

# Inhalt

## Vorwort oder Warum Verstehen durch Üben? — V

### 1 Einleitung — 1

- 1.1 Nachhaltiger Lernerfolg und Hinweise für das Lösen von Aufgaben — 1
- 1.2 Thermodynamik im Maschinenbau — 6
- 1.3 Modellbildung in der Thermodynamik — 10
- 1.4 Größen, Einheiten und Gleichungen — 14
  - 1.4.1 Umgang mit SI-Einheiten und gesetzlichen Maßeinheiten — 21
  - 1.4.2 Umgang mit dem angelsächsischen Maßsystem — 23
  - 1.4.3 Übungen mit Maßeinheiten in einfachen Zusammenhängen — 24
  - 1.4.4 Rechnen mit Zehnerpotenzen — 26
  - 1.4.5 Ableitung einer zugeschnittenen Größengleichung — 28
  - 1.4.6 Einheitenanalyse — 29
- 1.5 Wichtige Naturkonstanten als physikalische Größen — 30
- 1.6 Erreichbare Genauigkeit beim Rechnen mit physikalischen Größen — 36
  - 1.6.1 Erforderliche Genauigkeit für Kreiskonstante  $\pi$  bei Ermittlung des Erdumfangs — 41
  - 1.6.2 Maximaler Fehler bei mehreren fehlerbehafteten Eingangsgrößen — 42
  - 1.6.3 Absoluter und relativer Fehler einer Temperaturdifferenz — 43

### 2 Innere Zustands- und Prozessgrößen im thermodynamischen System — 45

- 2.1 Das thermodynamische System — 45
- 2.1.1 Anzahl der frei wählbaren Zustandsgrößen — 54
- 2.1.2 Existenznachweis vollständiger Differentiale für die Temperatur und den Druck — 56
- 2.2 Thermische Zustandsgrößen — 57
  - 2.2.1 Tauchtiefe beim Schnorcheln — 74
  - 2.2.2 Auftrieb von Bernstein in Salzlösung — 75
  - 2.2.3 Dichtemessung mit einem Aräometer — 78
  - 2.2.4 Fehlerbetrachtung bei Luftdruckmessung mit Quecksilberbarometer — 80
  - 2.2.5 Messung kleiner Druckdifferenzen mit Zweistoffmanometer — 83
  - 2.2.6 Messung kleiner Druckdifferenzen mit Schrägrohrmanometer — 85
  - 2.2.7 Heben einer Last durch Sauger — 87
  - 2.2.8 Umrechnungen für empirische Temperaturskalen — 89
  - 2.2.9 Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung — 91
- 2.3 Prozesse und Prozessgrößen — 95
  - 2.3.1 Mischung von zwei Wassermassenströmen in Mischbatterie — 113
  - 2.3.2 Ausgleichstemperatur ohne und mit Beteiligung des Gefäßes — 114
  - 2.3.3 Experimentelle Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität — 116
  - 2.3.4 Bestimmung der Kalorimeterkapazität — 119

2.3.5	Wärmeübertrager — 122
2.3.6	Quasistatische Kompression von Luft in einem Zylinder — 124
2.3.7	Kompressorleistung für Luftverdichtung — 128
<b>3</b>	<b>Zustandsänderungen und Zustandsgleichungen — 131</b>
3.1	Zustandsänderungen für kondensierte Körper — 131
3.1.1	Beispiele für lineare thermische Dehnung von Festkörpern — 140
3.1.2	Untersuchung der Volumenzunahme bei Temperatursteigerung — 148
3.1.3	Ausdehnung von Flüssigkeiten in festen Behältern — 149
3.1.4	Anstieg des Flüssigkeitsspiegels in liegendem Zylindertank — 153
3.1.5	Druckentstehung durch Flüssigkeiten in geschlossenen Gefäßen — 157
3.1.6	Beispiele für isochore Drucksteigerung (starre Wände) — 160
3.1.7	Dichte von Wasser bei Änderung von Druck und Temperatur — 162
3.2	Die thermische Zustandsgleichung für ideales Gas — 165
3.2.1	Isobare und isochore Zustandsänderung im geschlossenen System — 179
3.2.2	Isobare Zustandsänderung strömender Luft — 181
3.2.3	Aufsteigen einer Luftblase im Wasser — 182
3.2.4	Aufstieg eines Heißluftballons — 183
3.2.5	Befüllung von Tragluftballons — 187
3.2.6	Ballonaufstieg mit verschiedenen Annahmen für die Schichtung der Luft — 190
3.2.7	Berechnung von Zustandsparametern nach DIN ISO 2533 — 194
3.2.8	Ausbreitung des Feuerballs nach Zündung von Kernwaffen — 197
3.2.9	Exakte und vereinfachte Berechnung des Kaminzugs — 199
3.2.10	Bestimmung des Polytopenexponenten — 201
3.2.11	Nutzarbeit bei der Expansion von Luft — 204
3.2.12	Nutzarbeit am Luftpuffer — 206
3.3	Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases — 208
3.3.1	Untersuchungen zur spezifischen Wärmekapazität — 218
3.3.2	Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents nach Robert Mayer — 222
3.3.3	Polytropen Verdichtung von Luft im Zylinder eines Dieselmotors — 224
3.3.4	Druckausgleich im Tiefkühlraum — 228
3.3.5	Beheizung eines Hörsaals — 231
3.4	Gemische idealer Gase — 234
3.4.1	Trockene Luft als ideales Gasgemisch — 245
3.4.2	Feuchte Luft als Gas-Dampf-Gemisch — 248
3.4.3	Teilbefüllung eines Behälters mit Wassergas — 250
3.4.4	Gasgemisch aus solar erzeugtem Wasserstoff und Erdgas — 252
3.4.5	Atemgase für das technische Tauchen — 254
3.4.6	Kritischer Partialdruck für Sauerstoffaufnahme in der Lunge — 258
3.4.7	Herstellung eines Schutzgases mit verminderterem Sauerstoffanteil — 260

3.4.8	Gasaustausch in einem Behälter — 262
3.4.9	Polytrope Verdichtung eines Gasgemisches — 264
3.5	Halbideales und reales Gas — 266
3.5.1	Verdichtung von Luft als perfektes, halbideales und reales Gas — 272
3.5.2	Verdichtung von Luft unter Berücksichtigung von Realgasfaktoren — 275
3.5.3	Erhitzung von Luft als halbideales Gas — 276
3.5.4	Mittlere spezifische Wärmekapazität für Wasser zwischen 0 und 100 Grad Celsius — 278
3.6	Zustandsänderungen mit Phasenübergängen für reine Stoffe — 280
3.7	Phasenübergang fest-flüssig — 285
3.7.1	Vollständiger Phasenübergang fest-flüssig — 287
3.7.2	Unvollständiger Phasenübergang fest-flüssig — 289
3.7.3	Phasenübergang im Thermosbehälter — 290
3.7.4	Wegschmelzende Schneedecke bei Regen — 292
3.8	Phasenübergang flüssig-gasförmig — 294
3.8.1	Berechnung des Dampfdrucks — 318
3.8.2	Ermittlung der Siedetemperatur bei gegebenen Druck mit Wasserdampftafel — 321
3.8.3	Interpolation von Stoffwerten für überhitzten Dampf mit einem Polynom dritten Grades — 322
3.8.4	Isotherme/isobare Verdampfung in Abhängigkeit vom Druck — 325
3.8.5	Wann verhält sich Dampf näherungsweise wie ein ideales Gas? — 328
3.8.6	Isochore Wärmezufuhr bei Nassdampf in geschlossenem Tank — 330
3.8.7	Isobare Wärmezu- und -abfuhr bei Nassdampf — 334
3.8.8	Isobare Dampfkühlung — 337
3.8.9	Isentrope Kompression von siedendem Wasser — 339
3.8.10	Aufplatzen einer Dampfleitung — 341
3.8.11	Maximale Saughöhe von Wasser — 344
3.8.12	Gewinnung von Fruchtsaftkonzentrat durch Brüdenverdichtung — 347
3.8.13	Isentrope Dampfentspannung in Dampfturbine — 352
<b>4</b>	<b>Erster Hauptsatz der Thermodynamik — 356</b>
4.1	Geschlossene (stoffdichte) Systeme — 361
4.1.1	Herleitung der Formeln für die polytrope spezifische Wärmekapazität und der Poisson'schen Gleichung — 366
4.1.2	Wärmezufuhr an Sauerstoff in einer Stahlflasche — 368
4.1.3	Volumenänderungsarbeit bei polytroper Verdichtung in einem Zylinder — 369
4.1.4	Energieinhalt eines geschlossenen Behälters — 370
4.1.5	Instationärer Prozess der Befüllung eines Gasbehälters — 374
4.1.6	Aufpumpen eines Autoreifens — 376
4.1.7	Ausströmen von perfektem Gas aus einer Gasflasche — 379

4.2	Ruhende offene Systeme — 381
4.2.1	Joule'scher Versuch zum mechanischen Wärmeäquivalent — 384
4.2.2	Instationärer Prozess: Erwärmung von Wasser auf der Herdplatte — 387
4.2.3	Energiebilanz zur Bestimmung eines Getriebewirkungsgrades — 392
4.2.4	Generatorkühlung mit Wasserstoff — 393
4.2.5	Arbeitsprozess: Energiebereitstellung durch fallendes Wasser — 395
4.2.6	Arbeitsprozess: Leistung eines Verdrängerkompressors — 397
4.2.7	Strömungsprozess: Drosselung eines idealen Gases — 401
4.2.8	Dynamische Temperaturen in Strömungsprozessen — 404
4.2.9	Strömungsprozess: Isenthalpe Entspannung zur Bestimmung des Dampfanteils — 406
<b>5</b>	<b>Zweiter und dritter Hauptsatz der Thermodynamik — 409</b>
5.1	Grundaussagen — 409
5.2	Berechnung und Bilanzierung der Entropie — 416
5.2.1	Richtung des Wärmestroms bei Energieumwandlung — 422
5.2.2	Nachweis der Irreversibilität beim Fließen eines Gleichstroms — 424
5.2.3	Untersuchung einer adiabaten Entspannung in einer Düse — 425
5.2.4	Der irreversible Vorgang der Drosselung — 426
5.2.5	Dissipation an einer Normblende bei Massenstrommessung — 428
5.2.6	Zustandsänderungen und Dissipation im gedrosselten Luftstrom — 429
5.2.7	Irreversible Abkühlung eines Stahlblocks — 433
5.2.8	Irreversibilitäten beim Schmelzen von Eis und beim Mischen von warmem und kaltem Wasser — 434
5.2.9	Irreversible Mischung und Diffusion von Gasen — 438
5.2.10	Berechnung der spezifischen Entropie von trockener Luft — 441
5.3	Exergie und Anergie der Wärme — 445
5.3.1	Berechnung des Exnergieverlustes bei der Drosselung eines Wasserstroms — 452
5.3.2	Exergetischer Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses — 454
5.3.3	Exnergieverlust durch erzwungene Frischdampfdrosselung — 455
<b>6</b>	<b>Anhang — 458</b>
6.1	Verzeichnis der Formelzeichen — 458
6.2	Normzustände und Maßeinheiten — 461
6.3	Formelsammlungen — 465
6.4	Hinweise zu Interpolationsverfahren — 467
6.4.1	Beispiele für lineare Interpolationen — 467
6.4.2	Interpolation nach Lagrange — 474
6.4.3	Interpolation nach Newton — 476
6.5	Internationale Normatmosphäre nach DIN ISO 2533 — 481
6.6	Stoffdaten — 482

**Abbildungsverzeichnis — 499**

**Tabellenverzeichnis — 501**

**Stichwortverzeichnis — 503**