1.4	Lambertsches Gesetz	215
9.2	Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	216
9.2.1	Emission und Absorption	216
9.2.2	Versuche zum Kirchhoffschen Gesetz	218
9.3	Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz	221
9.3.1	Inhalt des Gesetzes	221
9.3.2	Experimentelle Bestätigung des $T^4$ – Gesetzes	222
9.4	Plancksches Strahlungsgesetz – Wiensches Strahlungsgesetz	226
9.4.1	Inhalt der Gesetze	226
9.4.2	Versuche zur spektralen Energieverteilung und zum Wienschen Verschiebungsgesetz	227
<b>Anhang:</b>	<b>HISPEX (E. Schwarzer)</b>	<b>233</b>
A	Computersimulation thermodynamischer Prozesse	233
A.1	Anforderungen an Computersimulationen	233
A.2	Die Struktur des Simulationspaketes HISPEX	233
A.2.1	Die Programmierung und Betriebssystem	233
A.2.2	Die Abbildung der Thermodynamik auf HISPEX	234
A.3	Prozess - Simulation mit HISPEX	237
A.3.1	Die Versuchsaufbauphase	237
A.3.2	Die Simulationsphase	237
Register		240