

Ingo Müller

# Grundzüge der Thermodynamik

mit historischen Anmerkungen

Zweite Auflage

Mit 175 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Aufgabe der Thermodynamik und ihre Bilanzgleichungen.....</b>                           | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Die Felder der Mechanik und Thermodynamik. . . . .</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1.1      | Massendichte, Geschwindigkeit und Temperatur. . . . .                                      | 1         |
| 1.1.2      | Historisches zur Temperatur. . . . .   | 2         |
| <b>1.2</b> | <b>Bilanzgleichungen.....</b>  | <b>5</b>  |
| 1.2.1      | Die Erhaltungssätze der Thermodynamik. . . . .   | 5         |
| 1.2.2      | Bilanzen für abgeschlossene und offene Systeme. . . . .                                    | 5         |
| 1.2.3      | Lokale Bilanz in regulären Punkten. . . . .  | 6         |
| <b>1.3</b> | <b>Massenbilanz.....</b>   | <b>7</b>  |
| 1.3.1      | Integrale und lokale Massenbilanzen. . . . .   | 7         |
| 1.3.2      | Beispiel zur Massenbilanz: Düsenströmung. . . . .  | 8         |
| <b>1.4</b> | <b>Impulsbilanz.....</b>   | <b>9</b>  |
| .4.1       | Integrale und lokale Impulsbilanzen. . . . .   | 9         |
| .4.2       | Druck. . . . .   | 11        |
| .4.3       | Beispiel I zur Impulsbilanz: Druckverlauf in ruhender inkompressibler Flüssigkeit. . . . . | 11        |
| .4.4       | Historisches zu Druck und Luftdruck, Druckeinheiten. . . . .                               | 12        |
| .4.5       | Beispiel zum Druck: Auftriebsgesetz von Archimedes. . . . .                                | 14        |
| .4.6       | Beispiel II zur Impulsbilanz: Raketengrundgleichung. . . . .                               | 14        |
| .4.7       | Beispiel III zur Impulsbilanz: Konvektiver Impulsfluß. . . . .                             | 16        |
| .4.8       | Beispiel IV zur Impulsbilanz: Düsenströmung. . . . .                                       | 17        |
| .4.9       | Beispiel V zur Impulsbilanz: Bernoulli-Gleichung. . . . .                                  | 19        |
| <b>1.5</b> | <b>Energiebilanz.....</b>  | <b>20</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 1.5.1      | Kinetische Energie und Innere Energie .....   | 20        |
| 1.5.2      | Integrale und lokale Energiebilanzen .....  | 23        |
| 1.5.3      | Potentielle Energie.....  | 24        |
| 1.5.4      | Beispiel I zum Energiesatz: Düsenströmung .....   | 25        |
| 1.5.5      | Beispiel II zum Energiesatz: Adiabate Drosselung .....  | 26        |
| 1.5.6      | Beispiel III zum Energiesatz: Verdampfung .....   | 27        |
| 1.5.7      | Beispiel IV zum Energiesatz: Fön .....  | 28        |
| 1.5.8      | Beispiel V zum Energiesatz: Turbine .....   | 29        |
| <b>1.6</b> | <b>Bilanz der Inneren Energie.....</b>  | <b>30</b> |
| 1.6.1      | Ableitung aus Energie-, Impuls-und Massenbilanz .....   | 30        |
| 1.6.2      | Kurzform der Energiebilanzen für abgeschlossene Systeme.....                                  | 32        |
| <b>1.7</b> | <b>Erster Hauptsatz für reversible Prozesse. Grundlage der „pdV-Thermodynamik“.....</b>       | <b>33</b> |
| 1.7.1      | Arbeitsleistung und innere Arbeitsleistung im reversiblen Prozeß.....                         | 33        |
| 1.7.2      | Reversible Prozesse.....  | 34        |
| <b>1.8</b> | <b>Historisches zum ersten Hauptsatz.....</b>   | <b>34</b> |
| <b>1.9</b> | <b>Zusammenfassung der Bilanzgleichungen.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>2</b>   | <b>Materialgleichungen.....</b>   | <b>43</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Allgemeine Form der Materialgleichungen in Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen.....</b>       | <b>43</b> |
| 2.1.1      | Notwendigkeit von Materialgleichungen .....   | 43        |
| 2.1.2      | Materialgleichungen für wärmeleitende Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase mit innerer Reibung..... | 44        |
| <b>2.2</b> | <b>Bestimmung von Viskosität und Wärmeleitfähigkeit.....</b>                                  | <b>45</b> |
| 2.2.1      | Scherströmung zwischen zwei Platten. Newton'sches Reibungsgesetz .....                        | 45        |

2.2.2 Wärmeleitung an Fensterscheibe..... 47

**2.3 Zustandsgleichung idealer Gase.....50**

2.3.1 Thermische Zustandsgleichung idealer Gase..... 50

2.3.2 Historisches zur thermischen Zustandsgleichung  
idealer Gase..... 52

2.3.3 Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase..... 54

2.3.4 Historisches zur kalorischen Zustandsgleichung idealer Gase.  
Der Versuch von Gay-Lussac..... 55

2.3.5 Eine instruktive Trivialform der kinetischen Gastheorie.  
Molekulare Deutung von Druck und Temperatur..... 57

2.3.6 Beispiel I zum idealen Gas: Kolben fällt in Zylinder..... 59

2.3.7 Beispiel II zum idealen Gas: Heizung eines Zimmers..... 61

2.3.8 Beispiel III zum idealen Gas: Geschwindigkeit und Temperatur  
am Austritt eines Fohs..... 62

2.3.9 Beispiel IV zum idealen Gas: Düsenströmung..... 64

2.3.10 Beispiel V zum idealen Gas: Barometrische Höhenstufe..... 68

2.3.11 Beispiel VI zum idealen Gas:  
„Adiabatische Zustandsgleichung“..... 69

2.3.12 Beispiel VII zum idealen Gas: Kaminströmung..... 71

**2.4 Zustandsgleichungen von Flüssigkeiten und Dämpfen  
(ohne Phasenübergang).....73**

2.4.1 Die Notwendigkeit von Messungen..... 73

2.4.2 Thermische Zustandsgleichung..... 73

2.4.3 Kalorische Zustandsgleichung..... 75

2.4.4 Zustandsgleichungen von flüssigem Wasser..... 78

**2.5 Zustandsdiagramme für Flüssigkeiten und Dämpfe  
(mit Phasenübergang).....78**

2.5.1 Das Phänomen des Phasenübergangs  
„flüssig - dampfförmig“..... 78

2.5.2 Schmelzen und Sublimieren..... 81

2.5.3 Dampfdruckkurve und (p,T)-Diagramm von Wasser..... 81

2.5.4 Naßdampfgebiet und (p,v)-Diagramm von Wasser..... 84

2.5.5 Verdampfungswärme und (h,T)-Diagramm von Wasser..... 85

2.5.6 Beispiel I zur Verdampfung: Das Einweckglas..... 87

2.5.7 Beispiel II zur Verdampfung: Der Dampfkochtopf..... 88

## Inhaltsverzeichnis

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 2.5.8      | Historisches zur Verflüssigung von Dämpfen und zur Erstarrung von Flüssigkeiten.....                     | 89         |
| 2.5.9      | Van der Waals-Gleichung.....   | 90         |
| <b>3</b>   | <b>Reversible Prozesse. Die „pdV-Thermodynamik“ bei der Berechnung thermodynamischer Maschinen. ....</b> | <b>93</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>Kompressor und Preßluftmaschine. Heißluftmaschine.....</b>  | <b>93</b>  |
| 3.1.1      | Die Arbeit am Kompressor.....  | 93         |
| 3.1.2      | Der zweistufige Kompressor.....  | 95         |
| 3.1.3      | Die Preßluftmaschine.....  | 96         |
| 3.1.4      | Die Heißluftmaschine.....  | 97         |
| 3.1.5      | Die Dampfmaschine.....   | 98         |
| <b>3.2</b> | <b>Arbeit und Wärme bei speziellen reversiblen Prozessen.....</b>  | <b>101</b> |
| 3.2.1      | Arbeit und Wärme im reversiblen Prozeß allgemein. ....   | 101        |
| 3.2.2      | Arbeit und Wärme in reversiblen „Isoprozessen“ und im adiabaten Prozeß für ideale Gase.....              | 102        |
| <b>3.3</b> | <b>Kreisprozesse.....</b>  | <b>104</b> |
| 3.3.1      | Wirkungsgrad bei der Umsetzung der Wärme in Arbeit. ....   | 104        |
| 3.3.2      | Beispiel I zum Wirkungsgrad. Joule-Prozeß.....   | 105        |
| 3.3.3      | Beispiel II zum Wirkungsgrad. Carnot-Prozeß.....   | 107        |
| 3.3.4      | Beispiel III zum Wirkungsgrad. Ericson-Prozeß.....   | 108        |
| <b>3.4</b> | <b>Verbrennungsmotoren.....</b>  | <b>no</b>  |
| 3.4.1      | Ottomotor.....   | 110        |
| 3.4.2      | Dieselmotor.....   | 113        |
| <b>4</b>   | <b>Entropie.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Der zweite Hauptsatz.....</b>   | <b>in</b>  |
| 4.1.1      | Formulierung.....  | 117        |
| 4.1.2      | Ergebnisse.....  | 117        |
| 4.1.3      | Der universelle Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses. ....  | 119        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.1.4      | Absolute Temperatur als integrierender Faktor .....                                     | 120        |
| 4.1.5      | Wachstum der Entropie.....  | 124        |
| 4.1.6      | (T,S)-Diagramm und Maximaler Wirkungsgrad<br>des Carnot-Prozesses.....                  | 125        |
| <b>4.2</b> | <b>Auswertung des Zweiten Hauptsatzes.....</b>  | <b>127</b> |
| 4.2.1      | Integrabilitätsbedingung.....   | 127        |
| 4.2.2      | Innere Energie und Entropie des Van der Waals-Gases<br>und des idealen Gases.....       | 128        |
| 4.2.3      | Alternativformen der Gibbs-Gleichung und<br>der Integrabilitätsbedingung.....           | 129        |
| 4.2.4      | Phasengleichgewicht. Gleichungen von Clausius-Clapeyron                                 | 132        |
| 4.2.5      | Phasengleichgewicht im Van der Waals-Gas.....   | 134        |
| 4.2.6      | Temperaturänderung bei adiabater Drosselung.<br>Beispiel: Van der Waals-Gas.....        | 136        |
| 4.2.7      | Thermodynamische Stabilitätskriterien.....  | 140        |
| 4.2.8      | Stabilitätsbedingungen.....   | 142        |
| <b>4.3</b> | <b>Historisches zum Zweiten Hauptsatz.....</b>  | <b>144</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Die Entropie als <math>S = k \ln W</math>.....</b>                                   | <b>148</b> |
| 4.4.1      | Molekulare Deutung der Entropie.....  | 148        |
| 4.4.2      | Entropie eines Gases und eines Polymermoleküls .....                                    | 149        |
| 4.4.3      | Entropie als ein Maß für Unordnung .....  | 155        |
| 4.4.4      | Das Wachstum der Unordnung .....  | 156        |
| 4.4.5      | Maxwell'sche Verteilungsfunktion.....   | 156        |
| 4.4.6      | Die Entropie eines Gummistabes.....   | 157        |
| <b>4.5</b> | <b>Beispiel zu Entropie und Zweitem Hauptsatz:<br/>Gas und Gummi.....</b>               | <b>160</b> |
| 4.5.1      | Gibbs Gleichung und Integrabilitätsbedingungen<br>für Flüssigkeiten und Festkörper..... | 160        |
| 4.5.2      | Beispiele für entropische Elastizität.....  | 163        |
| 4.5.3      | Reales Gas und Kristallisiertes Gummi.....  | 164        |
| 4.5.4      | Freie Energie von Gasen und Gummis.<br>(p,V)- und (P,L)-Kurven.....                     | 167        |
| 4.5.5      | Reversible und hysteretische Phasenübergänge.....                                       | 169        |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.6   | Historisches zur statistischen Interpretation<br>der Entropie.....         | 173 |
| 5     | Dampfmaschine und Kältemaschinen.....                                      | 177 |
| 5.1   | Historisches zur Dampfmaschine.....  | 177 |
| 5.2   | Dampfmaschine.....   | iso |
| 5.2.1 | Das (T,s)-Diagramm.....  | 180 |
| 5.2.2 | Clausius-Rankine-Prozeß im (T,s)-Diagramm.....                             | 181 |
| 5.2.3 | Das (h,s)-Diagramm.....  | 184 |
| 5.2.4 | Beispiel: Dampfdrucksatz und Wirkungsgrad<br>einer Dampfkräftenanlage..... | 185 |
| 5.2.5 | Instruktive Versuche zur Erhöhung des Wirkungsgrades.....                  | 187 |
| 5.3   | Kältemaschine und Wärmepumpe.....  | 189 |
| 5.3.1 | Prinzip einer Kompressionskältemaschine.....                               | 189 |
| 5.3.2 | Beispiel: Berechnung einer Kompressions-Kältemaschine.....                 | 190 |
| 5.3.3 | Wärmepumpe. Ein Beispiel.....  | 191 |
| 6     | Wärmeübertragung.....  | 193 |
| 6.1   | Instationäre Wärmeleitung.....   | 193 |
| 6.1.1 | Wärmeleitungsgleichung.....  | 193 |
| 6.1.2 | Trennung der Variablen.....  | 194 |
| 6.1.3 | Beispiel I: Wärmeleitung in einem adiabaten<br>Stab der Länge L.....       |     |
| 6.1.4 | Beispiel II: Wärmeleitung in einem unendlich langen Stab.....              | 198 |
| 6.1.5 | Beispiel III: Temperaturmaximum in der Nähe eines<br>Wärmepols.....        | 200 |
| 6.1.6 | Historisches zur Wärmeleitung.....   | 201 |
| 6.2   | Wärmetauscher.....   | 202 |
| 6.2.1 | Wärmeübergangszahlen und Wärmedurchgangszahl.....                          | 202 |
| 6.2.2 | Temperaturgleichungen in Strömungsrichtung.....                            | 204 |
| 6.2.3 | Temperaturverläufe.....  | 206 |
| 6.3   | Wärmestrahlung.....  | 209 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.3.1 | Spektrales Emissionsverhältnis und spektrale<br>Absorptionszahl.....                 |     |
| 6.3.2 | Gemittelttes Emissionsverhältnis und<br>gemittelte Absorptionszahl.....              | 212 |
| 6.3.3 | Beispiel I zum Stefan-Boltzmann-Gesetz:<br>Temperatur von Sonne und Planeten.....    | 215 |
| 6.3.4 | Beispiel II zum Stefan-Boltzmann-Gesetz:<br>Vergleich von Strahlung und Leitung..... | 217 |
| 6.3.5 | Historisches zur Wärmestrahlung.....   | 218 |
| 6.4   | Nutzung der Sonnenenergie.....   | 221 |
| 6.4.1 | Verfügbarkeit der Sonnenenergie.....   | 221 |
| 6.4.2 | Thermosiphon.....  | 222 |
| 6.4.3 | Aufwindkraftwerk.....  | 224 |
| 6.4.4 | Treibhaus.....   | 228 |
| 6.4.5 | Konzentrierende Kollektoren, das Brennglas.....                                      | 229 |
| 7     | Mischungen und Mischphasen.....  | 231 |
| 7.1   | Chemisches Potential.....  | 231 |
| 7.1.1 | Charakterisierung von Mischungen, Lösungen<br>und Legierungen.....                   | 231 |
| 7.1.2 | Das chemische Potential.....   | 232 |
| 7.1.3 | Acht nützliche Eigenschaften des chemischen Potentials.....                          | 234 |
| 7.1.4 | Die Meßbarkeit des chemischen Potentials.....  | 236 |
| 7.2   | Vermischungsgrößen. Chemisches Potential<br>idealer Mischungen.....                  | 238 |
| 7.2.1 | Vermischungsgrößen allgemein.....  | 238 |
| 7.2.2 | Vermischungsgrößen bei idealen Gasen.....  | 240 |
| 7.2.3 | Ideale Mischungen.....   | 241 |
| 7.2.4 | Chemische Potentialfunktionen idealer Mischungen.....                                | 242 |
| 7.3   | Osmose.....  | 243 |
| 7.3.1 | Osmotischer Druck in verdünnten Lösungen.<br>Van't Hoff'sches Gesetz.....            | 243 |
| 7.3.2 | Beispiel I zum osmotischen Druck: Pfeffer'sche Säule.....                            | 245 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.3.3 | Beispiel II zum osmotischen Druck:<br>Meerwasserentsalzung.....                             | 248 |
| 7.3.4 | Beispiel III zum osmotischen Druck:<br>Physiologische Kochsalzlösung.....                   | 249 |
| 7.3.5 | Eine energetische Interpretation der Osmose.....  | 250 |
| 7.4   | Mischphasen.....  | 252 |
| 7.4.1 | Gibbs'sche Phasenregel.....   | 252 |
| 7.4.2 | Freiheitsgrade.....   | 253 |
| 7.5   | Flüssig-Dampf-Gleichgewichte (Ideal).....   | 254 |
| 7.5.1 | Ideales Raoult'sches Gesetz.....  | 254 |
| 7.5.2 | Ideale Phasendiagramme binärer Mischungen.....  | 255 |
| 7.5.3 | Beispiel I zum Raoult'schen Gesetz:<br>CO <sub>2</sub> in Atmosphäre und Meer.....          | 258 |
| 7.5.4 | Beispiel II zum Raoult'schen Gesetz: Mineralwasser.....                                     | 259 |
| 7.5.5 | Beispiel III zum Raoult'schen Gesetz:<br>Binäre Mischung aus Propan und Butan.....          | 259 |
| 7.5.6 | Beispiel IV zum Raoult'schen Gesetz:<br>Dampfdruckerniedrigung und Siedepunktserhöhung..... | 262 |
| 7.5.7 | Verdampfungsvorgang im Phasendiagramm.....  | 263 |
| 7.6   | Flüssig-Dampf-Gleichgewichte (Real).....  | 264 |
| 7.6.1 | Aktivität und Fugazität.....  | 264 |
| 7.6.2 | Reales Raoult'sches Gesetz.....   | 266 |
| 7.6.3 | Bestimmung der Aktivitätskoeffizienten.....   | 267 |
| 7.6.4 | Bestimmung der Fugazitätskoeffizienten.....   | 268 |
| 7.6.5 | Aktivitätskoeffizient bei Mischungswärme.<br>Konstruktion von Phasendiagrammen.....         | 269 |
| 7.7   | Freie Enthalpie einer Phasenmischung.....   | 272 |
| 7.7.1 | Graphische Bestimmung der Gleichgewichtsbedingungen.....                                    | 272 |
| 7.7.2 | Phasendiagramm bei lückenloser Mischbarkeit.....  | 275 |
| 7.7.3 | Mischungslücke in der flüssigen Phase.....  | 277 |
| 7.8   | Legierungen.....  | 277 |
| 7.8.1 | (T,c <sub>i</sub> )-Diagramme.....  | 277 |
| 7.8.2 | Mischkristalle und Eutektikum.....  | 280 |
| 7.8.3 | Gibb'sche Phasenregel.....  | 281 |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 7.8.4      | Andere Phasendiagramme.....   | 281        |
| <b>8</b>   | <b>Chemisch reagierende Mischungen.....</b>   | <b>282</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Stöchiometrie und Massenwirkungsgesetz .....</b>                                 | <b>282</b> |
| 8.1.1      | Stöchiometrie.....  | 282        |
| 8.1.2      | Massenwirkungsgesetz.....   | 284        |
| 8.1.3      | Massenwirkungsgesetz für ideale Mischungen und<br>Mischungen idealer Gase.....      | 285        |
| 8.1.4      | Historisches zum Massenwirkungsgesetz.....  | 286        |
| 8.1.5      | Beispiel I zum Massenwirkungsgesetz idealer Gase:<br>Haber-Bosch-Synthese.....      | 287        |
| 8.1.6      | Historisches zur Haber-Bosch-Synthese.....  | 288        |
| 8.1.7      | Beispiel II zum Massenwirkungsgesetz idealer Gase:<br>Zerfall von Kohlendioxid..... | 289        |
| 8.1.8      | Gleichgewicht in stöchiometrischen Mischungen<br>idealer Gase.....                  | 291        |
| <b>8.2</b> | <b>Reaktionswärmen, Reaktionsentropie und<br/>absolute Entropiewerte.....</b>       | <b>294</b> |
| 8.2.1      | Die additiven Konstanten in $u$ und $s$ .....                                       | 294        |
| 8.2.2      | Reaktionswärmen und Bindungsenergien.....   | 295        |
| 8.2.3      | Reaktionsentropien.....   | 297        |
| 8.2.4      | Prinzip vom kleinsten Zwang.....  | 298        |
| 8.2.5      | Absolutwerte von Energie und Entropie.....  | 299        |
| <b>8.3</b> | <b>Energetische und entropische Beiträge<br/>zum Gleichgewicht.....</b>             | <b>302</b> |
| 8.3.1      | Drei Anteile der freien Enthalpie.....  | 302        |
| 8.3.2      | Beispiel I: Wasserstoffdissoziation.....  | 303        |
| 8.3.3      | Beispiel II: Ammoniaksynthese.....  | 305        |
| <b>8.4</b> | <b>Die Brennstoffzelle.....</b>   | <b>307</b> |
| 8.4.1      | Chemische Reaktionen.....   | 307        |
| 8.4.2      | Typenvielfalt.....  | 309        |
| 8.4.3      | Thermodynamik.....  | 309        |
| 8.4.4      | Effekt von Temperatur- und Druckänderungen.....                                     | 312        |
| 8.4.5      | Leistung der Brennstoffzelle.....   | 313        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 8.4.6      | Wirkungsgrad.....  | 314        |
| <b>8.5</b> | <b>Thermodynamik der Photosynthese.....</b>                              | <b>315</b> |
| 8.5.1      | Das Dilemma der Glukose-Synthese.....                                    | 315        |
| 8.5.2      | Massenbilanzen.....  | 316        |
| 8.5.3      | Energiebilanz. Warum eine Pflanze viel Wasser braucht.....               | 318        |
| 8.5.4      | Entropiebilanz. Warum eine Pflanze viel Luft braucht.....                | 320        |
| 8.5.5      | Diskussion.....  | 322        |
| <b>9</b>   | <b>Feuchte Luft.....</b>   | <b>323</b> |
| <b>9.1</b> | <b>Charakterisierung feuchter Luft.....</b>                              | <b>323</b> |
| 9.1.1      | Feuchtegrad.....   | 323        |
| 9.1.2      | Enthalpie feuchter Luft.....   | 324        |
| 9.1.3      | Tabelle für feuchte Luft.....  | 326        |
| 9.1.4      | Das $(h_{1+lv}, x)$ -Diagramm.....                                       | 326        |
| <b>9.2</b> | <b>Einfache Prozesse in feuchter Luft.....</b>                           | <b>328</b> |
| 9.2.1      | Zufuhr von Wasser.....   | 328        |
| 9.2.2      | Erwärmung.....   | 328        |
| 9.2.3      | Mischen.....   | 328        |
| 9.2.4      | Mischung feuchter Luft mit Nebel.....                                    | 329        |
| <b>9.3</b> | <b>Verdampfungsgrenze und Kühlgrenze.....</b>                            | <b>330</b> |
| 9.3.1      | Massenbilanz und Verdampfungsgrenze.....                                 | 330        |
| 9.3.2      | Energiebilanz und Kühlgrenze.....  | 331        |
| <b>9.4</b> | <b>Zwei instruktive Beispiele - Sauna und<br/>Wolkenuntergrenze.....</b> | <b>333</b> |
| 9.4.1      | Eine Sauna wird klimatisiert.....  | 333        |
| 9.4.2      | Wolkenuntergrenze.....   | 335        |
| <b>9.5</b> | <b>Faustregeln.....</b>  | <b>337</b> |
| 9.5.1      | Alternative Feuchteangaben.....  | 337        |
| 9.5.2      | Trocken-adiabatischer Temperaturgradient.....                            | 338        |
| 9.5.3      | Die Wolkenuntergrenze. Abschätzung.....                                  | 339        |

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>9.6</b>  | <b>Verdunstung.....</b>  | <b>340</b> |
| 9.6.1       | Der Druck von gesättigtem Dampf bei Gegenwart von Luft . . . . .   | 340        |
| 9.6.2       | Verdunstung.....   | 342        |
| 9.6.3       | Zwei Beispiele für Verdunstung.....  | 343        |
| <b>10</b>   | <b>Ausgesuchte Kapitel der Thermodynamik . . . . .</b>   | <b>344</b> |
| <b>10.1</b> | <b>Tropfen und Blasen.....</b>   | <b>344</b> |
| 10.1.1      | Verfügbare Freie Energie.....  | 344        |
| 10.1.2      | Notwendige und hinreichende Gleichgewichtsbedingungen . . . . .  | 345        |
| 10.1.3      | Verfügbare Freie Energie als Funktion des Radius. . . . .  | 346        |
| 10.1.4      | Keimbildungsbarriere für Tropfen.....  | 348        |
| 10.1.5      | Keimbildungsbarriere für Blasen.....   | 350        |
| 10.1.6      | Bewertung.....   | 350        |
| <b>10.2</b> | <b>Nebel und Wolken. Tropfen in feuchter Luft.....</b>   | <b>351</b> |
| 10.2.1      | Problemstellung.....   | 351        |
| 10.2.2      | Verfügbare freie Energie, Gleichgewichtsbedingungen . . . . .  | 351        |
| 10.2.3      | Wasserdampfdruck im Phasengleichgewicht.....   | 353        |
| 10.2.4      | Die Form der verfügbaren freien Energie.....   | 354        |
| 10.2.5      | Keimbildungsbarriere und Tropfenradius.....  | 357        |
| <b>10.3</b> | <b>Luftballons.....</b>  | <b>358</b> |
| 10.3.1      | Druck-Radius-Charakteristik.....   | 358        |
| 10.3.2      | Stabilität eines Ballons.....  | 362        |
| 10.3.3      | Ein anschauliches Argument zur Stabilität des Ballons. . . . .   | 365        |
| 10.3.4      | Gleichgewichte kommunizierender Ballons.....   | 367        |
| <b>10.4</b> | <b>Schall.....</b>   | <b>370</b> |
| 10.4.1      | Wellengleichung.....   | 370        |
| 10.4.2      | Lösung der Wellengleichung, d'Alembert-Methode . . . . .   | 373        |
| 10.4.3      | Ebene harmonische Wellen.....  | 376        |
| 10.4.4      | Ebene harmonische Schallwellen.....  | 377        |
| <b>10.5</b> | <b>Landau-Theorie der Phasenübergänge.....</b>   | <b>379</b> |
| 10.5.1      | Freie Energie und Last als Funktion von Temperatur und<br>Dehnung. Phasenübergänge Erster und Zweiter Ordnung. . . . . | 379        |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| 10.5.2      | Phasenübergänge Erster Ordnung .....                            | 379        |
| 10.5.3      | Phasenübergang Zweiter Ordnung .....                            | 382        |
| 10.5.4      | Phasenübergänge unter Last .....                                | 384        |
| 10.5.5      | Eine Bemerkung zur Klassifizierung von Phasenübergängen . . . . | 385        |
| <b>10.6</b> | <b>Schwellen und Schrumpfen von Gelen.....</b>                  | <b>386</b> |
| 10.6.1      | Phänomen.....   | 386        |
| 10.6.2      | Freie Enthalpie.....  | 388        |
| 10.6.3      | Schwellen und Schrumpfen als Funktion der Temperatur. . . . .   | 391        |
| <b>10.7</b> | <b>Gedächtnislegierungen.....</b>                               | <b>394</b> |
| 10.7.1      | Phänomene und Anwendungen.....                                  | 394        |
| 10.7.2      | Ein Modell für Gedächtnislegierungen .....                      | 398        |
| 10.7.3      | Entropische Stabilisierung .....                                | 402        |
| 10.7.4      | Pseudoelastizität .....   | 405        |
| 10.7.5      | Latente Wärme.....  | 410        |
| 10.7.6      | Simulation einer Gedächtnislegierung.....                       | 412        |
|             | <b>Namen-und Sachverzeichnis.....</b>                           | <b>417</b> |