

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 π 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
3	Zustandsänderungen und Zustandsgleichungen —	131
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 Polytropenexponenten —	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	Polytrope 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 vermindertem 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 Wasserdampf tabel —	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 Wärmezufuhr- 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
4	Erster Hauptsatz der Thermodynamik —	356
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 polytropen Verdichtung in einem Zylinder —	369
4.1.4	Energieinhalt eines geschlossenen Behälters —	370
4.1.5	Stationärer 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
5	Zweiter und dritter Hauptsatz der Thermodynamik —	409
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 Exergieverlustes bei der Drosselung eines Wasserstroms —	452
5.3.2	Exergetischer Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses —	454
5.3.3	Exergieverlust durch erzwungene Frischdampfdrosselung —	455
6	Anhang —	458
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