

Inhaltsverzeichnis

1.	Hauptsätze der Energieumwandlung	13
1.1.	Energieumwandlung nach dem ersten Hauptsatz	13
	<i>Einführung:</i> Erscheinungsformen der Energie — Thermodynamische Systeme — Innere Energie — Erster Hauptsatz — Temperatur und Beschaffenheit eines thermodynamischen Systems — Molare Wärmekapazität und thermodynamische Zustandsfunktionen	13
	<i>Probleme:</i>	
1.1.1.	Brennwert und Heizwert	18
1.1.2.	Energie der Sonne (Kernfusion)	19
1.1.3.	Urankerspaltung	20
1.1.4.	Nutzung der Sonnenenergie	21
1.1.5.	Wasserkraft	22
1.1.6.	Strömungsenergie der Luft	23
1.1.7.	Spezifische Wärmekapazität des idealen Gases	23
1.1.8.	Isotherme und adiabatische Prozesse bei idealen Gasen	26
1.1.9.	CARNOTScher Kreisprozeß	27
1.1.10.	Wärmepumpe	30
	<i>Aufgaben</i>	32
1.2.	Umwandlung von Wärme in Arbeit nach dem zweiten Hauptsatz	34
	<i>Einführung:</i> Die Aussage des ersten Hauptsatzes für thermodynamische Prozesse — Reversible und irreversible Prozesse — Entropie — Thermodynamische Potentiale — Zweiter Hauptsatz — Der zweite Hauptsatz für geschlossene und offene Systeme — Technische Arbeit — Exergie	34
	<i>Probleme:</i>	
1.2.1.	Entropiezunahme bei der Mischung zweier Gase	42
1.2.2.	CARNOTScher Kreisprozeß im T,S -Diagramm	44
1.2.3.	Die freie Energie als isotherm-isobare reversible Nutzarbeit	45
1.2.4.	Technische Arbeit	46
1.2.5.	Die freie Enthalpie als isotherm verfügbares technisches Arbeitsvermögen	48
1.2.6.	MOLLIER-Diagramm (H,S -Diagramm)	48
1.2.7.	Exergie der Enthalpie	49
1.2.8.	Exergieverlust bei einem irreversiblen Prozeß	51
1.2.9.	Exergieverlust durch Wärmetausch	51
1.2.10.	Exergieverluste bei der Heizung	52
1.2.11.	Betriebsbedingungen bei Kreisprozessen	53

1.2.12.	Gasturbine im JOULE-Prozeß	55
1.2.13.	Zweitakt-Verbrennungsmotor (OTTO-Motor)	59
1.2.14.	Viertakt-Verbrennungsmotor (DIESEL-Motor)	61
	<i>Aufgaben</i>	63
1.3.	Statistisches Modell der Energiezustände	66
	<i>Einführung:</i> Phasenraum — Unterteilung des Phasenraumes in Mikro- zellen — LIOUVILLESches Theorem — Makrozustand — STIRLINGsche Formel — Grundlagen der BOLTZMANN-Statistik — BOLTZMANNsche Gleichung — GIBBSsches Energieverteilungsgesetz, Zustandssumme, freie Energie	66
	<i>Probleme:</i>	
1.3.1.	MAXWELL-BOLTZMANNsche Geschwindigkeitsverteilung	74
1.3.2.	Maximum der Verteilungsdichte, mittlerer Betrag der Geschwindigkeit, mittlere Energie	75
1.3.3.	Barometrische Höhenformel	77
1.3.4.	Gleichverteilungssatz der klassischen Physik und DULONG-PETITSches Gesetz	78
1.3.5.	Bestimmung der Zustandsgrößen des einatomigen Gases aus der Zustands- summe	81
1.3.6.	Zustandssumme und Zustandsgrößen des zweiatomigen Gases	82
1.3.7.	Fluktuationen	84
1.3.8.	Messung der AVOGADROSchen Zahl und der BOLTZMANN-Konstanten aus den thermodynamischen Fluktuationen eines Drehspiegels	86
1.3.9.	Modell des Druckes in einem idealen Gas	87
	<i>Aufgaben</i>	89
1.4.	Zustandsgrößen bei tiefen Temperaturen	91
	<i>Einführung:</i> NERNST-PLANCKsches Theorem — Temperaturabhängigkeit der Zustandsgrößen	91
	<i>Probleme:</i>	
1.4.1.	Zustandsgrößen am absoluten Nullpunkt	95
1.4.2.	Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes — Abkühlung durch Ent- magnetisieren	96
1.4.3.	Oszillationsanteil der Zustandsgrößen	99
1.4.4.	Anharmonische Schwingungen	100
1.4.5.	Rotationsanteil der spezifischen Wärmekapazität	102
1.4.6.	Angeregte Elektronenzustände	104
1.4.7.	Zustandsgrößen des linearen Moleküls (CO ₂)	105
	<i>Aufgaben</i>	106
2.	Phasenübergänge zwischen Gleichgewichtszuständen	108
2.1.	Reale Gase	108
	<i>Einführung:</i> Das VAN-DER-WAALSSche Gas — Zweiphasengebiet und kriti- scher Punkt — Virialform der Zustandsgleichung — Potentiale der Wechsel- wirkung — Zweiter Virialkoeffizient und Wechselwirkung	108
	<i>Probleme:</i>	
2.1.1.	Reduzierte Zustandsgleichung	115
2.1.2.	Ausdehnungskoeffizient α , Druckkoeffizient β , Kompressibilität κ	116
2.1.3.	Virialform der VAN-DER-WAALSSchen Gleichung	117
2.1.4.	Zustandsgrößen des VAN-DER-WAALSSchen Gases	119

2.1.5.	Spezifische Wärmekapazität des VAN-DER-WAALSSchen Gases	120
2.1.6.	JOULE-THOMSON-Effekt des VAN-DER-WAALSSchen Gases	121
2.1.7.	Kräfte zwischen den Molekülen nach dem starr-elastischen Modell	123
2.1.8.	Molekulare Grundgrößen nach dem LENNARD-JONES-Modell	125
	<i>Aufgaben</i>	126
2.2.	Phasengleichgewicht in Systemen mit gleichartigen Masseteilchen — Wärme- und Kältemaschinen	128
	<i>Einführung:</i> Phasengleichgewicht im isotherm-isobaren System — Freie Enthalpie und chemisches Potential — Gleichgewichtszustände zwischen verschiedenen Phasen — Das Zweiphasensystem aus Flüssigkeit und Dampf	128
	<i>Probleme:</i>	
2.2.1.	Das Phasengleichgewicht nach der VAN-DER-WAALSSchen Gleichung	130
2.2.2.	CLAUSIUS-CLAPEYRONsche Gleichung	134
2.2.3.	Integration der CLAUSIUS-CLAPEYRONschen Gleichung	135
2.2.4.	Verflüssigung nach dem Gegenstromverfahren von LINDE	136
2.2.5.	Isochore Zustandsänderung	138
2.2.6.	Isobare und isotherme Zustandsänderung	139
2.2.7.	Isentrope Entspannung	141
2.2.8.	Isotherme Entspannung des überhitzten Dampfes	142
2.2.9.	CLAUSIUS-RANKINE-Prozeß	143
2.2.10.	Kältemaschine	145
2.2.11.	Destillationskolonne mit Wärmepumpe	148
	<i>Aufgaben</i>	149
2.3.	Das Phasengleichgewicht in Systemen aus verschiedenartigen Mikroteil- chen — Massenwirkungsgesetz und chemisches Gleichgewicht	152
	<i>Einführung:</i> Freie Enthalpie und chemisches Potential für ein Gasgemisch — Chemisches Potential in einem Gemisch idealer Gase — Chemisches Gleich- gewicht — Massenwirkungsgesetz für ein System idealer Gase	152
	<i>Probleme:</i>	
2.3.1.	Chemisches Gleichgewicht der Dissoziation des Wasserstoffs	156
2.3.2.	Chemische Konstanten	157
2.3.3.	VAN'T-HOFFsche Gleichung	160
2.3.4.	Austauschreaktion zwischen Wasserstoff und Deuterium	161
2.3.5.	Adsorptionsgleichgewicht bei der chemischen Katalyse	163
2.3.6.	Thermische Ionisation von Gasen — SAHA-Gleichung	165
2.3.7.	Bildung von Elektronen und Positronen aus γ -Quanten	167
	<i>Aufgaben</i>	169
2.4.	Das Phasengleichgewicht in Systemen aus verschiedenartigen Mikroteil- chen — Prozesse in Lösungen	170
	<i>Einführung:</i> GIBBSsches Phasengesetz — Verdünnte Lösungen — Saure und alkalische Lösungen	170
	<i>Probleme:</i>	
2.4.1.	RAOULTsche Gesetze der Gefrierpunkterniedrigung	174
2.4.2.	Dampfdruckerniedrigung	176
2.4.3.	Osmotischer Druck und Löslichkeit	177
2.4.4.	OSTWALDSches Verdünnungsgesetz und wechselseitige Beeinflussung von Dissoziationsgleichgewichten	179
2.4.5.	DEBYE-Radius	181
2.4.6.	Lösungsdruck eines starken Elektrolyten	183
2.4.7.	Osmotischer Druck in der Blutflüssigkeit	185
	<i>Aufgaben</i>	186

3.	Thermodynamik irreversibler Prozesse	188
3.1.	Grundlagen der Thermodynamik irreversibler Prozesse	188
	<i>Einführung:</i> Mathematische Grundlagen: Gradient — Divergenz — Tensoren — Erweiterung der Begriffe Gradient und Divergenz — Partielle und substantielle Ableitung nach der Zeit — Physikalische Grundlagen: Gegenstand und Methodik der Thermodynamik irreversibler Prozesse — Entropieproduktion — Entropiestromdichte — Bilanzgleichung der Entro- pie — GIBBSsche Fundamentalgleichung und Bilanzgleichung der Entropie	188
	<i>Probleme:</i>	
3.1.1.	Bilanzgleichung für skalare Größen	196
3.1.2.	Kontinuitätsgleichung	197
3.1.3.	Divergenz der Bildpunkte des Phasenraumes	199
3.1.4.	Massebilanzgleichung	200
3.1.5.	Quelldichte der Masse bei einer chemischen Reaktion	202
3.1.6.	Tensor der Impulsstromdichte	203
3.1.7.	Bilanzgleichung für den Impuls	205
3.1.8.	Bilanzgleichung für die kinetische Energie	208
3.1.9.	Bilanzgleichung für die potentielle Energie	212
3.1.10.	Bilanzgleichung für die innere Energie	213
3.1.11.	Entropiebilanzgleichung	216
	<i>Aufgaben</i>	220
3.2.	Irreversible Prozesse nahe dem thermodynamischen Gleichgewicht	223
	<i>Einführung:</i> Phänomenologische Gleichungen — Wärmeleitung und Dif- fusion — Definition des Zustandes nahe dem thermodynamischen Gleich- gewicht — ONSAGER-CASIMIRsche Reziprozitätsbeziehungen — Symmetrie- beschränkungen — Entropieproduktion nahe dem Gleichgewichtszustand	223
	<i>Probleme:</i>	
3.2.1.	Isotherme Diffusion	228
3.2.2.	Druckdiffusion	230
3.2.3.	Elektronenkonzentration und -beweglichkeit in Metallen	232
3.2.4.	Diffusionskoeffizient und BROWNSche Molekularbewegung	235
3.2.5.	Elektrolyte	237
3.2.6.	Thermodiffusion	241
3.2.7.	Thermoelektrische Effekte in Metallen	243
	<i>Aufgaben</i>	246
3.3.	Die Grundlagen der Bildung dissipativer Strukturen	248
	<i>Einführung:</i> Dissipative Strukturen — Stabilität stationärer Zustände — Stabilität eines Systems mit zwei Freiheitsgraden — Stabilitätskriterium von LJAPUNOW — Gleichgewichtszustand abgeschlossener thermodyna- mischer Systeme — Gleichgewichtszustand offener thermodynamischer Systeme	248
	<i>Probleme:</i>	
3.3.1.	Nichtlineare LANGEVIN-Gleichung	254
3.3.2.	LOTKA-VOLTERRA-Modell	258
3.3.3.	Chemischer Oszillator	261
3.3.4.	Das Verhalten der Exzeßentropie	263
3.3.5.	Entwicklungskriterium	266
3.3.6.	Selbstreproduktion der Biomoleküle	268
	<i>Aufgaben</i>	271

4.	Wärmeleitung	273
4.1.	Die Wärmeleitungsgleichung in einem ruhenden System ohne Quellen . .	273
	<i>Einführung:</i> Aufstellen der Wärmeleitungsgleichung — Anfangs- und Randbedingungen	273
	<i>Probleme:</i>	
4.1.1.	Temperaturwellen	275
4.1.2.	Zeitlicher Ausgleich der Temperatur in einem Stab	278
4.1.3.	Temperaturausgleich zwischen zwei Stäben	280
4.1.4.	Temperaturverlauf in einer endlich langen Walze	282
	<i>Aufgaben</i>	286
4.2.	Wärmeübergang	286
	<i>Einführung:</i> Ähnlichkeitstheorie des Wärmeüberganges — Laminare und turbulente Strömung — Dimensionslose Kennzahlen — Wärmeübergangskoeffizient — Gleichungen zwischen den dimensionslosen Kennzahlen . . .	286
	<i>Probleme:</i>	
4.2.1.	Wärmedurchgang	291
4.2.2.	Strömung längs einer ebenen Wand	293
4.2.3.	Rohrströmung	293
4.2.4.	Strömung durch Rohre mit verschiedenen Querschnittsflächen	295
4.2.5.	Wärmeübergang an einem Rohr bei senkrecht zur Achse erfolgender Strömung	296
	<i>Aufgaben</i>	296
	Lösung der Aufgaben	298
	Tabellen	
1.1.1.	Dichte und Energiewerte von Energieträgern	313
1.1.2.	Bindungsenergie der Atomkerne	313
1.1.3.	Spezifische Wärmekapazität	313
1.3.1.	Trägheitsmoment I , Kreisfrequenz ω der Grundschwingung, Dissoziationsenergie ϵ_D zweiatomiger Moleküle	314
2.1.1.	VAN-DER-WAALSsche Konstanten bei Zimmertemperatur und kritische Daten	315
2.1.2.	BOYLE-Temperatur T_B in K	315
2.2.1.	Thermodynamische Zustandsfunktionen für Wasser und seinen Satttdampf (je Kilogramm)	315
2.3.1.	Bindungsenergie	316
2.3.2.	Chemische Konstante bei Zimmertemperatur	316
2.3.3.	Bildungsenthalpie und -entropie bei Zimmertemperatur und 101,3 kPa, bezogen auf Wasserstoffionen in Wasser	316
2.3.4.	Ionisierungsspannung von Atomen in Volt	317
3.2.1.	Leitfähigkeit γ , Beweglichkeit b und Konzentration N der Ladungsträger	317
3.2.2.	Diffusionskoeffizient	317
3.2.3.	Ionenbeweglichkeit b in unendlich verdünnten Lösungen bei 18°C	318
3.2.4.	Äquivalentleitfähigkeit $\Lambda = \gamma/c$ in $\Omega^{-1} \text{ m}^2 \text{ kmol}^{-1}$ bei 18°C	318
3.2.5.	Thermoelektrische Spannungsreihe für vollkommen reine Metalle für Temperaturen zwischen 0°C und 100°C	318

4.1.1.	Dichte, spezifische Wärmekapazität, spezifische Wärmeleitfähigkeit bei Zimmertemperatur	318
4.2.1.	Dichte, spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (101,3 kPa), spezifische Wärmeleitfähigkeit von Luft	319
5.	Physikalische Konstanten	319
6.	Bezeichnung der wichtigsten Größen	319
	Literatur- und Quellenverzeichnis	321
	Sachwortverzeichnis	323