
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Formelzeichen und Einheiten	11
Einleitung	13
1 Physikalisch-wärmetechnische Grundlagen	15
1.1 Wärmedehnung fester, flüssiger, gasförmiger Stoffe	15
1.1.1 Wärmedehnung fester Stoffe	15
1.1.2 Wärmeausdehnung bei Flüssigkeiten	17
1.1.3 Wärmeausdehnung der Gase	17
1.2 Zustandsgrößen der Gase	18
1.2.1 Volumen V , spez. Volumen v , Dichte ρ	18
1.2.2 Druck und Druckmessung	19
1.2.3 Temperatur, Temperaturmessung	23
1.3 Spezifische Wärmekapazität, Anwendungen	26
1.3.1 Wahre und mittlere spez. Wärmekapazität	27
1.3.2 Spezifische Wärmekapazitäten von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen	28
1.3.3 Anwendung: Mischungstemperatur	28
1.3.4 Schmelzen und Verdampfen	29
1.4 Gasgesetze; Zustandsgleichung der Gase	31
1.4.1 Gasgesetz von BOYLE-MARIOTTE	31
1.4.2 Gasgesetz von GAY-LUSSAC	32
1.4.3 Allgemeine Zustandsgleichung der Gase	33
1.4.4 Avogadro-Konstante, Masse-Begriff Mol, (molare Masse M) Molvolumen V_{Mn} universelle Gaskonstante R	36
1.5 Wärme und Arbeit	38
1.5.1 1. Hauptsatz der Wärmelehre	38
1.5.2 Mechanische und elektrische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt	39
1.5.3 Gase und Dämpfe; Umwandlung von Wärme in Arbeit	41
1.5.4 Raumänderungsarbeit W_v , Innere Energie U , Wärme Q	43
1.5.5 Technische Arbeit W_t , ROBERT MAYER, Enthalpie H	48
1.5.6 Spez. Wärmekapazitäten c_p, c_v , Molwärmern C_{mp}, C_{mv} ; $\kappa = c_p/c_v$	54
2 Zustandsänderungen der Gase und ihre Darstellung im p-v- und T-s-Diagramm	59
2.1 Isochore ZÄ (gleichbleibendes Volumen), Isovolum	59
2.2 Isobare ZÄ (gleichbleibender Druck)	61
2.3 Isotherme ZÄ (gleichbleibende Temperatur)	63
2.4 Adiabate (isentropen) ZÄ (ohne Wärmeeinwirkung)	65
2.5 Polytropische ZÄ	68
2.6 Entropie und das T - s -Diagramm (Wärmediagramm)	72
2.6.1 Entropie-Diagramme, allgemeine Grundlage	73
2.7 T - s -Diagramme der besprochenen ZÄ	75
2.7.1 Isochore ($v = \text{konst.}$) im T - s -Diagramm	75
2.7.2 Isobare ($p = \text{konst.}$) im T - s -Diagramm	76
2.7.3 Isotherme ($T = \text{konst.}$) im T - s -Diagramm	77
2.7.4 Isentrope (adiabatische) ZÄ im T - s -Diagramm	77
2.7.5 Polytropische ZÄ im T - s -Diagramm	78
2.8 T - s -Diagramm für Luft	80
2.8.1 Zusammenfassung zu einem T - s -Diagramm für Luft (Bild 2.26)	82
2.8.2 Beispiele zur Anwendung des T - s -Diagramms (Bild 2.28)	85

3 Kreisprozesse mit Maschinen	87
3.1 Kreisprozess mit einer Brennkraft-Kolbenmaschine; Beispiel	87
3.2 Vom 1. zum 2. Hauptsatz der Wärmelehre	90
3.2.1 2. Hauptsatz der Wärmelehre und der Carnotprozess	92
3.3 Abwärme und Frischwärme beim Kreisprozess; Bedeutung des Carnotprozesses; Kälteprozess	94
3.4 Ausgeführte Kraftmaschinen-Kreisprozesse	96
3.4.1 Ottoprozess für den Benzin-Kolbenmotor	96
3.4.2 Dieselprozess im p - v - und T - s -Diagramm	99
3.4.3 Seiligerprozess	101
3.4.4 «Einfacher offener» Gasturbinen-Kreisprozess (Jouleprozess)	102
3.5 Ausgeführte Arbeitsmaschinenprozesse	107
3.5.1 Kolbenverdichter	108
3.5.2 Mehrstufige Verdichtung	111
3.5.3 Kolbenverdichter im T - s -Diagramm	115
3.6 Linkslaufender Carnotprozess, Kältemaschine, Wärmepumpe	117
3.6.1 Linkslaufender Carnotprozess, Leistungsziffer ε	117
3.6.2 Kältemaschinenprozess	119
3.6.3 Wärmepumpe	122
3.7 Wirkliche Maschinen. Verluste, die über η_{th} zu η_e führen. Kolben- und Strömungsmaschinen	123
3.7.1 Umkehrbare und nicht umkehrbare (reversible und irreversible) Vorgänge	123
3.7.2 Verluste durch Reibung, Wärmeleitung, Drosselung	124
3.7.3 Zusätzliche Verluste bei der Energieumwandlung in Kolben- und Strömungsmaschinen	125
3.7.4 Kolbenmaschinen	126
3.7.5 Strömungsmaschinen	129
4 Wasserdampf	135
4.1 Zustandsgrößen p , t , v – von Wasser bis Heißdampf	136
4.2 h - p -Diagramm von Wasser bis Heißdampf	139
4.3 T - s - und h - s -Diagramm von Wasserdampf	142
4.4 ZÄ des Wasserdampfes; Beispiele	146
4.4.1 Isovolum (Isochore) ZÄ	146
4.4.2 Isobare ZÄ	147
4.4.3 Isothermische ZÄ	149
4.4.4 Isentrope und polytrope ZÄ; Zwischenüberhitzung	149
4.4.5 Drosselung	153
4.5 Clausius-Rankine-Dampfkraftprozess	154
4.5.1 Darstellung im T - s - und im h - s -Diagramm	154
4.5.2 Vorteile des Hochdruck-Hochtemperatur-Kreisprozesses	157
4.5.3 Dampfkraftprozess im Kernkraftwerk	157
4.6 Dampfturbinen, Dampfkraftprozess, Kopplung von Kraft und Wärme	161
5 Wirkungsgradverbesserungen durch Kreislaufkombinationen	165
5.1 Vergleich verschiedener Prozesse	165
5.1.1 Gasturbinenprozess (Jouleprozess)	165
5.1.2 Dampfturbinenprozess (Rankineprozess)	166
5.2 Gas- u. Dampfturbinenprozess (GuD-Prozess) (Kombination von Joule- und Rankineprozess)	167
5.3 Joule-Ericsson-Rankineprozess	170
5.4 2-fach-Dampfprozess (2-fach-Rankineprozess)	173
5.5 Organic-Rankine-Prozess (ORC-Prozess)	173
6 Wärmeerzeugung	177
6.1 Verbrennung	177
6.1.1 Verbrennungsreaktionen	177
6.1.2 Feste Brennstoffe und Heizöl	179
6.1.3 Brenngase	183
6.1.4 Rauchgasdaten	185
6.1.5 Verbrennungstemperatur	186

6.2 Elektrischer Strom	191
6.2.1 Elektroerhitzer in Behälterbauweise	191
6.2.2 Elektroerhitzer mit Rohrsystem	192
6.2.3 Heizelemente	192
6.3 Solarstrahlung	193
6.4 Erdwärme	194
7 Grundlagen der Wärmeübertragung	195
7.1 Wärmeleitung	195
7.2 Konvektion	196
7.3 Wärmestrahlung	199
7.4 Strahlungsaustausch	200
7.5 Wärmedurchgang	201
7.6 Wärmetauscher	202
7.6.1 Basisgleichung	202
7.6.2 Nachrechnung der Austrittstemperaturen bei vorhandenem Wärmetauscher	204
7.6.3 Wärmetauscher Wirkungsgrad η_{WT}	204
Anhang	207
Tabelle A1 Umrechnung für Druckeinheiten	207
Tabelle A2 $\alpha_{m t}$, Werte metallischer Werkstoffe in K^{-1}	207
Tabelle A3 Mittlere spez. Wärmekapazität c_m metallischer Werkstoffe in $kJ/kg\ K$ zwischen $0\ ^\circ C$ und $t\ ^\circ C$	207
Tabelle A4 Spez. Wärmekapazität von Flüssigkeiten bei Raumtemperatur	207
Tabelle A5 Schmelztemperatur und -wärme, Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie für einige feste Körper und Flüssigkeiten. Die Werte bei Flüssigkeiten gelten unter 1 bar Druck	207
Tabelle A6 Siedetemperatur und Verdampfungsenthalpie von Wasser, abhängig vom Druck	208
Tabelle A7 Einige Stoffwerte von Gasen	208
Tabelle A8 Realgasfaktor $Z = p \cdot v / R_i \cdot T$ für Luft	208
Tabelle A9a Beziehungen zwischen mechanischer, thermischer, elektrischer Arbeit	209
Tabelle A9b Beziehungen mechanischer, thermischer, elektrischer Leistung	209
Tabelle A10 c_{pm} -Werte für Gase in $kJ/kg\ K = c_{pm} _0^t\ ^\circ C$	209
Tabelle A11 Polytrope ZÄ von Gasen	210
Tabelle A12a Wasserdampf tafel, Sättigungszustand (Drucktafel)	210
Tabelle A12b Wasserdampf tafel, überhitzter Dampf	211
Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen	215
Literaturverzeichnis	219
Stichwortverzeichnis	221

Formelzeichen und Einheiten

Die nachfolgenden wichtigsten Zeichen werden nach Möglichkeit grundsätzlich angewendet, wobei Abweichungen von diesen Formelzeichen jeweils bei den entsprechenden Gleichungen oder Bildern genannt sind. Nach Möglichkeit wurde versucht, die in den technischen Regelwerken bereits eingeführten Zeichen zu verwenden.

Formelzeichen	SI-Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung, allg.
A	m^2, cm^2	Fläche, Strömungsquerschnitt
c	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität $c = C/m$
c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
C_m	$\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$	molare Wärmekapazität
C_{mp}	$\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$	molare Wärmekapazität bei konstantem Druck
C_{mv}	$\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$	molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen
D	m, mm	Durchmesser
E	J	Energie
F	N	Kraft, Umfangskraft
F_G	N	Gewichtskraft
g	m/s^2	örtliche Fallbeschleunigung
G	N	Gewichtskraft
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom, Massendurchsatz
M	kg/kmol	stoffmengenbezogene molare Masse
n	–	Index für Normalzustand $p = 1,0132 \text{ bar}, t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
n	1	Polytrophenexponent
n	$\text{s}^{-1}; \text{min}^{-1}$	Drehzahl, Umdrehungsfrequenz
p	$\text{Pa}; \text{N}/\text{m}^2$	Druck (Tafel im Anhang)
p_{abs}	$\text{Pa}; \text{N}/\text{m}^2$	absoluter Druck
p_{amb}	$\text{Pa}; \text{N}/\text{m}^2$	umgebender Atmosphärendruck (Abschnitt 1.2.2)
p_e	$\text{Pa}; \text{N}/\text{m}^2$	atm. Druckdifferenz, Überdruck ($p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$)
P	W	Leistung
q	J/kg	spezifische Wärmemenge
Q	J	Wärme, Wärmemenge
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	$\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$	universelle Gaskonstante
R_i	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	individuelle Gaskonstante
s	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Entropie
S	J/K	Entropie
t, ϑ	$^\circ\text{C}$	Celsius-Temperatur; $t = T - T_0$; ϑ als Ausweichzeichen, wenn Zusammentreffen mit t für die Zeit
T, Θ	K	Temperatur, thermodynamische Temperatur
ΔT	K	$= \Delta t = \Delta \vartheta$, Temperaturdifferenz Δt auch in $^\circ\text{C}$
u	m/s	Geschwindigkeit, Umfangsgeschwindigkeit
u	J/kg	spezifische Innere Energie
U	J	Innere Energie
v	m^3/kg	spezifisches Volumen; $v = V/m$
V	m^3	Volumen
V_M	m^3/kmol	stoffbezogenes (molares) Volumen
V_{Mn}	m^3/kmol	s.o, aber Normvolumen
w_r	J/kg	spezifische Raumänderungsarbeit
W_r	J	Raumänderungsarbeit
w_t	J/kg	spezifische technische Arbeit

12 Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	SI-Einheit	Bedeutung
W_t	J	technische Arbeit
x	1	Dampfgehalt im Nassdampf, kg/kg
y	J/kg	spezifische Energie, spezifische Arbeit
z	–	Stufenzahl bei mehrstufiger Maschine
α, α_1	K ⁻¹	(thermischer) Längenausdehnungskoeffizient
α_v, γ	K ⁻¹	(thermischer) Volumenausdehnungskoeffizient
γ_{Qs}	K ⁻¹	Raumausdehnungskoeffizient von Quecksilber
ε	1	Dehnung, Verdichtungsverhältnis, Leistungszahl (Kälteprozess)
η	1	Wirkungsgrad, Nutzen/Aufwand
κ	1	Isentropenexponent = c_p/c_v
λ	–	Liefergrad (Verdichter)
π	1	Verdichtungsverhältnis (p_2/p_1); Gasturbine
ρ	kg/m ³	Dichte, volumenbezogene Masse $\rho = m/V$; $\rho = M/22,4$ bei 0 °C/1,013 ... bar
σ	N/mm ²	Spannung
φ	1	Volldruck- oder Einspritzverhältnis (Dieselprozess)
ζ	1	Drucksteigerungsbeiwert (Seiligerprozess)
Ψ	1	Einspritzverhältnis (Seiligerprozess)

Einleitung

Die «Technische Wärmelehre» geht aus von realen Grundlagen der allgemeinen Experimentalphysik.

Die Größen Volumen, Druck, Temperatur sind für die Anwendung im technischen Bereich festgelegt. Darüber kommt man zur Zustandsgleichung der Gase. Durchgerechnete Beispiele führen zu weitergehenden Begriffen und über das Mol zu den beiden Gaskonstanten.

Der «1. Hauptsatz der Wärmelehre» bestätigt die Gleichheit von Wärme, Arbeit und elektrischer Energie. Daraus erhält man die Begriffe «Raumänderungsarbeit», «Innere Energie» und «Technische Arbeit», Enthalpie. Sie kommen aus den Erkenntnissen von ROBERT MAYER, werden gestützt von den spez. Wärmekapazitäten c_v und c_p der Gase.

Mit Beispielen, Hervorhebungen, Diagrammen kommt man über die Zustandsänderungen der Gase zur Darstellung der «Arbeit» und mit Hilfe des Entropiebegriffes zu der beim Arbeitsvorgang mitwirkenden «Wärme».

Der nächste Hauptabschnitt behandelt bereits einen verlustlos arbeitenden Kreisprozess, mit dem über Maschinen fortlaufend Wärmeenergie in Arbeit umgewandelt werden soll. Ein Blick auf das Indikator diagramm eines «wirklichen» Prozesses führt zur Erörterung der Wirkungsgradfrage. Anschließend wird der Carnotprozess, wenn auch als praktisch nicht durchführbarer Idealprozess, behandelt. Danach folgt der «2. Hauptsatz der Wärmelehre» von CLAUSIUS mit dem Hinweis auf den unvermeidlichen Abwärmeverlust bei Maschinenprozessen. Der Enthalpiebegriff wird erweitert, die Temperatur als wichtiges Kennzeichen für den Wärmewert bestätigt, auf die Möglichkeit, Kälte aus Arbeit zu gewinnen, hingewiesen.

Die «Kreisprozesse» der Otto- und Dieselmotoren, der Gasturbinenprozess, der ein- und mehrstufige Verdichterprozess, Kältemaschine und Wärmepumpe sind mit Zahlenwerten der praktischen Anwendung als verlustlose, ideale Grundlagenprozesse durchgerechnet und dargestellt.

Seit der 6. Auflage folgt ein Abschnitt, der erklärt, wie man bei den hohen Drücken und

Temperaturen, die angewendet werden müssen, zur Berechnung der bisher noch nicht weiter angesprochenen «Verluste» kommt. Sie entstehen aus Vorgängen der Wärmeleitung, Reibung, Drosselung und bewirken, dass die Maschinenwirkungsgrade vom η_{th} -Wert aus bis zum η_e -Wert an der Kupplung abfallen.

Bis dahin ist hiervon nicht viel die Rede gewesen, um den Fortschritt der grundlegenden wichtigen Erklärungen nicht aufzuhalten oder zu stören.

Die Prozesse können sowohl mit Kolben- als auch mit Strömungsmaschinen durchgeführt werden. Je nach den Voraussetzungen – wie Leistung und Arbeitsmitteldurchsatz, Drehzahlen, Drücke und Temperaturen, Durchführbarkeit – muss entschieden werden, welche Bauart die besseren Möglichkeiten und den besseren Wirkungsgrad bringt und eingesetzt werden soll. Diese Fragen zu klären, ist nicht mehr Aufgabe der Technischen Wärmelehre. Um aber die Unterschiede in Aufbau, Wirkungsweise, Verlustquellen deutlich zeigen zu können, sind beide Bauarten an je einem typischen Beispiel und kurzen weiteren Hinweisen zur Einführung in dieses Gebiet besprochen.

Der «Wasserdampf» wird wie bisher von den Grundlagen bis zur Anwendung ausführlich behandelt. Die bekannten, für viele Berechnungen wichtigen Diagramme und Dampftafeln sind geblieben. Auch hier ist ein kurzer Abschnitt mit einem Ausschnitt aus dem h - s -Diagramm, ein Hinweis auf Wirkungsgrade der Dampfturbinen und Einsatzbereiche des Wasserdampfes bei der Versorgung mit Strom und Wärme angefügt.

Schließlich ist der stark in Anwendung und Ausbau begriffene GuD-Prozess (Gas- und Dampfprozess) in großen Zügen besprochen. Die Gasturbine mit Leistungen um 150 MW verarbeitet heute Spitzentemperaturen bis 1100 °C; Abgastemperaturen um 600 °C ermöglichen die Nachschaltung eines Dampfturbinen-Kondensationsprozesses mit 80 bar, 500...540 °C Frischdampfzustand.

Dabei werden erstmalig effektive Kuppelungswirkungsgrade von η_e über 50% erreicht.

1 Physikalisch-wärmetechnische Grundlagen

Zunächst werden einige wichtige, aus der Physik schon bekannte Grundlagen und Begriffe besprochen, wobei die Frage ihrer Anwendung auf technische Probleme im Vordergrund steht.

1.1 Wärmedehnung fester, flüssiger, gasförmiger Stoffe

Mit steigender Temperatur nimmt die Längen- und Volumenvergrößerung der Stoffe zu. Ausnahme: Wasser hat bei +4 °C sein kleinstes Volumen. Sowohl bei Abkühlung als auch bei Erwärmung von 4 °C aus nimmt sein Volumen zu.

Bei den *Gasen* muss außerdem bezüglich ihrer Wärmeausdehnung gesagt werden, dass ihr Volumen mit der Erwärmung nur dann zunimmt, wenn es sich gleichzeitig frei ausdehnen kann; bei einer Erwärmung in geschlossenem Raum steigt mit der Temperatur auch der Druck des Gases.

1.1.1 Wärmedehnung fester Stoffe

Eine Längenänderung $\Delta l = l_2 - l_1$ hängt verhältnismäßig von der Temperaturänderung ab.

Sie ist für die Stoffe verschieden, was durch den Längenausdehnungskoeffizienten α erfasst wird; dieser ist temperaturabhängig, weswegen ggf. ein Mittelwert α_m eingesetzt werden muss aus:

$$\alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\alpha_m \Big|_{t_0}^{t_2} \cdot t_2 - \alpha_m \Big|_{t_0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

mit:

- t_0 0 °C; allg. verabredete Bezugstemperatur
- t_1 Temperatur des Stoffes zu Beginn der Erwärmung
- t_2 Temperatur, auf die der Stoff erwärmt wird

Dann wird die Längenausdehnung:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

mit:

- l_2 Länge nach Erwärmung auf t_2
- l_1 Länge vor Erwärmung bei t_1

Einige mittlere Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_m \Big|_{t_0}^t$ sind im Anhang in Tabelle A2 zu finden.

Den temperaturabhängigen Verlauf von α -Werten zeigt Bild 1.1.

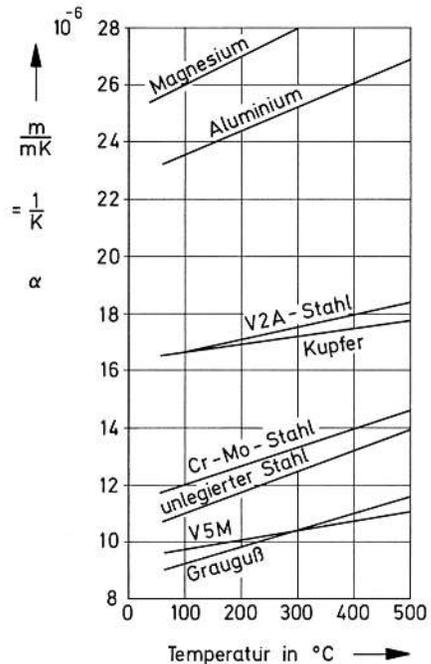


Bild 1.1 Linearer Längenausdehnungskoeffizient, abhängig von der Temperatur

Beispiel 1.1

Eine Brücke aus Stahl, $l = 300 \text{ m}$, unterliegt Temperaturen zwischen 35 °C und -15 °C. Eines der Auflager muss Spiel für die Aufnahme der Längenunterschiede möglich machen. Wie groß ist die maximale Längenänderung?

Lösung

$$\Delta l = \alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

Für $\alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ kann man bei diesen geringen Unterschieden $= 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ einsetzen. Somit:

$$\begin{aligned} \Delta l &= 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 300 \text{ m} \cdot 50 \text{ K} \\ &= 0,165 \text{ m} = 165 \text{ mm} \end{aligned}$$

Hinweise auf Wärmedehnungsprobleme

Ergebnisse von Längenmessungen mit Messwerkzeugen, deren α_m -Werte verschieden sind gegenüber der gemessenen Größe, bedürfen einer Korrektur.

- ! Heiße, gegeneinander bewegte Teile von Wärmekraft- und Arbeitsmaschinen, wie
- Kolben und Zylinder oder Labyrinth an Wellenstopfbuchsen, müssen ausreichen des Spiel erhalten.
- Rohrleitungen benötigen Festpunkte und Einrichtungen, mit denen Wärmedehnungen ausgeglichen werden.

Wärmespannung, Schrumpfspannung

Wird einem Körper die Möglichkeit zu freier Ausdehnung genommen, dann können unter dem Einfluss von Temperaturunterschieden Wärmespannungen entstehen. Diese Spannungen sind, solange sie unterhalb der Proportionalitätsgrenze bleiben, nach dem Hookeschen Gesetz berechenbar. Dabei ist:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

mit:

ε die Dehnung $= \Delta l/l$, die der Körper erfährt, wenn er unter Zug- oder Druckbeanspruchung kommt. Sind Wärmedehnungen der Grund, dann sind die Spannungszustände die gleichen.

E E-Modul des Stoffes

Somit gilt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l \cdot \alpha_m \cdot \Delta t}{l} = \alpha_m \cdot \Delta t$$

$$\sigma = \alpha_m \cdot (t_2 - t_1) \cdot E \quad \text{Wärmespannung}$$

Die Länge oder der Durchmesser eines unter Wärmedehnung kommenden Konstruktionsteiles spielt dabei also keine Rolle.

Beispiel 1.2

Unter welche Spannung kommt ein an beiden Enden fest eingespannter Stahlstab, der bei 20 °C spannungsfrei ist, wenn er gleichmäßig auf 90 °C erwärmt wird?

Lösung

$$\sigma = \alpha_m \cdot (t_2 - t_1) \cdot E$$

$$\alpha_m = 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{s. im Anhang Tabelle A2})$$

$$E = 2,15 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 70 \text{ K} \cdot 2,15 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ &= 166 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Schrumpfspannung

Die Eigenschaft der Wärmedehnung wird benutzt, um Teile durch Schrumpfen fest miteinander zu verbinden.

Beispiele: Radreifen von Eisenbahnfahrzeugen; der Innendurchmesser wird kleiner gemacht als der Sitzdurchmesser. Der Reifen wird soweit erwärmt, dass er sich über das Rad schieben lässt. Nach dem Erkalten sitzt der Reifen fest. Der Aluminiumzylinderkopf mit Innengewinde wird auf ca. 200 °C erwärmt und auf einen Stahlzylinder geschraubt, der auf -60 °C abgekühlt war.

Raumausdehnung fester Körper

Für die Raumausdehnung gilt analog

$$\Delta V = \gamma_m \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot V_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

mit:

$$\gamma_m \text{ Raumausdehnungskoeffizient} = 3 \cdot \alpha_m$$

Weiter gilt:

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha_m \Big|_{t_0}^{t_1} \cdot t_1)$$

wenn V_0 das Volumen bei 0 °C darstellt.

Beispiel 1.3

Ein Behälter aus Stahlblech mit 1 m Kantenlänge und 1 m³ Inhalt bei 0 °C wird auf 40 °C erwärmt.

Wie groß ist der neue Inhalt?

Lösung

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha_{m|t_0}^{t_1} \cdot t_1)$$

$$\alpha_{m|t_0}^{t_1} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 1/K$$

$$V_1 = 1 (1 + 33 \cdot 10^{-6} \cdot 40) = 1 \cdot \frac{1001320}{1000000} = 1,00132 \text{ m}^3$$

Der Inhalt beträgt 1,32 l mehr.
Siehe Beispiel 1.4 über die Raumausdehnung von Wasser.

$$V_1 = 1,0 \cdot \left(1 + \frac{190 \cdot 40}{10^6}\right) = 1,0 \cdot \left(1 + \frac{7600}{10^6}\right) = 1,0076 \text{ m}^3$$

Die Volumenzunahme beträgt 7,6 l.

Vergleich mit Beispiel 1.3: Die Volumenzunahme beim Stahlbehälter betrug bei gleicher Aufwärmung 1,32 l. Man kann also das Wasser im vollgefüllten Behälter nicht erwärmen, ohne dass der Behälter unter Innendruck kommt. Der Druck breitet sich nach allen Richtungen hin aus und verursacht schließlich einen Bruch an der schwächsten Stelle.

Bei Warmwasserheizungen müssen Sicherheitsüberläufe vorgesehen werden. Benzinfässer oder Kesselwagen dürfen nicht ganz vollgefüllt werden.

1.1.2 Wärmeausdehnung bei Flüssigkeiten

Flüssigkeiten behalten auch unter zunehmendem Druck ihr Volumen und lassen sich praktisch nicht zusammendrücken. Wasser nimmt unter 220 bar nur um 1% des Volumens ab.

Dagegen ist die Volumenzunahme bei Temperaturerhöhung wesentlich größer als bei festen Stoffen, z.T. temperaturabhängig.

Für die Volumenzunahme gilt wie oben:

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + \gamma_{m|t_0}^{t_1} \cdot t_1)$$

mit:
 $\gamma_{m|t_0}^{t_1}$ Raumausdehnungskoeffizient (1/K)

$\gamma_{m t_0}^{t_1}$ bei	0...50 °C	0...100 °C
für Wasser	= 236 · 10 ⁻⁶	433 · 10 ⁻⁶
für Quecksilber	= 182 · 10 ⁻⁶	188 · 10 ⁻⁶
für Benzol	= 1251 · 10 ⁻⁶	1349 · 10 ⁻⁶

Beispiel 1.4

1 m³ Wasser von 0 °C wird auf 40 °C erwärmt. Wie groß ist das neue Volumen?

Lösung

$$\gamma_{m,0-40} = 190 \cdot 10^{-6} \cdot 1/K$$

1.1.3 Wärmeausdehnung der Gase

Alle (idealen) Gase dehnen sich, wenn man ihnen Raum gibt, so dass sich der Druck, unter dem sie stehen, nicht ändern kann, je Grad Erwärmung ab 0 °C um 1/273,15 ihres Volumens aus.

Raumausdehnungskoeffizient der Gase:

$$\alpha_v = \frac{1 \text{ m}^3}{273,15 \text{ m}^3 \text{ K}}$$

Somit ist die Volumenzunahme, ausgehend von V₀ bei 0 °C, rund:

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + \alpha_v \cdot t_1) = V_0 \cdot \left(1 + \frac{t_1}{273 \text{ K}}\right) = V_0 \cdot \frac{273 \text{ K} + t_1}{273 \text{ K}}$$

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad \text{wobei } 273 \text{ K} + t_1 = T_1$$

Bei Erwärmung von T₀ auf T₂ gilt entsprechend:

$$V_2 = V_0 \cdot \frac{T_2}{T_0}$$

und weiter:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{bei konstantem Gasdruck}$$

Dieses Gas-Gesetz ist nach dem Entdecker GAY-LUSSAC (1778 bis 1850) benannt.

Beispiel 1.5

Ein Gasometer enthält 210 000 m³ Stadtgas, gemessen bei 2 °C Temperatur. Das Gas liegt unter dem Druck, den die abschließende, auf dem Gas schwimmende Scheibe verursacht; der Gasdruck kann sich bei Volumenänderungen nicht ändern, denn die Scheibe macht alle Bewegungen mit.

Wie viel m³ enthält der Gasometer bei einer Temperatur von 28 °C?

Lösung

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ hier } = \frac{273 + 28}{273 + 2} = 1,094$$

$$V_2 = 1,094 \cdot 210\,000 = 229\,854 \text{ m}^3$$

Das Ergebnis wäre vollkommen falsch, wenn man mit den Celsius-Temperaturen, also mit 28/2 = 14 umrechnen würde.

Gasdruck

Wenn das Gas erwärmt wird und der Raum, in dem es sich befindet, geschlossen bleibt, dann steigt der Gasdruck.

Die Druckerhöhung lässt sich mit den später behandelten Gasgesetzen berechnen.

1.2 Zustandsgrößen der Gase

3 Größen bestimmen den physikalisch messbaren «Zustand», in dem ein Gas sich befindet:

- Volumen, der Raum, den die betrachtete Gasmasse einnimmt,
- Druck, unter dem das Gas dabei steht,
- Temperatur, die im Gas herrscht.

Ändert man eine dieser Größen, dann ändern sich die beiden anderen auch: der «Zustand» des Gases ändert sich. Zunächst werden hier diese Größen definiert:

1.2.1 Volumen V, spez. Volumen v, Dichte ρ

Volumen V gemessen in m³.

Der Raum, der dem Gas zur Verfügung steht, wird von ihm vollständig ausgefüllt.

Spez. Volumen v gemessen in m³/kg

Das spez. Volumen v ist eine häufig vorkommende Zustandsgröße. Es gibt die Größe des Raumes an, die 1 kg eines Gases einnimmt.

Dichte ρ gemessen in kg/m³

Die Dichte gibt an, welche Gasmasse in kg sich in einem gegebenen Raum befindet.

Da Gase zusammendrückbar sind, da sie außerdem den gesamten zur Verfügung stehenden Raum ausfüllen, ändert sich bei entsprechender Einwirkung das spez. Volumen und die Dichte.

Beispiel 1.6

In einem mit verschiebbarem Kolben versehenen Zylinder von V = 1 m³ Inhalt befinden sich 2 kg Luft bei einer Raumtemperatur von 20 °C (Bild 1.2).

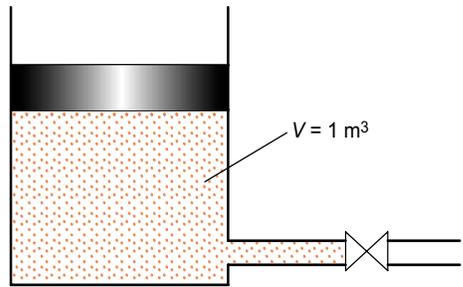


Bild 1.2
Beispiel zu Volumen, spez. Volumen, Dichte

a) Wie groß ist V in m³, v in m³/kg, ρ in kg/m³?

Lösung

Raum V = 1 m³ (gegeben)
 spez. Volumen v = 1 m³/2 kg = 0,5 m³/kg
 Dichte ρ = 2 kg/1 m³ = 2,0 kg/m³
 allgemeine Anmerkung: Der Druck, unter dem diese Luft steht, beträgt 1,7 bar bei Raumtemperatur 20 °C (wie später gezeigt werden wird).

b) Der Raum bleibt 1 m³. Die Luft wird durch Einwirken von außen oder innen auf 100 °C erwärmt.

Wie groß werden V in m³, v in m³/kg, ρ in kg/m³? Was wird vermutlich mit dem «Zustand» der Luft geschehen?

Lösung

Der Raum $V = 1 \text{ m}^3$ bleibt und ist gegeben.

Spez. Volumen $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ bleibt, weder Raum noch Masse ändern sich.

Dichte $\rho = 2,0 \text{ kg/m}^3$ bleibt aus dem gleichen Grund.

Der Gesamtzustand der Luft muss sich jedoch gegenüber a) geändert haben, weil die Temperatur höher ist. Und zwar wird sich der Druck erhöhen (auf $\approx 2,2 \text{ bar}$). Praktischer Fall: Autoreifen mit Druckerhöhung durch Erwärmen nach längerer Fahrt.

- c) Aus dem Raum (der, wie wir «sehen», unter Überdruck steht) werden durch kurzzeitiges Öffnen eines Ventiles $0,6 \text{ kg}$ Luft abgelassen; die Luft hat 20°C .

Wie groß werden V in m^3 , v in m^3/kg , ρ in kg/m^3 ? Was wird sich am «Zustand» der Luft vermutlich ändern?

Lösung

Der Raum $V = 1 \text{ m}^3$ bleibt gleich; die verbliebene Luft nimmt wieder den Gesamtraum ein.

Spez. Volumen $v = 1 \text{ m}^3/1,4 \text{ kg} = 0,712 \text{ m}^3/\text{kg}$ wird größer als bei a) und b).

Dichte $\rho = 1,4 \text{ kg}/1 \text{ m}^3 = 1,4 \text{ kg/m}^3$ wird kleiner.

Der Druck im Gas wird fallen (auf $\approx 1,2 \text{ bar}$). Praktischer Fall: Autoreifen nach Luftverlust.

- d) Das Ventil bleibt geschlossen. Der Zustand a) mit 2 kg Luft und $V = 1 \text{ m}^3$ Rauminhalt wird wiederhergestellt. Die Luft habe wieder Raumtemperatur von 20°C .
Jetzt wird der Kolben in den Zylinder gedrückt, so dass der Luft nur noch $0,7 \text{ m}^3$ Raum zur Verfügung stehen.

Wie groß werden V in m^3 , v in m^3/kg , ρ in kg/m^3 ? Was wird sich am «Zustand» der Luft vermutlich geändert haben?

Lösung

Der Raum $V = 0,7 \text{ m}^3$ gegeben.

Spez. Volumen $v = 0,7 \text{ m}^3/2 \text{ kg} = 0,35 \text{ m}^3/\text{kg}$ wird kleiner.

Dichte $\rho = 2 \text{ kg}/0,7 \text{ m}^3 = 2,86 \text{ kg/m}^3$ wird größer

Der Druck im Gas wird durch das Hineindrücken des Kolbens steigen (bei Raumtemperatur 20°C auf $\approx 2,4 \text{ bar}$).

Aus den Beispielen ist zu schließen, dass sich v und ρ mit der «Änderung des Zustandes» eines Gases ändern. Man kann weiter schließen, dass eine Änderung des Druckes oder der Temperatur oder beider gleichzeitig, den «Zustand» eines Gases ändern.

Man erkennt weiter, dass die Einwirkung von Wärme (Fall b) oder von mech. Arbeit (Fall d) den «Zustand» ändern.

Zusammenfassung der Begriffe

$V =$ Gesamttraum; $m =$ Gasmasse

$v = \frac{V}{m} =$ spez. Volumen des Gases

$\rho = \frac{m}{V}$ Dichte des Gases, auch $= \frac{1}{v}$

1.2.2 Druck und Druckmessung

Da Gase sich zusammendrücken lassen, wobei sich ihr Zustand, z.B. das spez. Volumen und die Dichte ändert, ist der Druck unter dem sie stehen, ebenfalls eine «Zustandsgröße».

Setzt man ein Gas unter Druck, dann wirkt dieser auf jeden Teil der irgendwie geformten Begrenzungsfläche (Bild 1.3, Druck ist Kraft geteilt durch senkrecht dazu gerichteter Fläche).

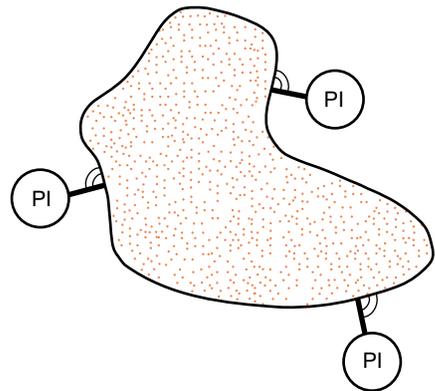


Bild 1.3 Druckwirkung bei Gasen

Bei Flüssigkeiten nimmt der Druck wegen des großen Gewichtseinflusses mit der Tiefe zu.

Bei Gasen ist dies auch der Fall, jedoch sind die Höhenunterschiede, die bei Problemen der TW (Techn. Wärmelehre) wirken, meist so klein, dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist.

Bei sehr großen Höhenunterschieden gilt aber die «barometrische Höhenformel»:

$$p_H = p_0 \cdot e^{-0,125 \cdot H}$$

mit:

- p_H Luftdruck in der Höhe H
- p_0 Luftdruck in Meereshöhe
- H Höhe in km

Für p_H und p_0 können beliebige, aber gleiche Einheiten eingesetzt werden.

Sie gilt nur, wenn $p_0 = 1,0132$ bar und $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (isotherme Atmosphäre).

Begriffe und Bezeichnungen

Die physikalische Größe Druck p ist:

$$p = \frac{F_N}{A}$$

mit:

- F_N senkrecht zu A gerichtete Kraft (Normalkraft)
- A gedrückte Fläche

In der Technik werden verschiedene Druckgrößen mit bestimmten, nach DIN 1314 genormten Bezeichnungen verwendet. Dazu gehören auch Differenzen zweier Drücke, die ebenfalls «Druck» genannt werden, siehe Bild 1.4.

p_{abs} absoluter Druck (Absolutdruck) ist der Druck gegenüber dem «Druck 0» im leeren Raum

Δp $p_1 - p_2 =$ Druckdifferenz

$p_{1,2}$ Differenzdruck, wenn dies selbst eine Messgröße ist, z.B. bei der Durchflussmessung mit Blende

p_{amb} Atmosphärendruck (ambiens, umgebend), z.B. mit Barometer gemessen, s. Bild 1.5

p_e Überdruck = $p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} =$ atmosphärische Druckdifferenz (excedens, überschreitend)

p_e ein positiver Wert, wenn $p_{\text{abs}} > p_{\text{amb}}$

p_e ein negativer Wert, wenn $p_{\text{abs}} < p_{\text{amb}}$

Den Unterdruckbereich kennzeichnen negative Werte des Überdrucks.

Der Bereich der Drücke unterhalb des Atmosphärendruckes wird auch «Vakuumbereich» genannt.

Einheiten

Die SI-Einheit des Druckes ist Pascal (Pa):

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Der 10. Teil des Megapascal (MPa) heißt Bar (bar):

$$1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ N/m}^2$$

Die Druckeinheit bar entspricht etwa dem Atmosphärendruck in Meereshöhe.

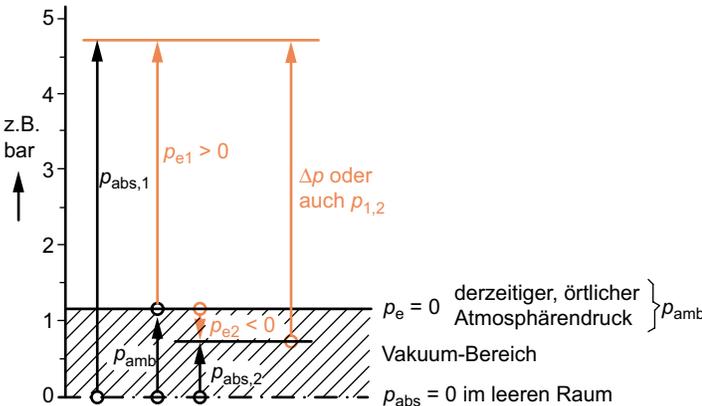


Bild 1.4 Druck: Begriffe und Bezeichnungen nach DIN 1314

Umrechnung nicht mehr anzuwendender Druckeinheiten in Pascal und Bar:

1 kp/cm ²	= 1 at = 98 066 Pa = 0,98066 bar (technische Atmosphäre)
1 atm	= 101 325 Pa = 1,01325 bar (physikalische Atmosphäre)
1 Torr	= 1 atm/760 = 133,32 Pa = 1,3332 mbar (besonderer Name)
1 mmHg	= 133,32 Pa = 1,3332 mbar = 1,3332 Hektopascal bei 0° C
1 mWS	= 9806,65 Pa = 98,0665 mbar = 98,0665 Hektopascal bei $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Zu diesen beiden letzten Druckeinheiten ist anzumerken, dass sie zur Messung kleiner Drücke wegen der erzielbaren Ablesegenauigkeit verwendet werden:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

mit

- ρ Dichte der Messflüssigkeit in kg/m³
- g Fallbeschleunigung in m/s², z.B. 9,81 m/s²
- h Höhe der Flüssigkeitssäule in m

Beispiel 1.7

Wie groß ist der Druck, den eine Wassersäule von $h = 10 \text{ m}$ Höhe, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ auf ihre Unterlage ausübt?

Lösung

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m} \\ &= 98\,100 \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}^2} = 98\,100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\ &= 98\,100 \text{ Pa} = 0,981 \text{ bar} \end{aligned}$$

Dabei spielt es keine Rolle, welchen Durchmesser beispielsweise ein Glasrohr hat, in dem sich das Wasser befindet. Je größer dessen Querschnitt, desto mehr Wassermasse, aber auch desto mehr gedrückte Fläche A ; Druck = F/A .

Hinweis: Bei genauen Messungen ist zu beachten, dass ρ temperaturabhängig ist und dass g örtlich verschieden sein kann.

Barometer

Um den absoluten Druck

p_{abs} aus $p_{\text{abs}} = p_e + p_{\text{amb}}$ bestimmen zu können (s. Bild 1.4), muss der Umgebungsdruck

(meist Atmosphärendruck) p_{amb} bekannt sein. Er wird mit dem Barometer gemessen.

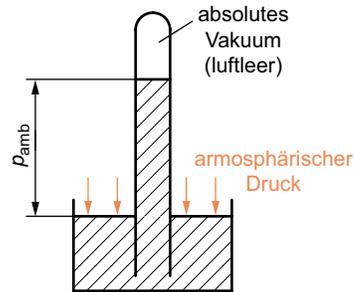


Bild 1.5 Barometer

Ein Barometer, Bild 1.5, besteht aus einem an einem Ende geschlossenen Glasrohr. Dieses wird zunächst mit der Messflüssigkeit (Quecksilber) so gefüllt, dass die Luft aus dem Glasrohr verdrängt wird. Dann wird das Rohr umgekehrt in das Auffanggefäß gestellt, wo keine Luft eindringen darf.

Die Quecksilbersäule hält das Gleichgewicht zum Umgebungsluftdruck. Bei der Anzeige ist die temperaturabhängige Wärmedehnung des Quecksilbers (und ggfs. des Glasrohres) zu berücksichtigen.

Beispiel 1.8

Das Barometer zeigt $p_{\text{amb}} = 745 \text{ mmHg}$ bei einer Raumtemperatur von $t_t = 20^\circ \text{C}$ an.

Wie groß ist der auf 0°C reduzierte absolute Luftdruck in bar?

Lösung

Wärmedehnung Glasrohr vernachlässigbar. Das ausgedehnte Hg-Volumen ist gleich der Längenzunahme der Hg-Säule:

$$V_t = V_0 \cdot (1 + \gamma_m \cdot t_t) = \text{Hg} \cdot \text{Volumen}$$

$$V_0 = V_2 = \frac{Q}{m \cdot c} + t_1$$

$$p_0 = \frac{745}{1 + 182 \cdot 10^{-6} \cdot 20} = \frac{745}{1,00364}$$

$$p_0 = 742,28 \text{ mmHg}$$

Umgerechnet mit 1 mmHg = 133,32 Pa wird

$$p_{\text{amb},0} = 742,3 \text{ mmHg} \cdot 133,32 \text{ Pa/mmHg}$$

$$p_{\text{amb},0} = 98963,4 \text{ Pa} = 0,990 \text{ bar}$$

Die Wärmedehnung des Glasrohres kann gegenüber der des Quecksilbers vernachlässigt werden.

Druckmessung mit Flüssigkeitssäulen

Handelt es sich um die Druckmessung von Gasen und Dämpfen, dann spielt es keine Rolle, an welcher Stelle eines Behälters oder einer Rohrleitung der Druckmessstutzen angebracht ist. Die Höhenlage der Messstelle hat hierbei, im Unterschied zur Druckmessung von Flüssigkeiten, keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Auf Bild 1.6 sind Druckmessstellen für Überdruck und für Unterdruck gezeichnet.

Als Sperrflüssigkeit (Messflüssigkeit) werden verwendet:

Wasser: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (genau bei + 4 °C)

Quecksilber: $\rho = 13\,550 \text{ kg/m}^3$ bei 20 °C

außerdem andere Flüssigkeiten, wenn die Größe des zu erwartenden Ausschlags h dies erfordert.

Beispiel 1.9

An einem Vakuummeter, ähnlich Bild 1.6 rechts, wird eine Höhe $h = 672,3 \text{ mmHg}$ an der mit Quecksilber gefüllten Messstrecke abgelesen. Der Barometerstand ist gleichzeitig $p_{\text{amb}} = 742,3 \text{ mmHg}$. Beide Werte seien auf 0 °C reduziert.

Wie groß ist der absolute Druck im Gefäß?

Wie viel % vom möglichen Druck beträgt das Vakuum?

Lösung siehe Bild 1.4

$$p_e = -672,3 \text{ mmHg}$$

$$p_{\text{amb}} = 742,3 \text{ mmHg}$$

$$p_{\text{abs}} = p_{\text{amb}} - p_e = 742,3 \text{ mmHg} - 672,3 \text{ mmHg} = 70 \text{ mmHg}$$

$$p_{\text{abs}} = 70 \text{ mmHg} \cdot 133,32 \text{ Pa/mmHg} = 9332 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{abs}} = 0,0933 \text{ bar}$$

In % ist das Vakuum

$$= (672,3 \text{ mmHg} / 742,3 \text{ mmHg}) \cdot 100 = 90,6\% \text{ vom möglichen Vakuum (100\% Vakuum} = 0 \text{ bar)}.$$

Schrägrohrdruckmesser (Bild 1.7)

Wenn kleine Überdrücke gemessen werden sollen (Abgasleitungen und Ähnliches), wird der Schrägrohrdruckmesser verwendet.

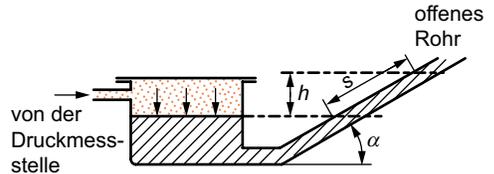


Bild 1.7 Schrägrohrdruckmesser

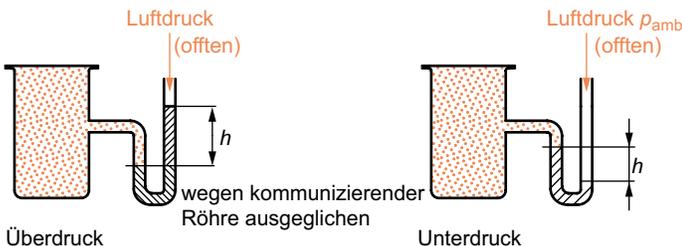


Bild 1.6 Flüssigkeitsdruckmesser

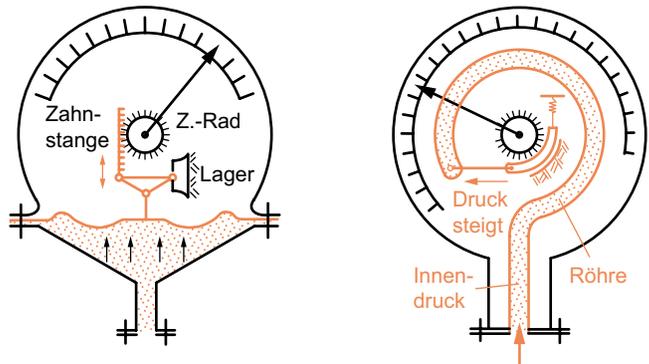


Bild 1.8
Plattenfeder- und Röhrenfedermanometer

Die Druckhöhe h ist aus der Ablesung der Länge s zu berechnen:

$$h = s \cdot \sin \alpha$$

Der Druck selbst ist dann, unter Berücksichtigung des Umgebungsdruckes p_{amb} und der Messflüssigkeit, entsprechend der Darstellung auf Bild 1.4, zu berechnen.

Der Durchmesser des Gefäßes links muss groß sein gegenüber dem Durchmesser der eigentlichen Messröhre. Anderenfalls muss eine Nullpunktkorrektur für h vorgenommen werden, wenn im Gefäß eine merkbare Spiegelabsenkung eintritt.

Die Ableseskala am Schrägrohr kann eine derartige Teilung erhalten, dass h direkt ablesbar ist.

Plattenfeder- und Röhrenfedermanometer

Der Druck wird mechanisch über elastische Platten (einfacher, billiger) oder über flachgedrückte Rohre (Bourdon-Rohr) aufgenommen und mit Hebel und Zahnstangenübersetzungen auf den Zeiger übertragen (Bild 1.8). Bei der Ausführung gibt es verschiedene Güteklassen, je nach dem Grad der verlangten Messgenauigkeit.

Alle diese Instrumente zeigen Überdrücke p_e im Sinn des Bildes 1.4 an. Bei Berechnungen im Bereich der Technischen Wärmelehre (TW) müssen die Absolutwerte p_{abs} eingesetzt werden, die von 0 bar an gelten, weil die Umgebungsluftdrücke p_{amb} von der Höhenlage abhängen und außerdem schwanken.

Ebenso gelten gedruckte Diagramme, die zu Berechnungen in der TW benutzt werden,

immer für die p_{abs} -Werte der Gase oder Dämpfe.

Beispiel 1.10

Ein Röhrenfedermanometer zeigt 5,8 bar bei einem Barometerstand $p_{\text{amb}} = 752 \text{ mmHg}$. Wie groß ist der absolute Druck in bar?

Lösung siehe Bild 1.4

$$p_{\text{abs}} = p_e + p_{\text{amb}}$$

$$p_e = 5,8 \text{ bar, gemessen}$$

$$p_{\text{amb}} = 752 \text{ mmHg} \cdot 133,3 \text{ Pa/mmHg}$$

$$p_{\text{amb}} = 100\,242 \text{ Pa} = 1,002 \text{ bar}$$

$$p_{\text{abs}} = 6,802 \text{ bar}$$

1.2.3 Temperatur, Temperaturmessung

Jede Änderung der Temperatur hat auch eine Änderung des Gaszustandes zur Folge.

Temperatur ist eine Größe, die zunächst nur als «kalt» oder «warm» unterschieden werden kann. Messgrößen und Einheiten sind aus der Beobachtung des Verhaltens kalter und warmer Körper hergeleitet worden wie

- Änderung des Volumens,
- Änderung des elektrischen Widerstandes,
- Änderung der Glühfarbe und andere.

Zur Festlegung einer Temperaturskala wurde zuerst die Wärmedehnung des Quecksilbers (Hg) zwischen den Fundamentalpunkten schmelzenden Eises und siedenden reinen Wassers, beides unter Atmosphärendruck in Meereshöhe mit $760 \text{ mmHg} = 1,0132 \text{ bar}$, als Grundlage gewählt. So entstand die Celsius-

skala mit 100 Teilstrichen zwischen diesen beiden Punkten. Sie wurde nach unten und oben erweitert, wobei sich Grenzen für den Verwendungsbereich ergeben, weil das Quecksilber bei $-38,8^\circ\text{C}$ fest wird und bei $+357^\circ\text{C}$ siedet und zu verdampfen beginnt; setzt man die Hg-Säule unter Stickstoff von hohem Druck, dann kann das Sieden bis ca. 700°C verhindert werden.

Andere Füllstoffe als Hg, wie Alkohol, zeigen Ungleichmäßigkeiten in der temperaturabhängigen Wärmedehnung; diese können durch Anpassen der Strichabstände auf der Skala oder durch Formgebung der Kapillare ausgeglichen werden.

Ein gleichbleibender Zusammenhang zwischen Volumen- und Temperaturänderung besteht dagegen bei allen Gasen. Unter konstant belassenem Druck dehnen sich alle «idealen» Gase je 1°C Erwärmung um $1/273,15$ des Volumens aus, das sie bei 0°C einnehmen. Die so hergestellte Temperaturskala bringt eine exakt lineare Unterteilung. Hierzu sei kurz vorweggenommen: der Begriff «ideales Gas» bedeutet, dass das Gas in seinem Verhalten den Gesetzen von GAY-LUSSAC und BOYLE-MARIOTTE exakt folgt und beim Abkühlen nicht flüssig wird.

Bei niedrigem Druck kommen Wasserstoff und Helium dem idealen Gas sehr nahe.

Zur eigentlichen Messung wird ein noch zu besprechendes Gasgesetz benutzt, wonach der Zusammenhang besteht:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{oder umgestellt} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

wenn ein Gas in geschlossenem Raum ($V = \text{konst.}$) erwärmt oder abgekühlt wird. Ein Vorteil ist die einfachere Messtechnik. Da hierbei wärmetechnische Gasgesetze angewendet werden, wird diese Temperatur nach DIN 1345 als «thermodynamische Temperatur» bezeichnet. Als Festpunkt dieser Skala ist statt des Eispunktes des Wassers bei 0°C der «Tripelpunkt» von reinem Wasser bei $0,01^\circ\text{C}$ gewählt worden; er bedeutet, dass bei dieser Temperatur und unter dem Druck von $6,11$ mbar Eis, Wasser und Wasserdampf gleichzeitig vorkommen. Mit Hilfe der Gasgesetze findet sich auch der Punkt, an welchem die absolute Temperatur 0 herrschen muss, wie folgt:

Kühlt man ein Gas unter 0°C weiter ab, dann wird sein Volumen immer kleiner. Der unterste Punkt einer Temperaturskala muss nach den Gasgesetzen bei -273°C liegen. Hierbei wäre das Volumen 0 , eine Abkühlung unter diese Temperatur ist nicht möglich.

Dort beginnt die «absolute Temperatur». Sie wird mit T bezeichnet, die SI-Einheit ist das «Kelvin», Einheitenzeichen K (LORD KELVIN, engl. Physiker 1824 bis 1907).

Temperaturangaben der «absoluten Skala» liegen um 273 Grad höher als die der Celsiuskala:

$$T = t + 273,15$$

Bei Angabe der Celsiusstemperatur t (auch θ) nach:

$$t = T - T_0 \quad \text{mit} \quad T_0 = 273,15 \text{ K}$$

wird nach DIN 1345 der Einheitenname «Grad Celsius» (Zeichen $^\circ\text{C}$) als besonderer Name für das «Kelvin» benutzt.

Zur Bezeichnung von Toleranzbereichen oder von Messunsicherheiten wird folgende Schreibweise vorgeschlagen:

- für Temperaturdifferenzen
 $\Delta T = \Delta t = (20,0 \pm 0,2) \text{ K}$
- für Celsiusstemperaturen
 $\Delta t = (20,0 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ (s. Bild 1.9).

Für die meisten Rechnungen in der TW genügt der abgerundete Wert $T_K = 273 \text{ K}$ für den Abstand des Eispunktes zum absoluten Nullpunkt.

Kurze Anwendungsbeispiele:

- a) $T = 320 \text{ K}$ entspricht
 $t = 320 \text{ K} - 273 \text{ K} = 47^\circ\text{C}$
- b) $T = 200 \text{ K}$ entspricht
 $t = 200 \text{ K} - 273 \text{ K} = -73^\circ\text{C}$
- c) $t = 20^\circ\text{C}$ ist beim Rechnen mit den Gasgesetzen als $T = 293 \text{ K}$ einzusetzen.

Bei der Rechnung mit anderen als Celsiusgraden oder absoluten Temperaturen, wie in englischsprachigen Ländern, wird die Fahrenheit- und die Rankine-Skala benutzt. Dort liegen die Nullpunkte der Skalen willkürlich und anders als bei der Celsius-Skala. Auf Bild 1.10

sind die Werte, die sich daraus ergeben, im Vergleich zum Eis- und Siedepunkt des Wassers (unter 1,0132 bar = 760 mmHg) eingetragen (FAHRENHEIT 1686 bis 1736; auf 9 Fahrenheitgrade kommen 5 Kelvingrade).

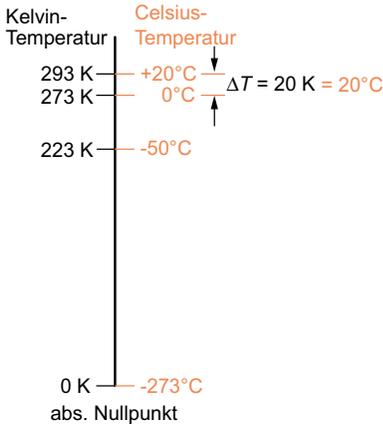


Bild 1.9 Bezeichnungen bei der Angabe von Temperaturen

Umrechnungen erfolgen mit den Zahlenwertgleichungen:

$$T_K = 273,15 + t_C = \frac{5}{9} T_R$$

$$T_R = 459,67 + t_F = 1,8 T_K$$

$$t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32) = T_K - 273,15$$

$$t_F = 1,8 t_C + 32 = T_R - 459,67$$

Beispiel 1.11

a) Die Celsius-Temperatur $t_C = 20^\circ\text{C}$ soll in K, °F, °R ausgedrückt werden.

Lösung a)

$$T_K = 273,15 + t_C = 273,15 + 20$$

$$= 293,15 \text{ K}$$

$$T_R = 1,8 \cdot T_K = 527,7^\circ\text{R}$$

$$t_F = 1,8 \cdot t_C + 32 = 1,8 \cdot 20 + 32 = 68^\circ\text{F}$$

b) Die Fahrenheit-Temperatur 110°F soll in °C und in K ausgedrückt werden.

Lösung b)

$$t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32) = \frac{5}{9} \cdot (110 - 32)$$

$$= 43,3^\circ\text{C}$$

$$T_K = 273,15 + 43,3 = 316,45 \text{ K}$$

Temperaturmessung

Hier sei kurz auf das Prinzip einiger möglicher, oft eingesetzter Messgeräte hingewiesen.

Ausdehnungsthermometer

Sie werden je nach Temperaturbereich mit Alkohol, Toluol, Pentan (niedrige Temperaturen), Quecksilber, oder Galliumlegierung gefüllt. Bei Temperaturmessung über 300°C muss die Kapillare eine CO_2 - oder N_2 -Füllung von 20...60 bar Druck erhalten, um Dampfbildung in der Messflüssigkeit zu verhindern. Eine Fernanzeige ist durch Verlängern der Kapillarleitung bis ca. 50 m möglich.

Für genaue Temperaturbestimmung muss die gemessene Temperatur um die Fadenkor-

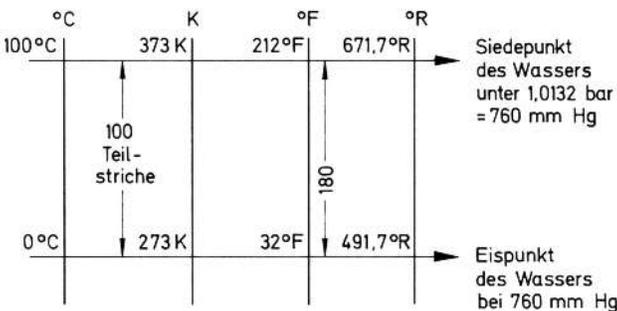


Bild 1.10 Celsius-, Kelvin-, Fahrenheit-, Rankine-Temperatureinheiten

rektur erhöht werden. Dabei ist die wahre Temperatur:

$$t = t_a + k \cdot n \cdot (t_a - t_F)$$

mit:

t_a abgelesene Temperatur

t_F Mitteltemperatur des herausragenden Fadens in °C

n Länge des herausragenden Fadens in Grad

k scheinbarer Ausdehnungskoeffizient der Thermometerflüssigkeit in 1/K:

- Pentangemisch, Alkohol, Toluol $1 \cdot 10^{-3}$ 1/K
- Quecksilber, Hg-Tallium $0,16 \cdot 10^{-3}$ 1/K
- Galliumlegierung $0,10 \cdot 10^{-3}$ 1/K

Beispiel 1.12

Mittels Quecksilberthermometer werden in einer Heißdampfleitung $t_a = 520$ °C gemessen (Bild 1.11). Der Hg-Faden ragt ab 350 °C aus der wärmeisolierten Tauchhülse heraus. Die nächste Umgebung des Thermometers hat eine Temperatur von $t_F = 43$ °C.

Wie groß ist die wahre Heißdampftemperatur t in °C?

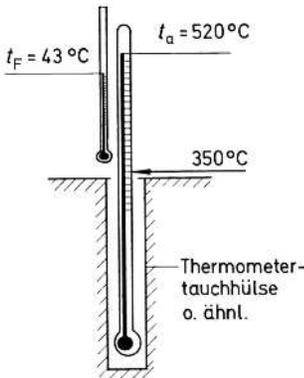


Bild 1.11
Berechnung der Fadenkorrektur; Beispiel

Lösung

$$t = t_a + k \cdot n \cdot (t_a - t_F)$$

$$t = 520 \text{ °C} + 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot (520 - 350) \cdot (520 - 43) \text{ °C}$$

$$t = 520 \text{ °C} + 13 \text{ °C} = 533 \text{ °C}$$

Je weiter das Thermometer aus der Tauchhülse herausragt, umso stärker kühlt der Faden ab, umso niedriger wird die Anzeige, umso höher die wahre Temperatur.

Widerstandsthermometer

Für Fernübertragung brauchbar. Der elektrische Widerstand einer Wicklung ändert sich mit der Temperatur. Bei niedriger Temperatur fließt mehr Strom, den ein Instrument anzeigt. Anwendungsbereich -220 °C bis $+850$ °C.

Thermoelemente

Sie bestehen aus zwei Drähten verschiedener Metalle, die an einem Ende verlötet sind. Die anderen Enden gehen zu einem Voltmeter. Je nach Metallkombination liegt der Messbereich bei -200 °C bis $+1500$ °C.

Strahlungspyrometer

Die Leuchtkraft eines glühenden Körpers wird zur Temperaturbestimmung benutzt. Anwendung in manchen verschiedenen Ausführungen von $+650$ °C... 3500 °C.

Schmelzpunkt-Pyrometer, Segerkegel
 $+600$... 2000 °C.

Temperaturmessfarben (Farbumschlag)
 $+40$ °C... 1350 °C.

1.3 Spezifische Wärmekapazität, Anwendungen

Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes gibt unter anderem Einblick in seine Fähigkeit, Wärme zu speichern.

Allgemein ist die spezifische Wärmekapazität c die Wärmemenge, die benötigt wird, um die Temperatur einer abgemessenen Menge eines Stoffes um 1 K zu erhöhen.

Sie wird bezogen auf beispielsweise:

- $m = 1$ kg und heißt dann c in kJ/kg K (auch c_p, c_v)
- $n = 1$ kmol, wobei C_m in kJ/kmol K
- $V = 1$ m³, wobei C in kJ/m³ K (C_p, C_v)

Bei Indizes p und v für gasförmige Stoffe sind bei deren Erwärmung:

$p = \text{konst.}$ bzw. $v = \text{konst.}$

Demnach werden zur Temperaturerhöhung von t_1 auf t_2 benötigt:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \text{ kJ}$$

für m kg eines Stoffes

$$q = c \cdot (t_2 - t_1) \text{ kJ/kg}$$

für 1 kg eines Stoffes

Durch Umstellen dieser Gleichung lässt sich die Temperatur t_2 errechnen:

$$t_2 = \frac{Q}{m \cdot c} + t_1$$

wenn die zugeführte Wärme, beispielsweise Reibungswärme bei einem Bremsvorgang, bekannt ist.

1.3.1 Wahre und mittlere spez. Wärmekapazität

Die spezifischen Wärmekapazitäten der verschiedenen Stoffe sind verschieden und nicht konstant. Sie sind mehr oder weniger temperaturabhängig und nehmen i.Allg. mit zunehmender Temperatur zu. Man unterscheidet daher:

c = wahre spez. Wärmekapazität, die aufzuwenden ist, um den Stoff, der eine beliebige Temperatur hat, um 1 K, also eine sehr kleine Temperaturdifferenz, aufzuwärmen (abzukühlen),

c_m = mittlere spez. Wärmekapazität, die eingesetzt wird, wenn man den Stoff um einen größeren Temperaturbetrag erwärmen will.

Die beiden Begriffe sind in Bild 1.12 erläutert. Die c - und c_m -Werte der Stoffe sind bekannt. Sie können Tabellen, auf die noch hingewiesen wird, entnommen werden.

Aus Tabellen kennt man die c_m -Werte zwischen t_2 und t_0 , wobei für t_0 meist 0°C gewählt ist. Dann wird in beliebigem Bereich:

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_m \Big|_{t_0}^{t_2} \cdot t_2 - c_m \Big|_{t_0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

Mittlere spez. Wärmekapazität bei Erwärmung von t_1 auf t_2

Diese allgemeine Gleichung gilt für die Berechnung aller Arten von spez. Wärmekapazitäten für feste, flüssige, gasförmige Stoffe.

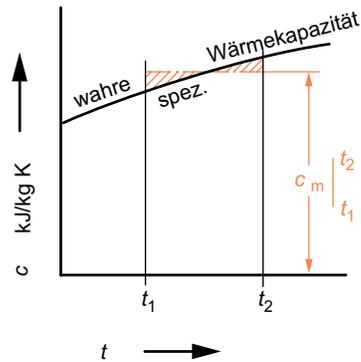
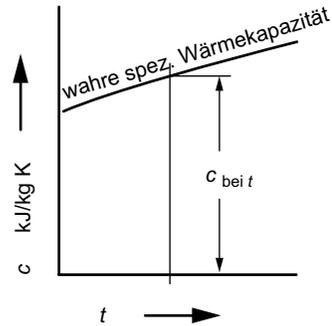


Bild 1.12 Erklärung der Begriffe c und c_m

Beispiel 1.13

Wie groß ist c für auf 350°C vorgewärmte Verbrennungsluft, die in einer Dampfkesselfeuerung bei konstantem Druck (daher c_{pm}) auf 1700°C gebracht wird?

Welchen Wärmestrom braucht man, um 1000 kg/h Luft zu wärmen?

Lösung

Aus Tabelle A10 (Anhang) entnommen:

$$c_{pm} \Big|_{t_0}^{t_2} = 1,144 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

interpoliert zwischen 1800°C und 1600°C

$$c_{pm} \Big|_{t_0}^{t_1} = 1,025 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

zwischen 400°C und 300°C

$$c_{\text{pm}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1,144 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1700 \text{ °C} - 1,025 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 350 \text{ °C}}{1700 \text{ °C} - 350 \text{ °C}}$$

$$c_{\text{pm}} \Big|_{t_1}^{t_2} = 1,175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Um 1000 kg/h Luft zu erwärmen, braucht man

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{\text{pm}} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\dot{Q} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (1700 \text{ °C} - 350 \text{ °C})$$

$$\dot{Q} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1350 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = 1586000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 1586 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q} = 1586 \frac{\text{MJ}}{3600 \text{ s}} = 0,349 \text{ MW}$$

(1 J/s = 1 W)

Temperaturen als 100 °C flüssig gehalten wird; die Werte sind in Dampftabellen, Tabelle A12a zu finden (Anhang).

Gase

Über die spezifische Wärmekapazität der Gase ist noch Ausführliches in späteren Abschnitten zu sagen.

Es ist zu unterscheiden, ob die Erwärmung oder Abkühlung so stattfindet:

- dass sich das Gas frei ausdehnen kann, bei konstantem Druck also, c_p oder c_{pmv}
- oder ob es sich im geschlossenen Raum befindet, so dass sich außer der Temperatur auch der Druck ändert, c_v oder c_{vm} .

Es sei hier nur kurz erwähnt, dass auch bei Gasen die c -Werte mit der Temperatur zunehmen, s. Tabelle A10 (Anhang).

Mehr in Abschnitt 1.5.6.

1.3.2 Spezifische Wärmekapazitäten von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen

Feste Stoffe

Die spezifische Wärmekapazität von festen Körpern und metallischen Werkstoffen nimmt mit der Temperatur zu. Dabei kommen in manchen Temperaturbereichen sprunghafte Änderungen der c -Werte vor, was durch innere Umwandlungen verursacht wird.

Für Berechnungen ist es daher notwendig, den genauen Verlauf der c - und c_m -Werte aus Werkstoffbüchern zu entnehmen, zumal auch die Legierungsbestandteile eine Rolle spielen. Die Zahlen von Tabelle A3 geben informativ die Anhaltswerte (Anhang).

Flüssigkeiten

Auch bei den Flüssigkeiten nehmen die spez. Wärmekapazitäten mit der Temperatur zu. Zur allgemeinen Orientierung hier nur einige Werte von Tabelle A4 (Anhang).

Die c -Werte sind höher als bei den Metallen. Sie sind auch vom Druck abhängig, unter dem die Flüssigkeit steht. Dies ist u.a. für Wasser von Interesse, weil es im Dampfkessel unter hohem Druck und dadurch bei höheren

1.3.3 Anwendung: Mischungstemperatur

Warme und kalte Stoffe sollen gemischt werden, ohne dass dabei Wärme an das aufnehmende Gefäß oder an die Umgebung verloren geht. Nach erfolgtem Wärmeaustausch stellt sich eine Mischungstemperatur ein.

Als Beispiele seien aufgeführt: Mischen von heißem und kaltem Wasser oder Abkühlen von heißem Stahl durch Eintauchen in ein Ölbad beim Härten.

Die Mischungstemperatur erhält man aus dem Wärmeaustausch, wobei der wärmere Stoff Wärme abgibt, die der kältere aufnimmt. Entscheidend sind hierbei nicht nur die Temperaturen, sondern auch die Stoffmengen und die spez. Wärmekapazitäten der Stoffe.

Mischungstemperatur berechnen aus:

a) Summe der thermischen Energie vorher = gesamte thermische Energie nachher

$$m_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot t_x = (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2) \cdot t_m$$

mit:

t_x unbekannte Temperatur des 2. Stoffes

t_m Temperatur nach Mischung

daraus:

$$t_x = \frac{(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2) \cdot t_m - m_1 \cdot c_1 \cdot t_1}{m_2 \cdot c_2}$$

$$t_x = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot (t_m - t_1)}{m_2 \cdot c_2} + t_m$$

Beispiel 1.14

In ein Bad von $m_1 = 30$ kg Öl, $c_1 = 1,7$ kJ/kg K, $t_1 = 20$ °C wird ein Stück Stahl, $m_2 = 6,2$ kg, $c_2 = 0,5$ kJ/kg K gelegt. Die Temperatur des Öl-bades steigt dadurch auf $t_m = 55$ °C.

Welche Temperatur hatte das Stahlstück vorher? Ist dementsprechend eine Korrektur des c_2 -Wertes erforderlich?

Lösung

$$t_x = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot (t_m - t_1)}{m_2 \cdot c_2} + t_m$$

$$t_x = \frac{30 \text{ kg} \cdot 1,7 \text{ kJ/kg K} \cdot (55^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{6,2 \text{ kg} \cdot 0,5 \text{ kJ/kg K}} + t_m$$

$$t_x = 576 + 55 = 631^\circ\text{C}$$

Die spez. Wärmekapazität von Stahl war mit $0,5$ kJ/kg K eingesetzt. Nach Tabelle A3 kommt für c_m von $0 \dots 500$ °C der Wert $0,55$ in Betracht. Da die Temperatur fast 650 °C betragen hat, sollte ein neuer Wert durch Extrapolieren (z.B. zeichnerisch) gesucht werden. Es sei $c_2 = 0,58$ eingesetzt. Dies ergibt:

$$t_x = 496 + 55 = 551^\circ\text{C}$$

also erheblich weniger.

Eine Neuschätzung für $t_x = 570$ °C würde bedeuten, dass $c_2 = 0,55$ richtig wäre. Tatsächlich ergibt sich damit:

$$t_x = 578^\circ\text{C}$$

Diese Annäherung wäre hier genau genug.

b) Mischungstemperatur t_m aus Wärmeaufnahme = Wärmeabgabe

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (t_m - t_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t_m)$$

Beispiel 1.15

$m_1 = 5$ kg Wasser von $t_1 = 17$ °C sollen durch Mischen mit m_2 kg Wasser von $t_2 = 80$ °C auf $t_m = 35$ °C erwärmt werden.

Wie viel Wasser von 80 °C ist erforderlich?

Lösung

Aufgenommene Energie:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (t_m - t_1) \quad \text{mit: } t_m = 35^\circ\text{C}$$

abgegebene Energie:

$$m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t_m) \quad \text{mit: } t_m = 35^\circ\text{C}$$

Gesucht: Wassermenge m_2

$$m_2 = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot (t_m - t_1)}{c_2 \cdot (t_2 - t_m)}$$

bekannt: $c_1 = c_2 = 4,2$ kJ/kg K (Tabelle A4)

$$m_2 = \frac{5 \text{ kg} \cdot 4,2 \text{ kJ/kg K} \cdot (35^\circ\text{C} - 17^\circ\text{C})}{4,2 \text{ kJ/kg K} \cdot (80^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C})}$$

$$= \frac{5 \cdot 8}{45} = 2 \text{ kg}$$

Es werden 2 kg Warmwasser von 80 °C gebraucht, und man erhält $m_1 + m_2 = 5 + 2 = 7$ kg Warmwasser von 35 °C.

Beispiel 1.16

Durch Mischen von Wasser von $t_1 = 15$ °C mit Wasser von $t_2 = 75$ °C sollen 10 kg Wasser von $t_m = 50$ °C bereitet werden.

Wie viel Wasser von 15 °C und von 75 °C ist erforderlich?

Lösung

Da die spez. Wärmekapazitäten gleich sind und sich herauskürzen, kann man ansetzen:

Wärmeabgabe = Wärmeaufnahme

$$m_2 \cdot (t_2 - t_1) = m_1 \cdot (t_m - t_1)$$

Dabei ist $m_1 + m_2 = 10$ kg

$$m_2 = (10 \text{ kg} - m_1 \text{ kg})$$

$$m_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot t_2 = (m_1 + m_2) \cdot t_m$$

$$m_1 \cdot t_1 + (10 - m_1) \cdot t_2 = 10 \cdot 50$$

$$m_1 = 250/60 = 4,17 \text{ kg Wasser von } 15^\circ\text{C}$$

$$\text{somit: } m_2 = (10 - 4,17)$$

$$= 5,83 \text{ kg Wasser von } 75^\circ\text{C}$$

ergeben 10 kg Wasser von 50 °C.

1.3.4 Schmelzen und Verdampfen

Schmelzen und Verdampfen sind besondere Vorgänge. Sowohl beim Schmelzen als auch während des Verdampfens bleibt die jeweilige Temperatur konstant, bis alle festen Teile flüssig bzw. alle flüssigen Teile verdampft sind. Eine allgemein gültige Darstellung siehe Bild 1.13.

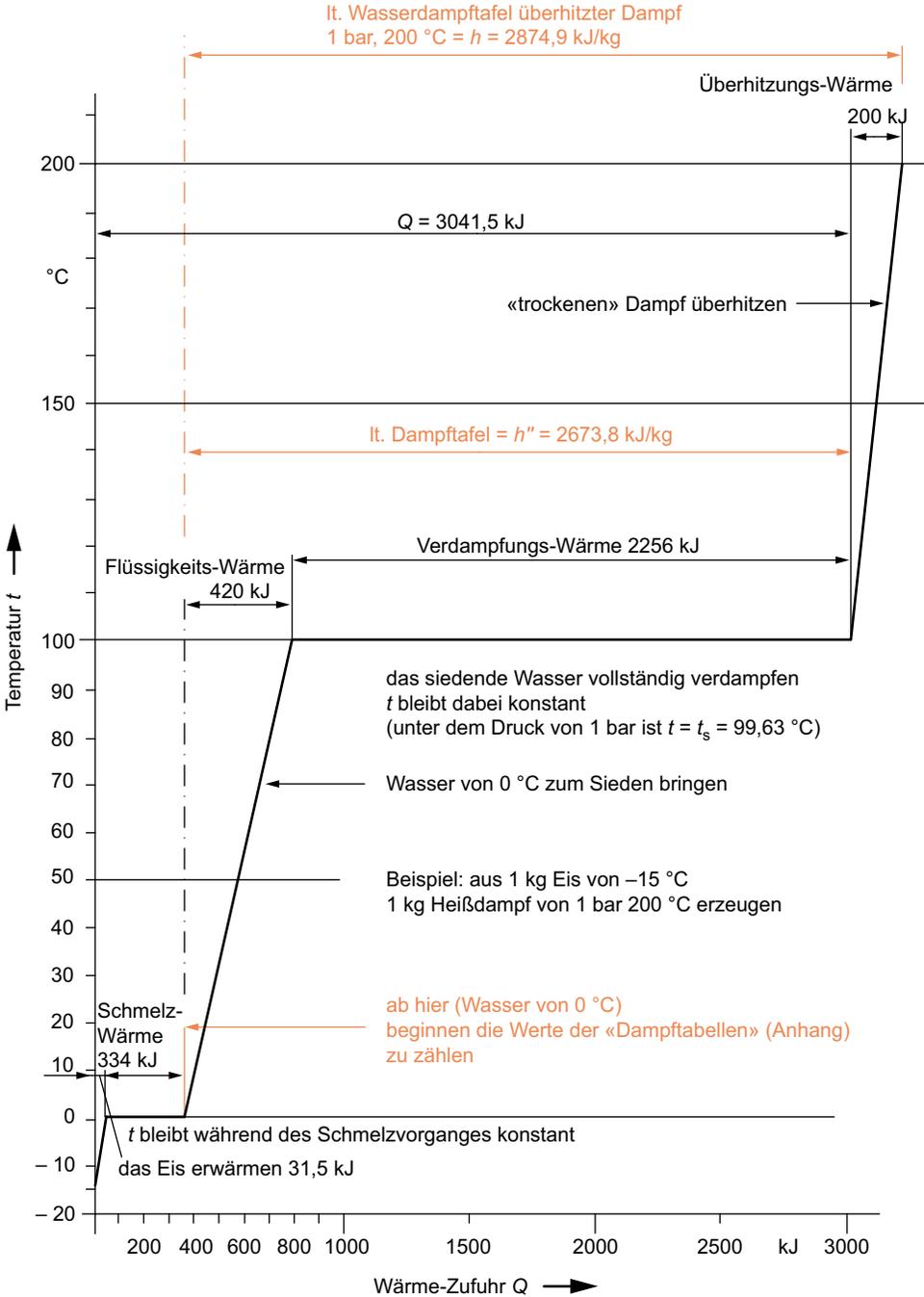


Bild 1.13 Temperaturverlauf beim Schmelz- und Verdampfungsvorgang und weiter bis zur Überhitzung; Beispiel Wasser und Wasserdampf