

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 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**
- 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 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**

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**

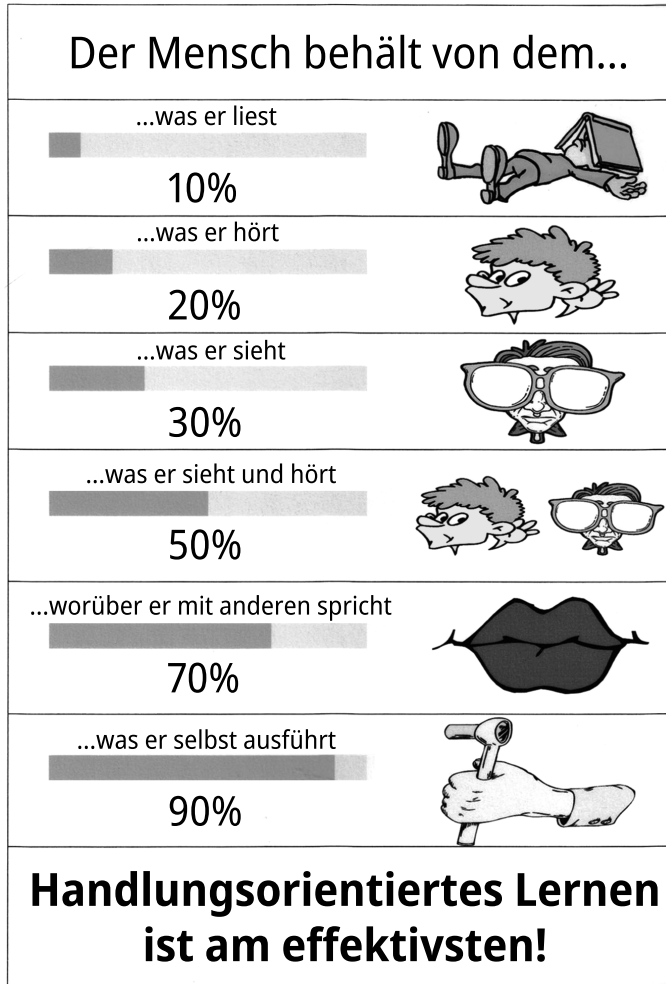
6 Anhang — 458

- 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



Nach einer Studie der American Audiovisual Society

