

# HANSER



## Leseprobe

zu

# Technische Thermodynamik in ausführlichen Beispielen

Mit 57 Bildern und einem Anhang mit zahlreichen  
Tabellen und Diagrammen

von Jan Löser, Marco Klemm, Andreas Hiller

ISBN (Buch): 978-3-446-44279-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-44512-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44279-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Die Energie steht nicht nur als Existenzgrundlage jeder Zivilisation im Mittelpunkt wichtiger aktueller Diskussionen, sie ist als eine der physikalischen Grundgrößen von zentraler Bedeutung für die **naturwissenschaftliche Beschreibung unserer Welt**. Die Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik ermöglichen es, diese physikalische Größe, ihre Wechselwirkungen mit der Materie und die dadurch ausgelösten Vorgänge zu erfassen und zu beschreiben. Damit sind zentrale Bereiche des Lebens, der Naturwissenschaften und Technik berührt. Die Anwendungen sind äußerst vielfältig und ziehen sich von den klassischen Einsatzfeldern in Energiewirtschaft und Energietechnik bis in die verschiedensten Bereiche der Natur- und Ingenieurwissenschaften.

Dabei löst die Thermodynamik bei vielen, die als Studenten oder im Berufsleben erstmalig enger mit ihr in Berührung kommen, ein gewisses Unbehagen aus. Abgesehen davon, dass sicher nicht in jedem Fall die Umstände dieser ersten Berührung ideal sind, ist dies sicher auch in der **Methodik der Thermodynamik** begründet, die sich in vielen von der der klassischen Mechanik als Fundament der Physik und Technik unterscheidet. Während die Größen und Vorgänge der Mechanik mit den menschlichen Sinnen erlebbar sind, trifft dies für die Thermodynamik nur zu einem kleinen Teil zu. Vielmehr ist die Verwendung von Größen unerlässlich, die selbst kaum fassbar, in ihrer Wirkung aber sehr real sind, wie etwa die Energie und die Entropie.

Dies macht zum Einstieg in das Themengebiet einen gewissen Gewöhnungsprozess erforderlich. Deshalb verbindet dieses Buch zur Erleichterung des Selbststudiums kurze einführende Texte mit umfangreich erläuterten Beispielen und Übungsaufgaben. So soll, aufbauend auf begrenzten Vorkenntnissen, ein schnelles Verständnis der Sachlage ermöglicht werden.

Das Buch wendet sich dabei an alle Einsteiger in das Gebiet der technischen Thermodynamik, Studenten im Grundlagenstudium, Nebenfachstudenten, Auszubildende energietechnischer Berufe, aber auch jede Art von „Quereinsteigern“ und Interessierten.

Jan Löser  
Marco Klemm  
Andreas Hiller

Chemnitz und Dresden im Mai 2018

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1	Was will dieses Buch? Inhalt und Bedeutung der Thermodynamik .....	15
1.2	Wozu brauche ich Thermodynamik? .....	16
1.3	An wen wendet sich dieses Buch? .....	18
1.4	Wie benutzt man dieses Buch? .....	19
<b>2</b>	<b>System, Zustand und ihre Beschreibung</b> .....	<b>21</b>
2.1	Allgemeines und Grundlagen .....	21
2.2	System und Zustand .....	21
2.3	Thermodynamisches Gleichgewicht .....	23
2.4	Zustandsgrößen .....	24
2.4.1	Stoff, Masse und Stoffmenge .....	24
2.4.2	Volumen .....	25
2.4.3	Dichte und spezifisches Volumen .....	25
2.4.4	Molvolumen und molare Masse .....	26
2.4.5	Druck .....	28
2.4.6	Temperatur .....	32
2.4.7	Energie .....	33
2.5	Bezugssysteme, Normbedingungen und Standardbedingungen .....	34
2.6	Zustandsänderung, Prozess und Prozessgrößen .....	35
<b>3</b>	<b>Stoffeigenschaften</b> .....	<b>36</b>
3.1	Allgemeines und Grundlagen .....	36
3.2	Spezifische Wärmekapazität .....	36
3.2.1	Allgemeines .....	36
3.2.2	Mittlere spezifische Wärmekapazität .....	37
3.2.3	Beispiele .....	38
3.2.4	Übungsaufgaben .....	43
3.3	Eigenschaften von Gasmischungen .....	43
3.3.1	Allgemeines .....	43
3.3.2	Beispiele .....	49
3.3.3	Übungsaufgaben .....	61

<b>4</b>	<b>Energie und Energieerhaltung .....</b>	<b>62</b>
4.1	Allgemeines und Grundlagen .....	62
4.2	Arbeit und Wärme .....	63
4.3	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik .....	65
4.4	Energiebilanzierung .....	65
4.5	Arbeit am offenen System und Enthalpie .....	67
4.5.1	Beispiel .....	68
<b>5</b>	<b>Zustandsänderung ohne Änderung des Aggregatzustandes .....</b>	<b>71</b>
5.1	Allgemeines und Grundlagen .....	71
5.2	Das ideale Gas .....	71
5.3	Die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase .....	72
5.3.1	Beispiele .....	73
5.3.2	Übungsaufgaben .....	76
5.4	Energetische Aspekte der Zustandsänderung im idealen Gas .....	78
5.4.1	Beispiele .....	82
5.5	Spezielle Zustandsänderungen idealer Gase .....	83
5.5.1	Zustandsänderung bei gleichbleibendem Volumen (isochore Zustandsänderung) .....	84
5.5.2	Zustandsänderung bei gleichbleibendem Druck (isobare Zustandsänderung) .....	85
5.5.3	Zustandsänderung bei gleichbleibender Temperatur (isotherme Zustandsänderung) .....	86
5.5.4	Zustandsänderung ohne Wärmeübertragung (adiabate Zustandsänderung) .....	88
5.5.5	Polytrope Zustandsänderung .....	92
5.5.6	Beispiele .....	93
5.5.7	Übungsaufgaben .....	105
5.6	Zustandsänderungen in Feststoffen und Flüssigkeiten .....	106
5.6.1	Wärmedehnung von Flüssigkeiten und Feststoffen .....	107
5.6.2	Beispiele .....	108
<b>6</b>	<b>Die Grenzen der Energieumwandlung, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Entropie .....</b>	<b>111</b>
6.1	Allgemeines und Grundlagen .....	111
6.2	Kontinuierliche Prozesse, Kreisprozesse .....	111
6.3	Reversible und irreversible Prozesse .....	113
6.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik .....	114

6.5	Die Entropie .....	115
6.6	Die Entropie der speziellen Zustandsänderungen idealer Gase .....	117
6.7	Wirkungsgrad und Gütegrad .....	119
6.8	Der Carnot-Kreisprozess und der Carnot-Wirkungsgrad .....	120
6.9	Beispiele .....	122
6.9.1	Carnot-Wirkungsgrad .....	122
6.9.2	Carnot-Prozess, Nutzarbeit, (thermischer) Carnot-Wirkungsgrad.....	123

<b>7</b>	<b>Anwendung von Kreisprozessen ohne Änderung des Aggregatzustandes .....</b>	<b>128</b>
7.1	Allgemeines und Grundlagen .....	128
7.2	Kontinuierliche rechtsläufige Kreisprozesse, der Gasturbinenprozess .....	129
7.2.1	Wirkungsgradsteigernde Verbesserungsmöglichkeiten für den Joule-Prozess .....	133
7.2.2	Strahltriebwerke als Sonderform der Gasturbinen .....	134
7.2.3	Beispiele .....	135
7.2.4	Übungsaufgabe .....	139
7.3	Periodische rechtsläufige Kreisprozesse, Prozesse in Kolbenmaschinen .....	139
7.3.1	Prozesse in Verbrennungsmotoren .....	140
7.3.2	Periodische rechtsläufige Kreisprozesse mit externer Wärmezuführung .....	161
7.4	Verdichter (Kompressoren) .....	162
7.4.1	Beispiele .....	165
7.4.2	Übungsaufgaben .....	173

<b>8</b>	<b>Zustandsänderungen mit Änderung des Aggregatzustands .....</b>	<b>175</b>
8.1	Allgemeines und Grundlagen .....	175
8.2	Schmelzen und Erstarren .....	176
8.2.1	Beispiele .....	177
8.2.2	Übungsaufgaben .....	177
8.3	Sieden und Kondensieren .....	178
8.3.1	Der Ablauf der Aggregatzustandsänderung beim Verdampfen und Dampfarmen .....	178
8.3.2	Enthalpie und Entropie des Verdampfens und Kondensierens .....	180
8.3.3	Diagramme für die Betrachtung der Aggregatzustandsänderung flüssig-gasförmig .....	182
8.3.4	Beispiele .....	184
8.3.5	Übungsaufgaben .....	202
8.4	Weitere Aggregatzustandsänderungen .....	203

<b>9</b>	<b>Anwendung von Kreisprozessen mit Änderung des Aggregatzustandes</b> .....	<b>205</b>
9.1	Allgemeines und Grundlagen .....	205
9.2	Der ideale Vergleichsprozess der Dampfkraftprozesse, der Clausius-Rankine-Prozess .....	206
9.2.1	Wirkungsgradsteigerung durch optimierte Prozessparameter .....	211
9.2.2	Wirkungsgradsteigerung durch Zwischenüberhitzung .....	211
9.2.3	Regenerative Speisewasservorwärmung zur Wirkungsgradsteigerung ..	213
9.2.4	Beispiele .....	214
9.2.5	Übungsaufgaben .....	222
9.3	Nicht wässrige Arbeitsmedien .....	223
9.4	Dampfkraftprozesse in Kolbenmaschinen .....	223
<b>10</b>	<b>Linksgängige Kreisprozesse, Kältemaschinen und Wärmepumpen</b> .....	<b>225</b>
10.1	Allgemeines und Grundlagen .....	225
10.2	Prinzip des Linksprozesses .....	225
10.3	Linksprozesse ohne Änderung des Aggregatzustandes .....	228
10.4	Linksprozesse mit Änderung des Aggregatzustandes .....	230
10.5	Beispiele .....	232
10.5.1	Gaskälteprozess, offener Prozess, linkslaufender reversibler Joule-Prozess .....	232
10.5.2	Kältekreisprozess für $\text{NH}_3$ , Dampfkälteprozess, Grundlagen .....	236
10.6	Übungsaufgaben .....	240
10.6.1	Unterkühlter Dampfkälteprozess, $\lg p, h$ -Diagramm für Ammoniak $\text{NH}_3$ .....	240
<b>11</b>	<b>Spezielle Prozesse in strömenden Medien</b> .....	<b>241</b>
11.1	Allgemeines und Grundlagen .....	241
11.2	Fließprozess .....	241
11.3	Die adiabate Drosselung .....	242
11.4	Düse und Diffusor .....	243
11.5	Das Ausströmen von Gasen und Dämpfen .....	243
11.6	Beispiele .....	247
11.6.1	Ausströmvorgang, kleines Druckgefälle, Geschwindigkeitsbeiwert, Kontraktionszahl .....	247
11.6.2	Ausströmvorgang, kein kleines Druckgefälle, Ausströmgeschwindigkeit, Massestrom .....	248
11.6.3	Ausströmender Dampf, Laval-Düse, $h, s$ -Diagramm, Dampfgehalt .....	250

11.7 Übungsaufgaben .....	253
11.7.1 Strahlpumpe, Ausströmen, kein kleines Druckgefälle, Laval-Düse, Unterdruck.....	253

<b>12 Die Verbrennung als Vorgang der Umwandlung chemischer Energie in thermische Energie .....</b>	<b>254</b>
12.1 Allgemeines und Grundlagen .....	254
12.2 Vollständige Verbrennung und Luftüberschuss .....	255
12.2.1 Verbrennung gasförmiger Brennstoffe .....	255
12.2.2 Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe .....	262
12.3 Verbrennungsvorgänge bei Luftmangel .....	267
12.3.1 Verbrennung gasförmiger Brennstoffe bei Luftmangel .....	268
12.3.2 Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe bei Luftmangel .....	271
12.4 Beispiele .....	274
12.4.1 Verbrennung eines gasförmigen Brennstoffes (Gasgemisch) mit Luftüberschuss, Luftbedarf, Rauchgaszusammensetzung .....	274
12.4.2 Verbrennung eines festen Brennstoffes (Kohle) mit Luftüberschuss, Rauchgaszusammensetzung .....	278
12.4.3 Ermittlung des Luftverhältnisses aus der Rauchgaszusammensetzung.	280
12.4.4 Verbrennung eines flüssigen Brennstoffes (Heizöl EL) unter Luftmangel .....	281
12.5 Übungsaufgaben .....	283
12.5.1 Ermittlung des Luftverhältnisses aus der Rauchgaszusammensetzung bei stickstoffhaltigem Brenngas .....	283
12.5.2 Verbrennung eines gasförmigen Brennstoffes (Erdgas) unter Luftmangel .....	283
12.6 Energetische Betrachtung der Verbrennung .....	283
12.6.1 Energetische Kenngrößen einer Feuerung .....	287
12.6.2 Berechnung der Heizwerte aus der Brennstoffanalyse .....	289
12.7 Beispiele .....	291
12.7.1 Heizwert eines festen Brennstoffes (Steinkohle) aus der Elementaranalyse .....	291
12.7.2 Heizwert eines gasförmigen Brennstoffes aus seiner Zusammensetzung .....	292
12.7.3 Heizwertminimierung durch Brenngasfeuchte .....	293
12.7.4 Adiabate Verbrennungstemperatur .....	294
12.7.5 Maximale Luftzahl aus erforderlicher Feuerungstemperatur .....	299
12.8 Übungsaufgaben .....	302
12.8.1 Brennwert und Heizwert .....	302
12.8.2 Heizwert eines gasförmigen Brennstoffes aus seiner Zusammensetzung .....	302

<b>13</b>	<b>Wärmetransport .....</b>	<b>303</b>
13.1	Allgemeines und Grundlagen .....	303
13.2	Mechanismen der Wärmeübertragung .....	304
13.2.1	Konduktion oder Wärmeleitung .....	304
13.2.2	Konvektion oder Wärmemitführung .....	305
13.2.3	Radiation oder Wärmestrahlung .....	310
13.3	Wärmedurchgang als kombinierter Vorgang .....	314
13.3.1	Wärmedurchgang durch eine ebene Wand .....	315
13.3.2	Wärmedurchgang durch die Rohrwand .....	317
13.4	Wärmeübertrager als Apparate zur Übertragung von Wärme zwischen Stoffströmen .....	320
13.4.1	Grundlagen .....	320
13.4.2	Wichtige technische Beispiele von Wärmeübertrager .....	323
13.5	Beispiele .....	324
13.5.1	Wärmedurchgangskoeffizient ebene Wand .....	324
13.5.2	Vergleich Wärmedurchgang Rohrwand mit ebener Wand .....	325
13.5.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang .....	329
13.6	Übungsaufgaben .....	331
13.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient ebene Wand .....	332
13.6.2	Wärmedurchgangskoeffizient Ziegelwand .....	332
13.6.3	Wärmedurchgangskoeffizient einer gedämmten Ziegelwand .....	332
13.6.4	Wärmedurchgangskoeffizient für verschmutzte ebene Wand .....	332
13.6.5	Wärmedurchgangskoeffizient verschmutzte mehrschichtige ebene Wand .....	332
13.6.6	Wandtemperaturen beim Wärmestrom von Wasserdampf an Wasser ..	333
13.6.7	Wärmedurchgangskoeffizient zur Schwitzwasservermeidung .....	333
13.6.8	Berechnung der Dämmplattendicke .....	333
13.6.9	Vergleich Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertrager .....	333
13.6.10	Berechnung Wärmeübergangskoeffizient .....	334
13.6.11	Berechnung der Wärmeleistung pro Flächeneinheit .....	334
13.6.12	Verbrennung, Taupunkt, Wärmedurchgang, Heizwert .....	334
13.6.13	Heizflächenberechnung .....	335
13.6.14	Spezifische Wärmeleistung Kondensator .....	335
13.6.15	Überprüfung eines k-Wertes .....	335
13.6.16	Berechnung Wärmeübergangskoeffizient .....	335
13.6.17	Strahlungswärme Kessel/Wand .....	336
13.6.18	Wärmeverlust einer Rohrleitung .....	336
13.6.19	Dynamische Viskosität (Vorübung) .....	336
13.6.20	Wärmeabgabe eines Kachelofens .....	336



<b>14</b>	<b>Gas-Dampf-Gemische, feuchte Luft .....</b>	<b>337</b>
14.1	Allgemeines und Grundlagen .....	337
14.2	Zustandseigenschaften .....	337
14.3	Enthalpie der feuchten Luft .....	340
14.4	Das $h_{1+x}$ , $x_W$ -Diagramm für feuchte Luft .....	342
14.5	Mischen feuchter Luft .....	345
14.6	Beispiele .....	347
14.6.1	Zustandsgrößen feuchter Luft .....	347
14.6.2	Taupunkt feuchter Luft .....	350
14.6.3	Luft als Arbeitsstoff in der Trocknung .....	352
14.6.4	Kühlen, Entfeuchten, Nachheizen, Konditionierung feuchter Luft .....	355
14.6.5	Mischen feuchter Luft .....	358
14.6.6	Psychrometer .....	361
14.6.7	Taupunkt eines feuchten Rauchgases .....	363
14.7	Übungsaufgaben .....	366
14.7.1	Verdichtung feuchter Luft .....	366
14.7.2	Befeuchtung mit Wasser oder Dampf, Konditionierung feuchter Luft ..	366
14.7.3	Mischen mit Nebelluft .....	366
	<b>Anhang .....</b>	<b>367</b>
A.1	Benutzte Formelzeichen mit gebräuchlichen Einheiten und stoffunabhängige Konstanten .....	367
A.2	Indizes .....	372
A.3	Zeiger .....	374
A.4	Stoffdatensammlung .....	375
A.4.1	Stoffeigenschaften wichtiger Gase .....	375
A.4.2	Mittlere Zusammensetzung und spezifischer Heizwert fester und flüssiger Brennstoffe (typische Anhaltswerte) .....	376
A.4.3	Mittlere Zusammensetzung und spezifischer Heizwert gasförmiger Brennstoffe (typische Anhaltswerte) .....	377
A.4.4	Zündeigenschaften verschiedener Brennstoffe (typische Anhaltswerte)	378
A.4.5	Spezifische Verbrennungsenthalpie und spezifischer Heizwert einiger Stoffe (Mittelwerte, gerundet) .....	379
A.4.6	Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{p,m}$ von Gasen und Dämpfen zwischen $0^\circ\text{C}$ und $\vartheta$ bei konstantem Druck $p = 0$ bar .....	380
A.4.7	Wahre spezifische Wärmekapazität $c_p$ von Gasen und Dämpfen bei konstantem Druck $p = 0$ bar .....	381
A.4.8	Wahre molare Wärmekapazität $\bar{c}_p$ von Gasen und Dämpfen bei konstantem Druck $p = 0$ bar .....	382

A.4.9	Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_m$ fester und flüssiger Stoffe .....	383
A.4.10	Wassertafel, Stoffwerte von idealem flüssigem Wasser (nach IAPWS-IF97) .....	384
A.4.11	Sattdampf-tafel – Zustandsgrößen von siedendem Wasser und Dampf bei Sättigung (nach IAPWS-IF97) .....	387
A.4.12	Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_p$ des überhitzten Wasserdampfes (Heißdampf) (nach IAPWS-IF97) .....	391
A.4.13	Heißdampf-tafel – Zustandsgrößen für überhitzten Wasserdampf (nach IAPWS-IF97) .....	393
A.4.14	Zustandsgrößen für gesättigte feuchte Luft im Temperaturbereich $-20 \dots 95 \text{ }^\circ\text{C}$ (nach IAPWS-IF97) .....	395
A.4.15	Zustandsgrößen und Stoffwerte für trockene Luft als ideales Gas im Temperaturbereich $-20 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	397
A.4.16	Sattdampf-tafel für Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) – Zustandsgrößen von siedendem Ammoniak und Ammoniak-Dampf bei Sättigung .....	399
A.4.17	Strahlungskoeffizient $C$ und Gesamtemissionsgrad $\varepsilon$ verschiedener Oberflächen bei $0 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	400
A.4.18	Temperaturfaktor $\beta$ .....	401
A.4.19	mittlere Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ und spezifische Wärmekapazität $c$ von Metallen, Legierungen und Kunststoffen .....	402
A.4.20	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ und Dichte $\rho$ ausgewählter Stoffe mit durchschnittlichem Feuchtegehalt bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	404
A.4.21	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ von Wasser und Wasserdampf bei verschiedenen Temperaturen und Drücken .....	407
A.4.22	Kennzeichnende Stoffwerte für die Wärmeübertragung (nach IAPWS-IF97, VDI-Wärmeatlas) .....	408
A.4.23	Dynamische Viskosität $\eta$ verschiedener Gase und Dämpfe in Abhängigkeit der Temperatur mit Hilfe der Sutherland-Konstante $C$ .....	414
A.4.24	Schüttdichten $\rho$ wichtiger technischer Stoffe (Anhaltswerte) .....	415
A.4.25	Längen- und Volumenausdehnungskoeffizienten $\alpha$ und $\gamma$ wichtiger technischer Stoffe .....	416
A.4.26	Spezifische Schmelzenthalpien und Schmelztemperaturen wichtiger technischer Stoffe (Anhaltswerte bei $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$ ) .....	418
A.5	Formelsammlung .....	419
A.5.1	Auswahl dimensionsloser Ähnlichkeitskennzahlen des konvektiven Wärmeübergangs .....	419
A.5.2	Anhaltswerte des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha$ und der Nußelt-Zahl $Nu$ .....	421
A.6	Umrechnung von Einheiten .....	431
A.6.1	Temperatureinheiten .....	431
A.6.2	Druckeinheiten .....	432

A.6.3	(Arbeits-) Energieeinheiten .....	433
A.6.4	Leistungseinheiten .....	434
A.7	Beilagen .....	435
A.7.1	Mollier- $h, s$ -Diagramm für Wasserdampf.....	435
A.7.2	$T, s$ -Diagramm für Wasserdampf .....	436
A.7.3	$\lg p, h$ -Diagramm für Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) .....	437
A.7.4	Mollier- $h_{1+x}, x_W$ -Diagramm für feuchte Luft .....	438
<b>Literatur</b>	.....	<b>439</b>
<b>Index</b>	.....	<b>441</b>

# 3

## Stoffeigenschaften

### ■ 3.1 Allgemeines und Grundlagen

*Worum geht es im Kapitel?*

Beschreibung der für die technische Thermodynamik relevanten Eigenschaften von Stoffen.

*Anwendungsgebiete*

Grundlage für die Anwendung der Thermodynamik auf reale Stoffe, Enthalpiebilanzen

*Siehe auch:*

Anhang A.4 Stoffdatensammlung

### ■ 3.2 Spezifische Wärmekapazität

#### 3.2.1 Allgemeines

Die **spezifische Wärmekapazität**  $c$  eines Stoffes ist die Wärme(-menge) in J, die zur Erwärmung von 1 kg dieses Stoffes um 1 K erforderlich ist.

Sie ist eine individuelle Stoffeigenschaft, zählt zu den energetischen Zustandsgrößen wie u. a. Enthalpie, Entropie und Exergie und hängt bei Gasen deutlich von Druck und Temperatur und bei Flüssigkeiten und Feststoffen im Wesentlichen von der Temperatur ab.

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (3.10)$$

$Q_{12}$  Wärme(-menge), die notwendig ist, um dem Stoff eine bestimmte Temperaturdifferenz aufzuprägen, in kJ

$m$  Masse des Stoffes, der eine Temperaturänderung erfährt, in kg

$c$  spezifische Wärmekapazität, Stoffwert in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  (siehe Anhang A.4.6 ff.)

$$(\vartheta_2 - \vartheta_1) = \Delta\vartheta_{21} \quad (3.11)$$

$\vartheta_2$  Endtemperatur (Zustand 2) in °C oder K

$\vartheta_1$  Anfangstemperatur (Zustand 1) in °C oder K

$\Delta\vartheta_{21}$  Temperaturdifferenz zwischen Zustand 2 und Zustand 1 in K

**Tabelle 3.1** Anhaltswerte spezifischer Wärmekapazität ausgewählter Stoffe

Anhaltswerte ausgewählter Stoffe:	Pb	Cu	Beton	Luft	Polystyrol	Eis	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>
spez. Wärmekapazität in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	0,129	0,419	0,879	1,006	1,38	2,09	4,185	14,32
Bezugstemperatur in °C	20	20	20	0	20	0	20	20
Bezugsdruck in bar	–	–	–	1	–	–	1	1

*Hinweise:*

- weitere Stoffwerte: siehe Anhang A.4.6 ff.
- feste und flüssige Stoffe:  $c$  weitgehend unabhängig vom Druck, jedoch abhängig von der Temperatur
- gasförmige Stoffe:  $c$  deutlich abhängig von Druck und Temperatur
- früher häufig gebrauchte, nicht SI-konforme Einheit der Wärme(-menge): Kalorie,  $1 \text{ cal}_{\text{IT}} = 4,1868 \text{ J}$ ,  $1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J}$
- Umrechnungstabellen für Arbeits- bzw. Energieeinheiten: Anhang A.6.3

### 3.2.2 Mittlere spezifische Wärmekapazität

Da sich die spezifische Wärmekapazität im Allgemeinen mit der Temperatur ändert, ist bei größeren Temperaturdifferenzen zwischen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  mit der **mittleren spezifischen Wärmekapazität**  $c_m|_{\vartheta_1}^{\vartheta_2}$  zu rechnen. Dabei gilt dann:

$$c_m \Big|_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} = \frac{c_m \Big|_{\vartheta_0}^{\vartheta_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_0) - c_m \Big|_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \quad (3.12)$$

$c_m$  mittlere spezifische Wärmekapazität eines Stoffes in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

$\vartheta_0$  Bezugstemperatur in °C

$\vartheta_2$  Endtemperatur (Zustand 2) in °C oder K

$\vartheta_1$  Anfangstemperatur (Zustand 1) in °C oder K

Der Wert  $c_m|_{\vartheta_0}^{\vartheta_x}$ , also die mittlere spezifische Wärmekapazität eines Stoffes zwischen  $\vartheta_0$  (meist 0°C, so auch hier) und der beliebigen Temperatur  $\vartheta_x$ , ist in Tabellen, die wie Anhang A.4.6 aufgebaut sind, zu finden. Zwischenwerte von  $\vartheta_x$ , die nicht explizit aufgeführt sind, können durch Interpolation ermittelt werden.

Werden die Werte aus Anhang A.4.6 eingesetzt, dann ist Gleichung (3.10):

$$Q_{12} = m \cdot \left( c_p \Big|_{\vartheta_0}^{\vartheta_2} \cdot \vartheta_2 - c_p \Big|_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \cdot \vartheta_1 \right) \quad (3.13)$$

- $Q_{12}$  Wärme(-menge) in kJ  
 $m$  Masse des Stoffes, der eine Temperaturänderung erfährt, in kg  
 $c_p$  wahre spezifische Wärmekapazität eines Stoffes in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$   
 $\vartheta_0$  Bezugstemperatur in °C oder K  
 $\vartheta_2$  Endtemperatur (Zustand 2) in °C oder K  
 $\vartheta_1$  Anfangstemperatur (Zustand 1) in °C oder K

Die Werte des Anhangs A.4.7 sind auf die wahre spezifische Wärmekapazität bei der jeweiligen Temperatur bezogen.

Für nicht zu große Temperaturdifferenzen kann die wahre spezifische Wärmekapazität nach Anhang A.4.7 für die **mittlere Temperatur**  $\vartheta_m$  eingesetzt werden.

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_1}{2} \quad (3.14)$$

- $\vartheta_m$  mittlere Temperatur in °C oder K  
 $\vartheta_2$  Endtemperatur (Zustand 2) in °C oder K  
 $\vartheta_1$  Anfangstemperatur (Zustand 1) in °C oder K

Spezifische Wärmekapazitäten ändern sich nicht immer kontinuierlich mit steigender oder sinkender Temperatur. Auch kommen Anomalien im Werteverlauf vor, so auch beispielsweise bei flüssigem Wasser. Es hat bei ca. 41 °C eine minimale spezifische Wärmekapazität von  $c_{p,\min} = 4,178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ .

Ebenso kommt es bei Phasenwechseln (fest zu flüssig, flüssig zu gasförmig und umgekehrt) zu starken Änderungen der spezifischen Wärmekapazität.

Eis, flüssiges Wasser und Wasserdampf haben im Vergleich zu den meisten anderen festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen eine relativ hohe spezifische Wärmekapazität, was sie neben der allgemein hohen Verfügbarkeit und der physiologischen Unbedenklichkeit interessant als Speicher- und Transportmedium in der Versorgungs- und Verfahrenstechnik machen.

### 3.2.3 Beispiele

#### 3.2.3.1 Erwärmung, spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz, Feststoff

Welche Wärmemenge ist erforderlich, um 2 kg Kupfer von 0 °C auf eine Temperatur von 300 °C zu erwärmen?

- gegeben: Masse Kupfer  $m_{\text{Cu}} = 2,0 \text{ kg}$   
 Anfangstemperatur  $\vartheta_1 = 0 \text{ °C}$   
 Endtemperatur  $\vartheta_2 = 300 \text{ °C}$   
 gesucht: Wärmemenge  $Q_{12}$  in kJ

*Lösung:*

Es gilt nach Gleichung (3.10):

$$Q_{12} = m_{\text{Cu}} \cdot c_{m,\text{Cu}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

In Anhang A.4.19 ist die mittlere spezifische Wärmekapazität von Kupfer zu finden:

$$c_{m,\text{Cu}} = 0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Damit ist dann die notwendige Wärmemenge:

$$Q_{12} = 2 \text{ kg} \cdot 0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (300 - 0) \text{ K}$$

$$Q_{12} = 234 \text{ kJ}$$

### 3.2.3.2 Erwärmung, spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz, Flüssigkeit

Welche Wärme(-menge) muss  $1 \text{ m}^3$  Wasser von  $20^\circ\text{C}$  zugeführt werden, damit seine Temperatur auf  $92^\circ\text{C}$  ansteigt?

gegeben:    Volumen Wasser     $V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0 \text{ m}^3$   
                   Anfangstemperatur     $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$   
                   Endtemperatur         $\vartheta_2 = 92^\circ\text{C}$

gesucht:    Wärmemenge         $Q_{12}$  in kJ

*Lösung:*

Zunächst muss die Masse des zu erwärmenden Wassers errechnet werden. Dazu wird die Dichte des Wassers bei der Anfangstemperatur  $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$  aus Anhang A.4.10 ermittelt.

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 998,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dann ist die Masse des Wassers nach Gleichung (2.1):

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 998,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ m}^3 = 998,21 \text{ kg}$$

Da hier die Differenz zwischen Anfangs- und Endtemperatur nicht sehr groß ist, kann die spezifische Wärmekapazität des Wassers bei mittlerer Temperaturdifferenz zwischen Anfangs- und Endtemperatur nach Gleichung (3.14) genutzt werden.

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_1}{2} = \frac{(92 + 20)^\circ\text{C}}{2} = 56^\circ\text{C}$$

Für diese Temperatur ist nach Anhang A.4.10 die spezifische Wärmekapazität von Wasser:

$$c_{m,\text{H}_2\text{O}} = 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Nach Gleichung (3.10) errechnet sich die notwendig zuzuführende Wärmemenge zu

$$Q_{12} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{m,\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) = 998,21 \text{ kg} \cdot 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (92 - 20) \text{ K}$$

$$Q_{12} = 300\,493 \text{ kJ} = 300,5 \text{ MJ}$$

Es sind also 300,5 MJ notwendig, um  $1 \text{ m}^3$  Wasser von  $20^\circ\text{C}$  auf  $92^\circ\text{C}$  zu erwärmen.

### 3.2.3.3 Mischtemperatur, Kalorimeter, Feststellen spezifischer Wärmekapazität

*Kalorimeterversuch:* Zur Feststellung der spezifischen Wärmekapazität von Stoffen wird das Kalorimeter verwendet. Hierbei wird der Körper, dessen spezifische Wärmekapazität ermittelt werden soll, auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und anschließend in ein Gefäß mit Wasser (Gefäß und Wasser haben die gleiche Temperatur) getaucht, das nach außen hin wärmedicht isoliert ist. Nach einer bestimmten Zeit stellt sich eine Mischungstemperatur ein (siehe Bild 3.1). Es gilt also folgendes Prinzip:

$$\underbrace{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{K}})}_{\text{Wasser}} + \underbrace{m_{\text{K}} \cdot c_{\text{m,K}} \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{K}})}_{\text{Kalorimetergefäß}} = \underbrace{m_3 \cdot c_{\text{m,3}} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_{\text{mix}})}_{\text{eingetauchter Körper}}$$

aufgenommene Wärme = abgegebene Wärme

Ein Stück Metall mit einer Masse von 225 g wird auf eine Temperatur von 100 °C erwärmt und in ein Kalorimetergefäß aus Messing mit einer Masse von 200 g gebracht. Die Wassermasse im Kalorimeter beträgt 450 g. Die Anfangstemperatur von Wasser und Kalorimeter liegt bei 15 °C. Die sich einstellende Mischtemperatur beträgt 20,6 °C.

Wie groß ist die spezifische Wärmekapazität des Metallstücks?

gegeben:	Masse Wasser	$m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,45 \text{ kg}$
	Masse Messing-Kalorimeter	$m_{\text{K}} = 0,2 \text{ kg}$
	Masse Metall	$m_{\text{M}} = 0,225 \text{ kg}$
	Mischtemperatur	$\vartheta_{\text{mix}} = 20,6 \text{ °C}$
	Anfangstemperatur Kalorimeter	$\vartheta_{\text{K}} = 15 \text{ °C}$
	Anfangstemperatur Metall	$\vartheta_{\text{M}} = 100 \text{ °C}$
gesucht:	mittlere spezifische Wärmekapazität Metall	$c_{\text{m,M}}$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

*Lösung:*

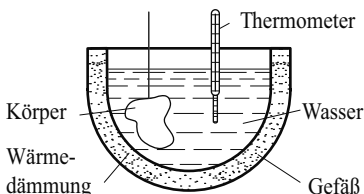
Aus Anhang A.4.10 werden die Werte der mittleren spezifischen Wärmekapazität für Wasser und aus Anhang A.4.19 die für Messing des Kalorimeters bei der mittleren Temperatur zwischen 15 °C und 20,6 °C, also nach Gleichung (3.14)

$$\vartheta_{\text{m}} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_1}{2} = \frac{(15 + 20,6) \text{ °C}}{2} = 17,8 \text{ °C}$$

für 17,8 °C  $\approx$  18 °C herausgesucht und sind:

$$c_{\text{m,H}_2\text{O}} = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{\text{m,K}} = 0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$



**Bild 3.1** Prinzip eines einfachen Kalorimeters



Bei der Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität eines Körpers in einem Kalorimeter gilt:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{K}}) + m_{\text{K}} \cdot c_{\text{m,K}} \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{K}}) = m_{\text{M}} \cdot c_{\text{m,M}} \cdot (\vartheta_{\text{M}} - \vartheta_{\text{mix}})$$

Die Gleichung wird umgestellt nach der gesuchten mittleren spezifischen Wärmekapazität des Metallstücks:

$$c_{\text{m,M}} = \frac{(m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}} + m_{\text{K}} \cdot c_{\text{m,K}}) \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{K}})}{m_{\text{M}} \cdot (\vartheta_{\text{M}} - \vartheta_{\text{mix}})}$$

Nach dem Einsetzen der Werte ergibt sich die spezifische Wärmekapazität des Metallstücks:

$$c_{\text{m,M}} = \frac{\left(0,45 \text{ kg} \cdot 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 0,2 \text{ kg} \cdot 0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot (20,6 - 15) \text{ K}}{0,225 \text{ kg} \cdot (100 - 20,6) \text{ K}}$$

$$c_{\text{m,M}} = 0,615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Das im Kalorimeter untersuchte Metallstück hat somit eine mittlere spezifische Wärmekapazität von  $0,615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ .

### 3.2.3.4 Mischen von Wasser, Mischtemperatur

Durch Mischung sollen 40 kg Wasser mit einer Temperatur von  $45^\circ\text{C}$  hergestellt werden. Dafür steht Wasser mit einer Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  und  $60^\circ\text{C}$  zur Verfügung.

Welche Masseanteile sind jeweils erforderlich?

gegeben:	Masse Wasser	$m_{\text{H}_2\text{O}} = 40 \text{ kg}$
	Mischtemperatur	$\vartheta_{\text{mix}} = 45^\circ\text{C}$
	Temperatur Wasseranteil 1	$\vartheta_{\text{H}_2\text{O},1} = 10^\circ\text{C}$
	Temperatur Wasseranteil 2	$\vartheta_{\text{H}_2\text{O},2} = 60^\circ\text{C}$
gesucht:	Masse Wasseranteil 1	$m_{\text{H}_2\text{O},1}$ in kg
	Masse Wasseranteil 2	$m_{\text{H}_2\text{O},2}$ in kg

*Lösung:*

Bei einer Mischung des gleichen Stoffes mit unterschiedlichen Temperaturen und nicht zu großen Temperaturdifferenzen ist:

$$m_{\text{H}_2\text{O},1} \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O},1} + m_{\text{H}_2\text{O},2} \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O},2} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{mix}}$$

Weiterhin gilt:

$$m_{\text{H}_2\text{O},1} + m_{\text{H}_2\text{O},2} = m_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O},2} = m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{H}_2\text{O},1}$$

Dies eingesetzt ergibt:

$$m_{\text{H}_2\text{O},1} \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O},1} + (m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{H}_2\text{O},1}) \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O},2} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{mix}}$$

Durch Umstellung ergibt sich die benötigte Wassermenge mit einer Temperatur von 10 °C:

$$m_{\text{H}_2\text{O},1} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_{\text{mix}} - \vartheta_{\text{H}_2\text{O},2})}{\vartheta_{\text{H}_2\text{O},1} - \vartheta_{\text{H}_2\text{O},2}} = \frac{40 \text{ kg} \cdot (45 - 60) \text{ K}}{(10 - 60) \text{ K}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O},1} = 12 \text{ kg}$$

und die benötigte Menge Wasser mit einer Temperatur von 60 °C:

$$m_{\text{H}_2\text{O},2} = m_{\text{H}_2\text{O}} - m_{\text{H}_2\text{O},1} = (40 - 12) \text{ kg}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O},2} = 28 \text{ kg}$$

Die gewünschten 40 kg Wasser der Temperatur 45 °C können durch Mischung von 12 kg Wasser von 10 °C und 28 kg Wasser von 60 °C hergestellt werden.

### 3.2.3.5 Mischtemperatur, mittlere spezifische Wärmekapazität, Temperaturlausgleich

500 g Stahl mit einer Temperatur von 800 °C werden in 10 kg Wasser mit einer Temperatur von 15 °C abgeschreckt.

Wie hoch steigt die Temperatur des Wassers, wenn der Temperaturlausgleich ohne Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt?

gegeben:	Masse Stahl	$m_{\text{St}} = 0,5 \text{ kg}$
	Masse Wasser	$m_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \text{ kg}$
	Anfangstemperatur Stahl	$\vartheta_{\text{St}} = 800 \text{ °C}$
	Anfangstemperatur Wasser	$\vartheta_{\text{H}_2\text{O}} = 15 \text{ °C}$
gesucht:	Mischtemperatur	$\vartheta_{\text{mix}}$ in °C

*Lösung:*

Bei Mischungen verschiedener Stoffe gilt:

$$m_{\text{St}} \cdot c_{\text{m,St}} \cdot \vartheta_{\text{St}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O}} = (m_{\text{St}} \cdot c_{\text{m,St}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}}) \cdot \vartheta_{\text{mix}}$$

Aus Anhang A.4.9 werden die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten von Stahl, allgemein, Temperaturbereich 0...1200 °C, und Wasser herausgesucht:

$$c_{\text{m,St}} = 0,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad c_{\text{m,H}_2\text{O}} = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Die Gleichung (3.10) wird nach der Mischtemperatur  $\vartheta_{\text{mix}}$  umgestellt:

$$\vartheta_{\text{mix}} = \frac{m_{\text{St}} \cdot c_{\text{m,St}} \cdot \vartheta_{\text{St}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{St}} \cdot c_{\text{m,St}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{m,H}_2\text{O}}}$$

Die Werte werden eingesetzt und die Mischtemperatur berechnet sich zu

$$\vartheta_{\text{mix}} = \frac{0,5 \text{ kg} \cdot 0,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 800 \text{ °C} + 10 \text{ kg} \cdot 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 15 \text{ °C}}{0,5 \text{ kg} \cdot 0,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 10 \text{ kg} \cdot 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}$$

$$\vartheta_{\text{mix}} = 21,6 \text{ °C}$$

Nach dem Temperaturlausgleich hat das Wasserbad mit eingetauchtem Stahlstück eine gemeinsame Temperatur von 21,6 °C.

### 3.2.4 Übungsaufgaben<sup>1</sup>

#### 3.2.4.1 Erwärmung, mittlere spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz

- Welche Wärmemenge ist erforderlich, um 1 kg Chromstahl 1.4003 mit einer Temperatur von 0 °C auf 150 °C zu erwärmen?
- Welche Wärmemenge ist erforderlich, um 1 kg Wasser mit einer Temperatur von 0 °C auf 80 °C zu erwärmen?
- Welcher der unter a) und b) genannten Körper hat die größere Menge Energie aufgenommen?

#### 3.2.4.2 Mischtemperatur, Kalorimeter, spezifische Wärmekapazität

Ein Nickelzylinder mit einer Masse von 500 g wird erwärmt und in ein Kalorimeter aus Messing mit einer Masse von 100 g gebracht. Die Wassermasse im Kalorimeter beträgt 300 g. Die Anfangstemperatur von Wasser und Kalorimeter liegt bei 14,4 °C. Die sich einstellende Mischtemperatur beträgt 55,9 °C.

Wie hoch war die Temperatur des Nickels vor dem Einbringen in das Kalorimeter?

#### 3.2.4.3 Mischen von Wasser, Mischtemperatur

15 kg Wasser von 60 °C werden mit 25 kg Wasser von 10 °C gemischt.

Welche Mischungstemperatur stellt sich nach dem Temperatenausgleich ein?

## 3.3 Eigenschaften von Gasmischungen

### 3.3.1 Allgemeines

In vielen Fällen sind die im Einsatz befindlichen Stoffe keine Reinstoffe, sondern Gemische. Für deren Betrachtung sind die Kennzahlen der Gemische erforderlich. Im Normalfall beeinflussen sich die Komponenten bei der Gemischbildung derart, dass sich komplexe Abhängigkeiten für die Eigenschaften der Gemische ergeben. Eine Ausnahme stellen in vielen Fällen Gase dar. Insbesondere für ideale Gase (siehe Kapitel 5) ergeben sich einfache Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Einzelkomponenten, der Zusammensetzung und den Eigenschaften des Gemisches.

Um die Zusammensetzung eines Gemisches anzugeben, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Den **Masseanteil**  $\xi_i$ :

$$\xi_i = \frac{m_i}{m_{\text{ges}}} \quad (3.15)$$

$\xi_i$  Masseanteil der Komponente  $i$  in  $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$

$m_i$  im Gemisch vorhandene Masse der Komponente  $i$  in kg

$m_{\text{ges}}$  Gesamtmasse des Gemisches in kg

<sup>1</sup> Die Lösungen finden Sie in der Kategorie „Extras“ unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446442795>

# 9

## Anwendung von Kreisprozessen mit Änderung des Aggregatzustandes

### ■ 9.1 Allgemeines und Grundlagen

*Worum geht es im Kapitel?*

Anwendung der bisherigen Inhalte, insbesondere der Kapitel 6 und 8, auf technisch genutzte Prozesse und Maschinen mit Aggregatzustandsänderung

*Anwendungsgebiete:*

Theoretische, idealisierte Betrachtung von Dampfturbinen, Dampfmaschinen und -motoren

*Siehe auch:*

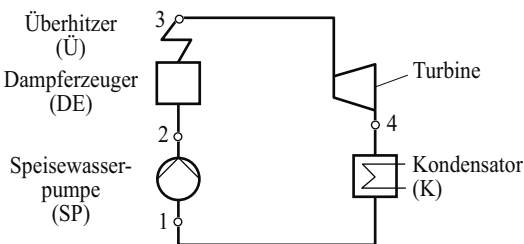
6 Die Grenzen der Energieumwandlung, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Entropie, 8 Zustandsänderungen mit Änderung des Aggregatzustands

*Vorbetrachtungen:*

Wurden im Kapitel 7 Kreisprozesse betrachtet, bei denen das Arbeitsmedium näherungsweise ein ideales Gas war, so sind Gegenstand dieses Kapitels Kreisprozesse, bei denen die Änderung des Aggregatzustandes ausgenutzt wird. Man spricht häufig von einem **Dampfkraftprozess**.

Auch der Dampfkraftprozess gliedert sich, wie der Gasturbinenprozess, in die Teile Verdichtung, Wärmezufuhr, Expansion und Wärmeabfuhr (Bild 9.1).

Dabei ist der wesentliche Unterschied zu den Gaskraftprozessen, dass die Verdichtung, hier Pumpen genannt, bei den Dampfkraftprozessen mit flüssigem Medium stattfindet, während die Expansion mit gasförmigem Medium bzw. Dampf abläuft. Das hat zur Folge, dass die für die Verdichtung notwendige mechanische Arbeit klein gegenüber der mechanischen Arbeit ist, die aus der Expansion gewonnen werden kann. Dies ist ein großer Vorteil von Kreisprozessen



**Bild 9.1** Grundaufbau eines Dampfkraftprozesses

mit Änderung des Aggregatzustandes. Die Wärmezufuhr wird in der Regel Dampferzeugung, die Wärmeabfuhr Kondensation genannt, beide verlaufen mit Aggregatzustandsänderung.

## ■ 9.2 Der ideale Vergleichsprozess der Dampfkraftprozesse, der Clausius-Rankine-Prozess

Kreisprozesse mit Änderung des Aggregatzustandes lassen sich idealisiert betrachten, wenn man vorerst die Irreversibilität der Teilprozesse vernachlässigt, insbesondere die Irreversibilitäten in Verdichtung und Expansion und die Druckverluste im Dampferzeuger und im Kondensator.

Der so gewonnene ideale Vergleichsprozess wird als **Clausius-Rankine-Prozess** bezeichnet.

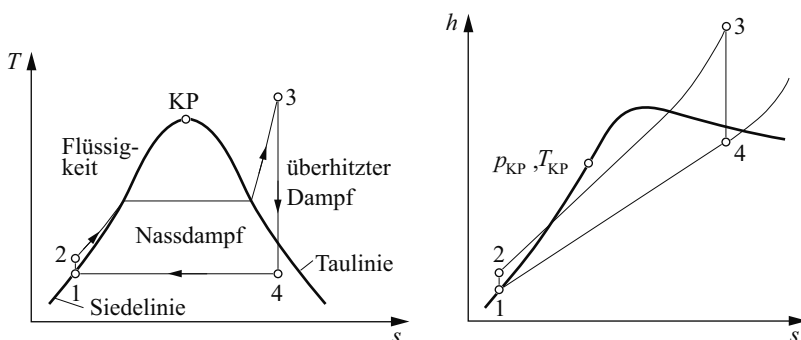
In Bild 9.2 ist der Clausius-Rankine-Prozess im  $T, s$ - und im  $h, s$ -Diagramm dargestellt.

### Grundsätzliche Bezeichnungen:

- Es werden die Zustände als Anfangs- und Endpunkte der Hauptprozesse fortlaufend nummeriert.
- Schnittpunkte mit der Siedelinie (Siedebeginn) werden mit der Nummer des vorherigen Zustandes und einem Strich (') bezeichnet.
- Schnittpunkte mit der Taulinie (Siedeende bzw. Kondensationsbeginn) werden mit der Nummer des vorherigen Zustandes und zwei Strichen (") bezeichnet (siehe unten).

Der Kreisprozess läuft zwischen 4 **Zuständen** ab, von denen jeweils die aufeinanderfolgenden durch einen charakteristischen Teilprozess verbunden sind:

**Zustand 1: flüssiges Medium auf Kondensatordruck:** Ein Durchlauf durch den Kreisprozess startet mit dem Zustand, mit dem der Durchlauf durch den Kreisprozess auch endet. In diesem Zustand liegt demnach flüssiges Medium mit der Temperatur und dem Druck der Wärmeabfuhr (Kondensation) vor. Von diesem Zustand minimaler Temperatur und minimalem Druckes startet der Teilprozess 1–2.



**Bild 9.2** Der ideale Dampfkraftprozess (Clausius-Rankine Prozess) im  $T, s$ - und  $h, s$ -Diagramm

**Teilprozess 1–2: isentrope (reversibel adiabate) Verdichtung der flüssigen Phase:** Die isentrope (reversibel adiabate) Verdichtung der flüssigen Phase erfolgt durch das Pumpen mit einer Speisepumpe (für Wasser als Arbeitsmedium Speisewasserpumpe genannt). Diese bewirkt eine Erhöhung des Druckes. Isentrope Prozesse sind eine Senkrechte im  $T, s$ - wie im  $h, s$ -Diagramm. Für die Verdichtung muss Arbeit am System verrichtet werden. Diese ist jedoch klein gegenüber der Arbeit, die das System zwischen 3 und 4 verrichten kann.

**Zustand 2: flüssiges Medium auf Dampferzeugerdruck:** Nach dem Pumpvorgang liegt flüssiges Medium auf Dampferzeugerdruck vor. Die Druckerhöhung des flüssigen Mediums zwischen 1 und 2 ist die einzige Druckerhöhung im Kreisprozess. Das heißt, die Speisepumpe muss so ausgelegt sein, dass sie den maximal erforderlichen Druck, repräsentiert durch den Dampfdruck am Turbineneintritt (Druck im Zustand 3:  $p_3$ , Frischdampfparameter), und im nicht idealen Fall zusätzlich die Druckverluste bereitstellt. Ausgehend von Zustand 2 beginnt die Wärmezufuhr.

**Teilprozess 2–3: isobare Wärmezufuhr in einem Dampferzeuger (auch Dampfkessel genannt):** Zwischen Zustand 2 und der Siedelinie erfolgt dabei eine Wärmezufuhr zu einer Flüssigkeit. Man spricht in diesem Fall von **Vorwärmung**. Zwischen der Siedelinie und der Taulinie bewirkt weitere Wärmezufuhr, wie in Kapitel 8 erläutert, keine weitere Temperaturerhöhung, sondern eine Phasenumwandlung von flüssig nach gasförmig (**Verdampfung**). Erst nach dem Passieren der Taulinie führt eine weitere Wärmezufuhr zu einer weiteren Temperaturerhöhung. Dieser Teilprozess wird **Überhitzung** genannt. Der gesamte Teilprozess folgt in den Zustandsdiagrammen einer Isobare. Der Punkt, bei dem die Isobare die Siedelinie schneidet, wird mit  $2'$ , der Punkt, bei dem die Isobare die Taulinie schneidet, mit  $2''$  bezeichnet. Damit entspricht: die Vorwärmung  $2-2'$ , die Verdampfung  $2'-2''$  und die Überhitzung  $2''-3$ . Für die Wärmezufuhr wird beispielsweise die thermische Energie einer Verbrennung (siehe Kapitel 12) oder ein Abwärmestrom genutzt.

**Zustand 3: Dampf vor der Expansion:** Die Parameter am Verdampfende beziehungsweise vor der Expansion werden auch **Frischdampfparameter** genannt. In Äquivalenz zum Carnot-Prozess bewirkt eine hohe Frischdampfparameter als Temperatur der Wärmezufuhr einen hohen Wirkungsgrad. Um eine hohe Frischdampfparameter nutzen zu können, ist auch ein hoher Frischdampfdruck erforderlich.

**Teilprozess 3–4: isentrope (reversibel adiabate) Expansion oder Entspannung in einer Expansionsmaschine:** Hierbei verrichtet das System Arbeit. Die Expansionsmaschine ist in der weit überwiegenden Zahl der Fälle eine Turbine, sie kann jedoch auch eine Verdrängermaschine sein, wie in Abschnitt 9.4 näher erläutert wird. Auch hier ist der isentrope Prozess durch eine Senkrechte im  $T, s$ - wie im  $h, s$ -Diagramm dargestellt. Die Expansion kann bis in das Nassdampfgebiet verlaufen, sodass am Ende der Expansion ein Dampf-Wasser-Gemisch vorliegt. Der Schnittpunkt der Isentrope mit der Taulinie wird als  $3''$  bezeichnet.

**Zustand 4: Dampf nach der Expansion:** Die Kondensationstemperatur ist durch die Temperatur des Kühlmediums, an das die Wärme abgegeben wird, und die Auslegung des Kondensators vorgegeben. Der Druck entspricht dabei dem zur Kondensatortemperatur gehörigen Verdampfungsdruck bzw. Kondensationsdruck. Da der Teilprozess 4–1 isobar ist, gilt  $p_4 = p_1$ . Weil in dieser idealisierten Betrachtung der gesamte Teilprozess 4–1 eine Aggregatzustandsänderung ist, gilt auch  $\vartheta_4 = \vartheta_1$ .

**Teilprozess 4–1: isobare Wärmeabfuhr in einem Kondensator:** Diese ist mit einem Phasenwechsel von gasförmig nach flüssig verbunden. Der Prozess folgt in den Zustandsdiagrammen

einer Isobare. Die Wärme wird an ein Kühlmedium, beispielsweise Kühlwasser oder Umgebungsluft, abgegeben. Da, wie im Fortgang dieses Kapitels ausgeführt, eine geringe Temperatur der Wärmeabfuhr, äquivalent zum Carnot-Prozess, günstig für den Wirkungsgrad der Arbeitsbereitstellung ist, werden Prozesse, die rein auf Bereitstellung von Nutzarbeit ausgelegt sind, auf eine niedrige Temperatur der Wärmeabfuhr optimiert. Dies erfordert – die Wärmeabfuhr ist mit dem Phasenwechsel bei der Kondensation verbunden – einen sehr geringen Druck. In typischen Kondensatoren von Dampfkraftprozessen herrschen deshalb Drücke weit unterhalb des Umgebungsdruckes. Diese sind charakteristisch für **Zustand 1**.

Für die Berechnung des Clausius-Rankine-Prozesses ist im großen Umfang auf Dampftafeln oder die Zustandsdiagramme zurückzugreifen, weil die speziellen Stoffeigenschaften des Arbeitsmediums für die Beschreibung der Änderungen des Aggregatzustandes entscheidend sind und diese nur näherungsweise in Formeln gebracht werden können.

Es gelten die folgenden **Berechnungsvorschriften**:

**1–2: isentrope** (reversibel adiabate) **Verdichtung der flüssigen Phase:**

$$w_{\text{SP}} = \Delta h_{12} = h_2 - h_1 = v_1 \cdot (p_2 - p_1) \quad (9.148)$$

$w_{\text{SP}}$  spezifische Speisepumpenarbeit in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{12}$  Änderung der spezifischen Enthalpie des flüssigen Arbeitsmediums zwischen den Zuständen 1 und 2 (Pumpen) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_1$  spezifische Enthalpie im Zustand 1 (vor der Speisepumpe) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_2$  spezifische Enthalpie im Zustand 2 (nach der Speisepumpe) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$v_1$  spezifisches Volumen im Zustand 1 (vor der Speisepumpe) in  $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

$p_1$  Druck im Zustand 1 (vor der Speisepumpe) in kPa

$p_2$  Druck im Zustand 2 (nach der Speisepumpe) in kPa

mit:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + \frac{\Delta h_{12}}{c_{p,m}} \quad (9.149)$$

$\vartheta_2$  Temperatur im Zustand 2 (nach der Speisepumpe) in °C

$\vartheta_1$  Temperatur im Zustand 1 (vor der Speisepumpe) in °C

$\Delta h_{12}$  Änderung der spezifischen Enthalpie des flüssigen Arbeitsmediums zwischen den Zuständen 1 und 2 (Pumpen) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$c_{p,m}$  mittlere spezifische Wärmekapazität des flüssigen Arbeitsmediums in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

**2–3: isobare Wärmezufuhr:**

$$q_{\text{zu}} = \Delta h_{23} = h_3 - h_2 \quad (9.150)$$

$q_{\text{zu}}$  spezifische Wärmezufuhr in den Prozess in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{23}$  Änderung der spezifischen Enthalpie des Arbeitsmediums zwischen den Zuständen 2 und 3 (Wärmezufuhr) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_2$  spezifische Enthalpie im Zustand 2 (nach der Speisepumpe) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_3$  spezifische Enthalpie im Zustand 3 (Frischdampf) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Wobei sich  $q_{zu}$  im Einzelnen zusammensetzt aus:

$$q_{zu} = q_{vW} + q_V + q_{\dot{U}} \quad (9.151)$$

$q_{vW}$  spezifische Wärmezufuhr für die Vorwärmung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$q_V$  spezifische Wärmezufuhr für die Verdampfung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$q_{\dot{U}}$  spezifische Wärmezufuhr für die Überhitzung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Mit den spezifischen Teilwärmern:

$$q_{vW} = \Delta h_{22'} = h_{2'} - h_2 \quad (9.152)$$

$q_{vW}$  spezifische Wärmezufuhr für die Vorwärmung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{22'}$  Änderung der spezifischen Enthalpie zwischen den Zuständen 2 und 2' (Vorwärmung) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_2$  spezifische Enthalpie im Zustand 2 (nach der Speisepumpe) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{2'}$  spezifische Enthalpie am Verdampfungsbeginn in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$q_V = \Delta h_V = \Delta h_{2'2''} = h_{2''} - h_{2'} \quad (9.153)$$

$q_V$  spezifische Wärmezufuhr für die Verdampfung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_V$  spezifische Verdampfungsenthalpie in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{2'2''}$  Änderung der spezifischen Enthalpie zwischen den Zuständen 2' und 2'' (Verdampfung) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{2'}$  spezifische Enthalpie am Verdampfungsbeginn in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{2''}$  spezifische Enthalpie am Verdampfungsende in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$q_{\dot{U}} = \Delta h_{2''3} = h_3 - h_{2''} \quad (9.154)$$

$q_{\dot{U}}$  spezifische Wärmezufuhr für die Überhitzung in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{2''3}$  Änderung der spezifischen Enthalpie zwischen den Zuständen 2'' und 3 (Überhitzung) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{2''}$  spezifische Enthalpie am Verdampfungsende in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_3$  spezifische Enthalpie im Zustand 3 (Frischdampf) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

**3–4: isentrope** (reversibel adiabate) **Expansion:**

$$w_T = \Delta h_{34} = h_4 - h_3 \quad (9.155)$$

$w_T$  spezifische Turbinenarbeit in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\Delta h_{34}$  Änderung der spezifischen Enthalpie zwischen den Zuständen 3 und 4 (Expansion) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_3$  spezifische Enthalpie im Zustand 3 (Frischdampf) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_4$  spezifische Enthalpie im Zustand 4 (nach der Expansion) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

**4–1: isobare Wärmeabfuhr:**

$$q_{ab} = \Delta h_{41} = h_1 - h_4 \quad (9.156)$$



- $q_{ab}$  spezifische Wärmeabfuhr aus dem Prozess in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $\Delta h_{41}$  Änderung der spezifischen Enthalpie zwischen den Zuständen 4 und 1 (Wärmeabfuhr, Kondensation) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $h_1$  spezifische Enthalpie im Zustand 1 (vor der Speisepumpe) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $h_4$  spezifische Enthalpie im Zustand 4 (nach der Expansion) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Für diesen idealisierten Prozess lässt sich ein **thermischer Wirkungsgrad**  $\eta_{th}$  angeben:

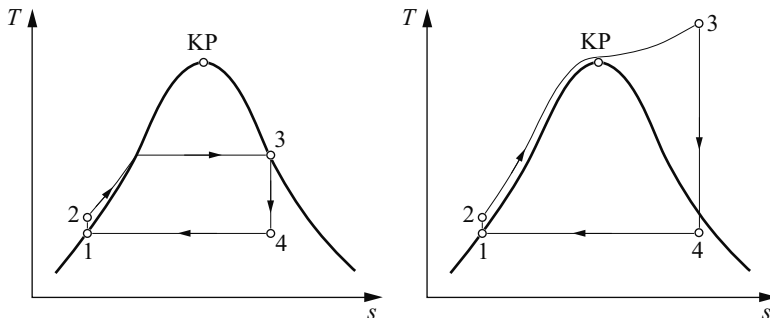
$$\eta_{th} = \frac{w_T - w_{SP}}{q_{zu}} = 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}} \tag{9.157}$$

- $w_T$  spezifische Turbinenarbeit in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $w_{SP}$  spezifische Speisepumpenarbeit (wird für die Berechnung des Wirkungsgrades oft vernachlässigt, da  $w_{SP} \ll w_T$ ) in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $q_{zu}$  spezifische Wärmezufuhr in den Prozess in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $q_{ab}$  spezifische Wärmeabfuhr aus dem Prozess in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Der so ermittelte Wirkungsgrad ist wesentlich kleiner als ein Carnot-Wirkungsgrad, gebildet aus  $T_3$  (maximale Temperatur der Wärmezuführung) und  $T_4$  (Temperatur der Wärmeabfuhr). Dies ist insbesondere mit der isobaren Wärmezufuhr, die bereits auf Kondensations-temperatur startet, statt der idealisierten isothermen Wärmezufuhr verbunden. Das führt dazu, dass ein Großteil der Wärme bei Temperaturen kleiner als  $T_3$  zugeführt wird.

Unter den idealisierten Dampfkraftprozessen sind **zwei Sonderfälle** zu beachten, die in Bild 9.3 dargestellt sind:

- Der **Sattdampfprozess** verzichtet auf eine Überhitzung des Dampfes, der Zustand 3 liegt maximal auf der Taulinie. Die Entspannung erfolgt von der Taulinie in den Nassdampfgebiet hinein.
- Beim **überkritischen Dampfkraftprozess** werden Frischdampfparameter gewählt, die oberhalb des kritischen Punktes liegen. Damit entfällt die Unterteilung der Wärmezufuhr in Vorwärmen, Verdampfen und Überhitzen. An diese Stelle tritt die stetige Zustandsänderung im überkritischen Bereich.



**Bild 9.3** Sattdampfprozess (links) und überkritischer Dampfkraftprozess (rechts) im  $T, s$ -Diagramm

### 9.2.1 Wirkungsgradsteigerung durch optimierte Prozessparameter

Untersucht man den Einfluss der Dampfungstände auf den Wirkungsgrad des Clausius-Rankine-Prozesses, so ergeben sich die folgenden Zusammenhänge.

Der **thermische Wirkungsgrad steigt**:

- mit steigender Frischdampf­temperatur (steigender Turbineneintrittstemperatur),
- und damit verbundenem steigendem Frischdampfdruck,
- mit sinkender Kondensationstemperatur, das heißt sinkendem Kondensatordruck.

Es besteht eine Analogie zum Carnot-Wirkungsgrad, dass eine hohe Temperatur der Wärme­zuführung und eine geringe Temperatur der Wärmeabführung zu einem steigenden Wirkungsgrad führen. Sowohl die Steigerung der Frischdampfparameter als auch die Senkung der Kondensationsparameter werden intensiv zur Optimierung von Dampfkraftanlagen genutzt.

Die Wirkungsgradsteigerung durch **Anhebung der Frischdampfparameter** ist dabei durch die wirtschaftlich zur Verfügung stehenden Werkstoffe begrenzt. Sowohl mit steigender Temperatur als auch mit steigendem Druck erhöhen sich die Anforderungen an die Werkstoffe, nicht nur in der Turbine, sondern auch im Dampferzeuger und allen anderen Hochdruckteilen. Deshalb sind die eingesetzten Frischdampfparameter häufig das Ergebnis einer Optimierung, die neben dem Wirkungsgrad auch Materialverfügbarkeit, Materialkosten und die Standzeiten der Bauteile sowie die heute neue und weiterhin zunehmende thermische Wechselbeanspruchung der Dampferzeuger wegen notwendig steigender Flexibilität infolge der Netzeinspeisung regenerativer Energiequellen berücksichtigt. Temperaturen von 650 °C und höher sowie Drücke von 300 bar und mehr sind heute in großen Kohlekraftwerken anzutreffen. Damit ist die Realisierung eines überkritischen Prozesses zum Beispiel mit einer speziellen Ausführung des Dampferzeugers verbunden. Für kleinere Einheiten sowie Anlagen, wie zum Beispiel Müllverbrennungsanlagen, bei denen der Kessel einem erhöhten korrosiven Angriff unterliegt, liegen die optimalen Frischdampfparameter viel niedriger.

Die **Senkung der Kondensationstemperatur** ist durch die Eigenschaften der Aggregatzustandsänderung Kondensation direkt mit der **Senkung des Kondensatordruckes** verbunden. Sie besitzt einen sehr starken Einfluss auf den Wirkungsgrad eines Dampfkraftprozesses. Allerdings ist die Senkung der Kondensationstemperatur – neben der Kondensatorauslegung – vor allem begrenzt durch das zur Verfügung stehende Kühlmedium, da die Wärmeabfuhr an die Umgebung gewährleistet werden muss. Dadurch sind Kraftwerke im Vorteil, die auf ein nahezu unbegrenztes Reservoir eines Kühlmediums auf niedriger Temperatur zurückgreifen können. Ein wichtiges Beispiel sind hier Dampfkraftwerksstandorte an den Küsten. Sie können Meerwasser nutzen, das in den gemäßigten Breiten ganzjährig schon in wenigen Metern Tiefe eine Temperatur wenige Grad über dem Gefrierpunkt des Wassers besitzt. Ebenso sind Standorte an Läufen großer und schnell fließender Flüsse interessant.

### 9.2.2 Wirkungsgradsteigerung durch Zwischenüberhitzung

Bei der Zwischenüberhitzung schließt sich an eine Teilentspannung des Dampfes in einer Hochdruckturbine (HD-Turbine) eine weitere Wärmezufuhr an, um anschließend die Entspannung in einer Niederdruckturbine (ND-Turbine) vorzunehmen. Der Prozess ist im Bild 9.4 dargestellt.

# Index

## A

abgestrahlter Wärmestrom 313  
absolute Feuchte 337, 339, 346  
Absorption 310  
adiabat 88, 102, 106, 242  
adiabate Verbrennungstemperatur 287–289,  
294  
Aggregatzustand 175, 228  
Ähnlichkeitskennzahl 306, 307, 419  
Ähnlichkeitstheorie 306  
allgemeine Wärmegleichung 81  
allgemeines Gasgesetz 73  
Ammoniak 236, 240, 437  
Arbeit 63, 112  
Arbeitsgas 129, 133, 140, 152  
arithmetische Mitteltemperatur 307, 322  
Asche 287  
Auslegung 320  
Ausströmen 244  
Ausströmgeschwindigkeit 245, 248  
Ausströmvorgang 247, 248, 253  
Austrittsgeschwindigkeit 244, 246  
Austrittsquerschnitt 245  
Avogadro-Konstante 24, 368

## B

Befeuchtung 344, 366  
Bezugssystem 34  
Bilanzgleichung 284  
bilanzielle Methode 320  
Bilanzierung 283  
Bildungsenthalpie 255  
Brenngasfeuchte 293  
Brennstoff 145, 152, 254, 262, 286  
Brennstoffanalyse 289  
Brennstoffverbrauch 158  
Brennstoffvorwärmung 286  
Brennwert 284, 289, 302

## C

Carnot-Prozess 122, 123, 226  
Carnot-Wirkungsgrad 33, 121–123  
charakteristische Abmessung 306, 308  
chemische Energie 254  
Clausius-Rankine-Prozess 206, 230

## D

Dalton'sches Gesetz 337  
Dampf 178, 310, 315  
Dampfanteil 178  
Dampfarten 178  
Dampferzeuger 206  
Dampfgehalt 202, 250  
Dampfkälteprozess 230, 236  
Dampfkessel 187  
Dampfkolbenmaschine 223  
Dampfkraftprozess 184, 205  
Dampfkraftwerk 113  
Dampfmaschine 223  
Dampfschraubenmotor 223  
Dampfspeicher 197  
Dampftafel 184  
Dampfturbine 205  
Desublimieren 203  
Dichte 25–27, 46, 76, 77, 340  
Dieselmotor 152, 155, 158  
Diesel-Prozess 152  
Diffusor 241, 243  
dimensionslose Kennzahl 306  
Dissipation 114, 116, 132  
Drossel 231, 241  
Drosselung 203, 242  
Druck 28–32, 343  
Druckerhöhung 207, 226  
Druckgefälle 247, 248, 253  
Druckunterschied 245  
Düse 241, 243

Düsenverlust 246  
 dynamische Viskosität 336

**E**

ebene Wand 315, 317, 324, 325, 332  
 effektive Leistung 149, 152, 154, 158  
 Einheiten 367  
 Einspritzverhältnis 153  
 Elementaranalyse 291  
 Elementarzusammensetzung 289  
 Emission 310  
 Energie 33, 62  
 Energiebilanz 66, 67, 81  
 Energiestrom 66  
 Energieübertragung 62, 63  
 Energieumwandlung 62, 115  
 Entfeuchten 344, 355  
 Enthalpie 68, 180, 184, 187, 193, 201, 203, 243, 341, 344  
 Enthalpiebilanz 68  
 Enthalpiestrom 283, 286, 287  
 Entropie 111, 115, 117, 121, 180, 225, 243  
 Entspannung 207, 212, 226, 231  
 Ericson-Prozess 161  
 Erstarren 176  
 Erstarrungswärme 176  
 erster Hauptsatz der Thermodynamik 65, 241  
 Erwärmen 344  
 erzwungene laminare Strömung 422, 427  
 erzwungene turbulente Strömung 425  
 Expansion 130, 209, 212, 228  
 Expansionsmaschine 207

**F**

Fallbeschleunigung 368  
 farbiger Körper 311  
 fester Brennstoff 262, 271, 278, 285, 291  
 feuchte Luft 258, 264, 337, 342, 347, 350, 355, 358, 366, 438  
 feuchtes Rauchgas 259  
 Feuerung 287  
 Feuerungstemperatur 299  
 Feuerungswärmeleistung 287  
 Feuerungswirkungsgrad 288

Fließprozess 241  
 flüssiger Brennstoff 262, 271, 281, 285  
 Flüssigkeitsanteil 178  
 Formelsammlung 419  
 Formelzeichen 367  
 Fourier'sches Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung 304  
 freie Strömung 307, 423, 427  
 Frischdampfparameter 207, 211  
 fühlbare Wärme 176

**G**

Gas-Dampf-Gemisch 337  
 Gase 425  
 gasförmiger Brennstoff 255, 268, 274, 283, 285, 292, 302  
 Gasgleichung 72  
 Gaskälteprozess 228, 232  
 Gaskonstante 46  
 Gasspeicher 74, 78  
 Gasturbine 113, 129, 134, 135  
 Gasturbinenprozess 138, 139  
 Gegenstromwärmeübertrager 322, 333  
 Gemischtemperatur 47, 347  
 Gesamtvolumen 47  
 Gesamtwirkungsgrad 165  
 Geschwindigkeitsbeiwert 245, 247  
 Gesetz von Amontons 84  
 Gesetz von Boyle und Mariotte 86  
 Gesetz von Dalton 45  
 Gesetz von Gay-Lussac 85  
 Gleichdruckprozess 152  
 Gleichraumprozess 140  
 Gleichstromwärmeübertrager 322, 333  
 gleichwertiger Durchmesser 308  
 Grashof-Zahl 306, 420  
 grauer Körper 311  
 Grenzschicht 306  
 Gütegrad 120, 143, 154, 158, 161, 164

**H**

$h, s$ -Diagramm 182, 200, 201, 203, 206, 243, 246, 250, 435  
 $h_{1+x}, x_W$ -Diagramm 342, 438  
 Heißdampf 179, 203

Heizfläche 335  
 Heizwert 255, 284, 289, 291, 292, 302, 334  
 Hochdruckturbine 211  
 Hohlkugelwand 305  
 Hubvolumen 174

**I**

ideale Kältemaschine 227  
 ideale Wärmepumpe 227  
 ideales Arbeitsgas 135, 139  
 Ideales Gas 48, 83, 108, 117, 228, 256, 268  
 ideales Gas 71, 78, 175, 243  
 ideales Gemisch 45  
 Idealprozess 155  
 Indikatorgramm 140  
 Indizes 372  
 indizierter Druck 145  
 indizierter thermischer Wirkungsgrad 158, 161  
 indizierter Wirkungsgrad 169  
 Industriefeuerung 267  
 inkompressible Flüssigkeit 106  
 innere Energie 62, 66, 78, 84, 112, 184  
 innere Reibung 114  
 innere Wärmeübertragung 133  
 irreversibel 113, 114, 116, 119  
 irreversibler Prozess 242  
 isenthalp 243  
 isentrop 88, 117, 118  
 isentrope Verdichtung 161  
 Isentropenexponent 79, 89, 132, 133, 164  
 isobar 85, 94, 96, 101, 105, 106, 108, 118  
 isochor 84, 93, 96, 105, 117  
 isotherm 86, 98, 100, 106, 118

**J**

Joule-Prozess 129, 133, 228, 232  
 Joule-Thomson-Effekt 243

**K**

Kachelofen 336  
 Kältemaschine 225, 230  
 Kältemittel 230, 422  
 kinetische Energie 311

Kolbengeschwindigkeit 149, 152  
 Kolbenmaschine 139  
 Kompression 162, 163  
 Kompressions-Kälteprozess 230  
 Kompressor 162, 169, 241  
 Kondensat 310  
 Kondensation 310, 345  
 Kondensationstemperatur 211  
 Kondensationswärme 178, 285  
 Kondensator 194, 207, 236, 323, 335  
 Kondensatordruck 206, 211  
 Kondensieren 178, 230  
 kondensierender Dampf 430  
 Konduktion 303, 304, 312  
 Konstanten 367  
 kontinuierlicher Prozess 71, 111  
 Kontraktionszahl 246, 247  
 Konvektion 303, 305, 306, 310, 312, 419, 424  
 Korngröße 264  
 Kraftwerk 323  
 Kreisprozess 111, 112, 128, 205, 206  
 Kreisprozessarbeit 113  
 Kreuzstromwärmeübertrager 322  
 kritischer Punkt 182  
 Kühlen 344, 355  
 Kühlung 165, 169  
 k-Wert 335

**L**

laminare Strömung 307  
 Längenausdehnung 108  
 Längenausdehnungskoeffizient 108  
 latente Wärme 176  
 Laval-Düse 250, 253  
 Leistung 64, 173  
 Leistungszahl 226, 229, 231  
 Liefergrad 141  
 lineare Interpolation 20  
 linksgängige Kreisprozesse 111, 175, 225, 241  
 Linksprozess 112, 225, 230  
 Luftbedarf 274  
 Luftmangel 267, 268, 271, 281, 283  
 Luftüberschuss 255, 257, 264, 269, 272, 274, 278, 288  
 Luftverhältnis 145, 257, 258, 261, 263, 264, 267, 268, 280, 283

Luftvorwärmung 286

Luftzahl 257, 299

**M**

Masse 24, 45, 77, 338

Masseanteil 43, 178

Massekonzentration 44

massespezifischer Heizwert 291

Massestrom 245, 248

mechanischer Wirkungsgrad 143, 154, 165

mehrschaliges Rohr 318

mehrschichtige Wand 317

mehrstufige Verdichtung 165, 169, 174

mehrstufiger Prozess 229

Messblende 245

Mindestrauchgasmenge 258, 264, 265

Mischen 177, 198, 345, 358, 366

Mischkondensator 196

Mischpunkt 345, 346

Mischungen aus Gasen 337

Mischungsdruck 48

Mischvorwärmer 192

mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  
321

mittlere Temperaturdifferenz 322

mittlere Wärmekapazität 81

molare Gaskonstante 72

molare Masse 263

molare Wärmekapazität 79

molares Normvolumen 369

molares Volumen 256

Molmasse 26

Molvolumen 26, 77, 78

Molvolumen im Normzustand 26

**N**

Nachheizen 355

Nassdampf 179, 186, 202, 231

Nebel 341, 343, 346, 366

Nebelbildung 338

Niederdruckturbine 211

Normaldruck 340

Normbedingung 34

Normzustand 75, 77, 256, 368–370

NTU-Verfahren 320

Nullter Hauptsatz 32

Nußelt-Gleichung 308, 419

Nußelt-Zahl 306, 308, 419, 421

Nutzarbeit 138

Nutzwärmestrom 287, 288

Nutzwirkungsgrad 143, 154

**O**

offener Kreisprozess 129

offenes System 67, 86, 111

ORC 223

Ottomotor 140

Otto-Prozess 140, 146

Oxidation 254

**P**

$\lg p, h$ -Diagramm 231, 232, 240, 437

Partialdruck 45, 337, 338

planparallele Wand 305

Plattenwärmeübertrager 323

polytrop 92, 104, 106, 118

Polytropenexponent 92

Prandtl-Zahl 306, 419

Propellerturbinen 135

Prozess 35

Prozessgröße 35, 64

Psychrometer 361

**Q**

quasistationär 89

quasistatisch 35

Quecksilbersäule 31

Querstromwärmeübertrager 322

**R**

Radiation 303, 310

Ramjet 135

Randmaßstab 343

Rauchgas 258, 268, 286, 345, 363

Rauchgasmenge 259, 265, 269, 272

Rauchgaszusammensetzung 259, 265, 270,  
272, 274, 278, 280, 283

Reaktionsgleichung 255, 262

reale effektive Leistung 144  
 Realgasverhalten 179  
 rechtsläufiger Kreisprozess 139, 161  
 Rechtsprozess 112  
 reduzierende Ofenatmosphäre 267  
 Reflexion 310  
 Regenerator 320  
 Rekuperator 320  
 relative Feuchte 338  
 reversibel 113, 116  
 Reynolds-Zahl 306, 307, 419  
 rigider Prozess 241  
 Rohrbündel 309, 426  
 Rohrbündelwärmeübertrager 323  
 Rohrwand 317, 325  
 Ruths-Speicher 197

## S

Sattdampf 179, 184, 187, 191, 192, 429  
 Sattdampfprozess 210  
 Sättigungsgrad 338  
 Sättigungslinie 344  
 Sättigungszustand 339, 341  
 scheinbare molare Masse 46, 78  
 Schmelzdruck 176  
 Schmelzen 176, 177  
 Schmelztemperatur 176  
 Schmelzwärme 176  
 Schornstein 101  
 schwarzer Körper 311  
 Schwitzwasser 333  
 Scramjet 135  
 Selbstzündung 152  
 Siededruck 178  
 Siedelinie 182  
 Sieden 178  
 Siedepunkt 178  
 Siederohr 189  
 Siedetemperatur 178  
 Speicherkapazität 197  
 Speisepumpe 207  
 Speisewasser 213  
 Speisewasservorwärmung 213  
 spezifische Arbeit 112  
 spezifische Enthalpie 68, 78, 180, 341, 346, 347  
 spezifische Entropie 117, 181  
 spezifische Gaskonstante 72, 76  
 spezifische innere Energie 181  
 spezifische Kompressionsarbeit 162  
 spezifische Kreisprozessarbeit 142, 153, 226  
 spezifische Nutzarbeit 130  
 spezifische Schmelzenthalpie 176  
 spezifische technische Arbeit 68, 162  
 spezifische Verbrennungsenthalpie 284, 290  
 spezifische Verdampfungsenthalpie 178, 180  
 spezifische Verdampfungswärme 178  
 spezifische Verschiebearbeit 162  
 spezifische Wärmekapazität 46, 78, 79, 107  
 spezifische Wärmeleistung 335  
 spezifischer Brennstoffverbrauch 144, 154  
 spezifischer Energiestrom 311  
 spezifischer Heizwert 284, 290  
 spezifisches Volumen 25, 26, 78, 179, 202, 339  
 Standardbedingungen 34, 284  
 stationär 35, 66  
 Staustrahltriebwerke 135  
 Stefan-Boltzmann-Gesetz 311  
 Stirling-Prozess 161  
 stöchiometrisches Rechnen 255  
 Stoffmenge 24, 26  
 Stoffmengenanteil 44, 45  
 Stoffmengenkonzentration 44  
 Stoffwerte 307  
 Strahlenspektrum 311  
 Strahler 311  
 Strahlpumpe 253  
 Strahltriebwerk 134  
 Strahlung 307, 310  
 Strahlungsaustausch 312  
 Strahlungskoeffizient 311, 312  
 Strahlungskoeffizient des Schwarzen Strahlers 367  
 Strahlungswärme 336  
 Strömung 241  
 Stufenzahl 174  
 Sublimieren 203  
 System 21, 23, 29, 62  
 Systemgrenze 112, 303

**T**

*T, s*-Diagramm 182, 206, 225, 232, 243, 436  
 Takt 139, 141  
 tatsächlicher Luftbedarf 257, 263  
 Taubildung 338  
 Taulinie 182  
 Taupunkt 334, 345, 350, 363  
 Taupunkttemperatur 350  
 technische Arbeit 67  
 Teilexpansion 212  
 Temperatur 32, 77, 78  
 Temperaturdifferenz 303  
 Temperaturfaktor 313  
 Temperatur-Heizflächen-Schaubild 321–323  
 theoretischer Luftbedarf 257, 263  
 theoretischer Sauerstoffbedarf 257, 263  
 thermische Zustandsgleichung 72  
 thermischer Wirkungsgrad 113, 131, 133, 143, 146, 154, 155, 210–212  
 Thermodynamik 15  
 thermodynamisches Gleichgewicht 23, 35  
 thermodynamisches System 32, 35  
 Transmission 310  
 Tripelpunkt 203  
 trocken gesättigter Dampf 179  
 trockene Luft 258, 264  
 trockenes Rauchgas 259  
 Trocknung 352  
 Trocknungsmittel 337  
 Trocknungstechnik 337  
 Tröpfchengröße 264  
 Turbine 207  
 Turbineneintrittstemperatur 132  
 turbulente Strömung 307, 421

**U**

überhitzter Dampf 179, 425  
 Überhitzung 201, 203, 207  
 überkritischer Dampfkraftprozess 210  
 überkritischer Zustand 182  
 Überprüfung 320  
 Übersättigung 341  
 Überschlagsgleichung 308  
 universelle (molare) Gaskonstante 369  
 Unterdruck 253

unterkühlter Dampfkälteprozess 240  
 Unterkühlung 231  
 unvollkommene Verbrennung 267  
 unvollständige Verbrennung 267

**V**

Verbrennung 129, 140, 141, 254, 283, 334  
 Verbrennungsenthalpie 255  
 Verbrennungsluft 286  
 Verbrennungsmotor 113, 140  
 Verbrennungsrechnung 152  
 Verdampfung 178, 207, 230, 231  
 Verdampfungswärme 178, 184  
 Verdichter 162, 165, 173  
 Verdichterleistung 164  
 Verdichtung 130, 207, 208, 228, 230, 366  
 Verdichtungsverhältnis 131, 133, 142, 165  
 Verdunstung 204, 338  
 Verdunstungskühlung 344  
 Vergasung 267  
 Vergleichsprozess 155  
 Verlustwärmestrom 287  
 Verschmutzung 332  
 Viertaktmotor 140, 144  
 vollkommene Verbrennung 257  
 vollständige Verbrennung 255, 257, 303  
 Volumen 25, 77  
 Volumenänderungsarbeit 63, 81, 84, 85, 88, 91  
 Volumenanteil 44, 45  
 Volumenausdehnung 107, 108  
 Volumenausdehnungskoeffizient 108  
 volumenspezifischer Heizwert 291  
 Volumenstrom 203  
 Vortriebskraft 134  
 Vorwärmung 207  
 Vorzeichenfestlegungen 64, 66

**W**

Wandtemperatur 307, 333  
 Wärme 64, 86, 88, 92, 112  
 Wärmeabfuhr 209, 228  
 Wärmeabgabe 226, 230, 343  
 Wärmeaufnahme 226, 343  
 Wärmedämmung 332, 333



- Wärmedehnung 107  
Wärmedurchgang 314, 315, 317, 325, 329, 334  
Wärmedurchgangskoeffizient 308, 314, 315, 317, 318, 324, 332, 333  
Wärmedurchgangswiderstand 314, 316  
Wärmedurchlässigkeit 316  
Wärmeinhalt 68  
Wärmekapazität 36, 82  
Wärmeleistung 334, 336  
Wärmeleitung 303, 304, 315, 316  
Wärmemenge 304  
Wärmemitführung 305  
Wärmepumpe 225, 227, 230  
Wärmestrahlung 303, 310  
Wärmestrom 64, 283, 304, 314, 315, 317, 319, 321, 333  
Wärmestromdichte 304, 305  
Wärmetransport 116, 303  
Wärmeübergang 315, 316, 329, 419  
Wärmeübergangskoeffizient 306–308, 310, 313, 334, 335, 421  
Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung 314  
Wärmeübertrager 191, 192, 194, 287, 303, 320, 323  
Wärmeübertragerfläche 319  
Wärmeübertragung 88, 303, 304  
Wärmezufuhr 208, 212, 228  
Wasser 429  
Wasserdampf 250, 324, 325, 333, 343, 366, 435, 436  
Wassereinspritzung 193  
Wassergehalt 343  
Wassersäule 29, 31  
weißer Körper 311  
Wellenlänge 310  
Wirkungsgrad 119, 120, 133, 146
- Z**
- Zeiger 374  
Zustand 21  
Zustandsänderung 35, 71, 78, 83–85, 87, 88, 92, 106, 108, 111, 117, 175, 182, 205, 225, 303, 337, 343  
Zustandsgrößen 24, 33, 66, 73, 115, 347  
Zuströmgeschwindigkeit 244  
Zweitaktmotor 140, 144  
zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 111, 114, 120, 128, 205, 225, 303  
Zwischenerhitzung 133  
Zwischenkühlung 133, 165, 229  
Zwischenüberhitzer 212  
Zwischenüberhitzung 211  
Zylinderdruck 146  
Zylinderwand 305