

---

# Warmteleer voor technici

---

A.J.M. van Kimmenaede

---

Tiende druk



Noordhoff Uitgevers



## **Warmteleer voor technici**





# Warmteleer voor technici

Ir. A.J.M. van Kimmenaede

Tiende druk

Noordhoff Uitgevers Groningen | Houten

Ontwerp omslag: Studio Frank en Lisa  
Omslagillustratie: Getty Images

Eventuele op- en aanmerkingen over deze of andere uitgaven kunt u richten aan:  
Noordhoff Uitgevers bv, Afdeling Hoger Onderwijs, Antwoordnummer 13, 9700 VB  
Groningen, e-mail: [info@noordhoff.nl](mailto:info@noordhoff.nl)

2 / 13

Deze uitgave is gedrukt op FSC-papier.

© 2010 Noordhoff Uitgevers bv Groningen/Houten, The Netherlands.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, [www.reprorecht.nl](http://www.reprorecht.nl)). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, [www.stichting-pro.nl](http://www.stichting-pro.nl)).

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

ISBN (ebook) 978-90-01-84298-7  
ISBN 978-90-01-78852-0  
NUR 961



## Woord vooraf

Dit is de tiende editie van *Warmteleer voor technici* van ir. Van Kimmenaede.

*Warmteleer voor technici* is in de loop der jaren hét standaardwerk voor het hbo geworden. Het behandelt een aantal fundamentele onderwerpen uit de klassieke thermodynamica. Na het inleidende hoofdstuk met algemene begrippen komen de volgende onderwerpen aan bod: de eerste hoofdwet en toestandsveranderingen in gesloten systemen; kringprocessen van Otto, Diesel, Carnot, Stirling en Joule; zuiger- en verdringermachines; de eerste hoofdwet voor open systemen; de tweede hoofdwet en entropie, toestandsdiagrammen (T-s, h-s en h-x); niet-omkeerbare toestandsveranderingen in open systemen; stoominstallaties; gasturbine-installaties; koelinstallaties en warmtepompen; exergie en anergie; exergie bij kringprocessen en open systemen, exergieverliezen.

Alle theorie en begrippen in deze uitgave worden helder en duidelijk uitgelegd. Uitgewerkte voorbeelden illustreren de theorie en laten zien hoe een en ander in de praktijk werkt. In het boek staan ongeveer 250 vraagstukken waarmee de stof geoefend kan worden. De uitwerkingen van al deze vraagstukken zijn opgenomen in een uitgave van Delta Press B.V. (ISBN 978-90-6674-634-3). In de vorige editie zijn de studiewijzer, het register en samenvattingen toegevoegd.

Om de waarde van het standaardwerk te behouden ligt naast het doorvoeren van correcties en actualisaties de nadruk op het ondersteunend materiaal, aangeleverd door hbo-docenten die jarenlange ervaring met het werken met *Warmteleer voor technici* hebben, te weten Geert Bakker, hogeschooldocent Avans hogeschool, Albert Moes, hogeschooldocent van Hogeschool van Utrecht en Jac. Verhagen, docent van Hogeschool van Utrecht. Het ondersteunend materiaal is op de nieuwe website [www.warmteleer.noordhoff.nl](http://www.warmteleer.noordhoff.nl) te vinden.

Haarlem, 2010  
A.J.M. van Kimmenaede







# Inhoud

## Inleiding 13

### 1 Algemene begrippen 15

- 1.1 Eenhedenstelsel 16
  - 1.1.1 Druk en vermogen 18
  - 1.1.2 Volume en dichtheid 19
- 1.2 Soortelijke warmte 19
  - 1.2.1 Gemiddelde soortelijke warmte 20
- 1.3 Verbrandingswaarde en stookwaarde 23
- 1.4 Rendement 23
- 1.5 Ideale gassen 25
  - 1.5.1 Wet van Boyle-Gay Lussac 25
  - 1.5.2 Algemene gasconstante 27
- 1.6 Gasmengsels en wet van Dalton 28
  - 1.6.1 Volumeverhouding en massaverhouding 29
  - 1.6.2 Gasconstante van een gasmengsel 30
  - 1.6.3 Dichtheid van een gasmengsel 30
  - 1.6.4 Soortelijke warmte van een gasmengsel 30
- Vraagstukken 32

### 2 De eerste hoofdwet 37

- 2.1 Systeem en omgeving 38
- 2.2 Toestandsgrootheden en -veranderingen 39
- 2.3 Omkeerbare en niet-omkeerbare toestandveranderingen 41
  - 2.3.1 Omkeerbare toestandveranderingen 41
  - 2.3.2 Niet-omkeerbare toestandveranderingen 42
- 2.4 De eerste hoofdwet voor gesloten systemen 43
  - 2.4.1 Inwendige energie 45
  - 2.4.2 Volumearbeid 46
  - 2.4.3 Thermische energie 48
  - 2.4.4 Elektrische energie 50
- 2.5 Formulerings van de eerste hoofdwet 50
- Samenvatting 53
- Vraagstukken 56

### 3 Toestandveranderingen in gesloten systemen 59

- 3.1 Wetten van Poisson 60
- 3.2 Arbeid en warmte bij polytropische toestandveranderingen 60
- 3.3 Bijzondere polytropen 62
  - 3.3.1 Isotherm 62
  - 3.3.2 Adiabaat 62
- 3.4 Arbeid en warmte bij bijzondere polytropen 64
- 3.5 Niet-omkeerbare toestandveranderingen 65
  - 3.5.1 Niet-omkeerbare adiabatistische compressie en expansie 65
  - 3.5.2 Wrijvingsarbeid 67
- Samenvatting 70
- Vraagstukken 72

- 4 Kringprocessen 75**
  - 4.1 Positieve kringprocessen 76
  - 4.2 Thermisch rendement 78
  - 4.3 Arbeidsverhouding en gemiddelde druk 78
  - 4.4 Bijzondere kringprocessen 83
    - 4.4.1 Kringproces van Carnot 83
    - 4.4.2 Kringproces van Stirling en Ericsson 85
    - 4.4.3 Kringproces van Joule 87
  - 4.5 Kringprocessen in verbrandingsmotoren 89
    - 4.5.1 Het Otto-proces 90
    - 4.5.2 Het Diesel-proces 91
    - 4.5.3 Het Seiliger-proces 93
  - 4.6 Negatieve kringprocessen 95
    - 4.6.1 Koudefactor 96
    - 4.6.2 Kringproces van Carnot 97
    - 4.6.3 Kringproces van Joule 98
  - 4.7 Warmtepomp en warmtefactor 100
    - Samenvatting 101
    - Vraagstukken 104
  
- 5 Zuigermachines en roterende verdringermachines 107**
  - 5.1 Werking van een zuigercompressor 108
  - 5.2 Technische arbeid 109
    - 5.2.1 Compressor zonder schadelijke ruimte 109
    - 5.2.2 Compressor met schadelijke ruimte 111
    - 5.2.3 Isentropische en isothermische compressie 112
  - 5.3 Koeling van de compressor 114
  - 5.4 Schadelijke ruimte en volumetrisch rendement 114
  - 5.5 Tweetrapscompressor 117
  - 5.6 Expansiemachines 120
  - 5.7 Roterende verdringermachines 121
    - 5.7.1 Roots-compressor 121
    - 5.7.2 Schottenprocessor 122
  - Samenvatting 123
  - Vraagstukken 126
  
- 6 Toestandsveranderingen in open systemen 131**
  - 6.1 De eerste hoofdwet voor open systemen 132
  - 6.2 Roterende stromingsmachines 134
    - 6.2.1 Stoom-, gas- en waterturbines 134
    - 6.2.2 Straalbuis en diffusor 136
    - 6.2.3 Loopschoep 138
  - 6.3 Warmtewisselaars 141
    - 6.3.1 Stoomketel 142
    - 6.3.2 Condensor 145
  - 6.4 Smoren 146
  - 6.5 Kringprocessen 147
    - Samenvatting 149
    - Vraagstukken 151

- 7 De tweede hoofdwet 155**
  - 7.1 Formulering van Kelvin en Clausius 156
  - 7.2 Gereduceerde warmte bij omkeerbare kringprocessen 157
  - 7.3 Gereduceerde warmte bij niet-omkeerbare kringprocessen 160
  - Samenvatting 162
  - Vraagstukken 164
  
- 8 De entropie 167**
  - 8.1 Definitie van de entropie 168
  - 8.2 Entropieberekeningen 169
    - 8.2.1 Entropieverandering van vaste stoffen en vloeistoffen 169
    - 8.2.2 Entropieverandering van gassen 169
    - 8.2.3 Entropieverandering bij faseovergangen 171
  - 8.3 Het  $T$ - $s$ -diagram 175
    - 8.3.1 Het  $T$ - $s$ -diagram voor ideale gassen 175
    - 8.3.2 Volumearbeid en technische arbeid in het  $T$ - $s$ -diagram 177
    - 8.3.3 Kringprocessen in een  $T$ - $s$ -diagram 179
  - 8.4 Entropieverandering bij niet-omkeerbare toestandsveranderingen 182
  - Samenvatting 189
  - Vraagstukken 191
  
- 9 Toestandsdiagrammen 197**
  - 9.1 Het  $p$ - $v$ -diagram 198
  - 9.2 Het  $T$ - $s$ -diagram 199
  - 9.3 Het  $h$ - $s$ -diagram 203
    - 9.3.1 Warmtetoevoer bij constante druk 205
    - 9.3.2 Smoren 206
    - 9.3.3 Isentropische expansie 207
  - 9.4 Gemiddelde temperatuur van warmteto- en -afvoer 207
  - 9.5 Kringprocessen 209
    - 9.5.1 Positieve kringprocessen (stoomturbine-installatie) 211
    - 9.5.2 Negatieve kringprocessen (koelinstallatie) 214
  - 9.6 Het  $h$ - $x$ -diagram voor vochtige lucht 216
    - 9.6.1 Droge lucht en vochtige lucht 217
    - 9.6.2 Absolute en relatieve vochtigheid 218
    - 9.6.3 Natteboltemperatuur 219
    - 9.6.4 Opbouw van het  $h$ - $x$ -diagram 219
    - 9.6.5 Toestandsveranderingen van vochtige lucht 223
    - Samenvatting 227
    - Vraagstukken 230
  
- 10 Niet-omkeerbare processen in open systemen 235**
  - 10.1 Niet-omkeerbare overdracht van mechanische energie 236
  - 10.2 Isentropisch rendement 237
  - 10.3 Technische arbeid, wrijvingsarbeid en arbeidsverlies 237
  - 10.4 Stoom- en gasturbine 239
  - 10.5 Compressor en pomp 241
  - 10.6 Straalbuis en diffusor 242
    - 10.6.1 Straalbuis 242
    - 10.6.2 Diffusor 244
  - 10.7 Smoren en smoorcalorimeter 244
  - 10.8 Inversietemperatuur 246
  - Samenvatting 249
  - Vraagstukken 251

- 11 Gasturbine-installaties 255**
  - 11.1 Uitvoering van de installatie 256
  - 11.2 Het kringproces van Brayton 257
  - 11.3 Optimale drukverhouding 259
  - 11.4 Middelen tot verbetering van het thermisch rendement 261
    - 11.4.1 Warmtewisselaar 262
    - 11.4.2 Meertrapscompressie 266
    - 11.4.3 Herverhitting 267
    - 11.4.4 Inlaattemperatuur van de gasturbine 270
  - 11.5 De gasturbine-installatie als gesloten systeem 271
  - 11.6 Gasturbines in de luchtvaart 272
    - Vraagstukken 274
  
- 12 Stoomturbine-installaties 277**
  - 12.1 Het Rankine-proces met oververhitting 278
  - 12.2 Voedingswatervoorwarming 281
  - 12.3 Eigenschappen van het arbeidsmedium 286
  - 12.4 Combinatie van energiedragers 288
  - 12.5 Warmte/kracht-koppeling 290
    - Vraagstukken 292
  
- 13 Koelinstallaties 297**
  - 13.1 Werking en inrichting van een compressiekoelmachine 298
  - 13.2 Koelmiddelen 299
  - 13.3 Smoorklep en droge compressie 300
    - 13.3.1 Smoorklep 301
    - 13.3.2 Droge compressie 302
  - 13.4 Oververhitting en nakoeling 303
    - 13.4.1 Oververhitting 303
    - 13.4.2 Nakoeling 304
  - 13.5 Meertrapscompressie 305
  - 13.6 Warmtepomp 306
    - Vraagstukken 310
  
- 14 Exergie en anergie 313**
  - 14.1 Exergie – anergie 314
  - 14.2 De exergie van een warmtehoeveelheid 315
  - 14.3 Exergiebeschouwingen bij kringprocessen 318
  - 14.4 Exergie van een stromend medium 321
  - 14.5 Exergieverlies bij niet-omkeerbare toestandsveranderingen 323
    - 14.5.1 Exergieverlies en exergetisch rendement van open systemen 323
    - 14.5.2 Exergieverliezen in stoom- en gasturbine-installaties 324
  - Vraagstukken 329

## **Uitkomsten van de vraagstukken 333**

### **Tabellen 343**

Tabel I	Gassen 344
Tabel II	Water, verzadigingstoestand (temperatuurtablel) 345
Tabel III	Water, verzadigingstoestand (druktabel) 346
Tabel IV	Oververhitte stoom 348
Tabel V	Water ( $T < T_v$ ) 350
Tabel VI	Freon 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), verzadigingstoestand (temperatuurtablel) 351
Tabel VII	Freon 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), verzadigingstoestand (druktabel) 352
Tabel VIII	Oververhitte damp van freon 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) 353
Tabel IX	Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), verzadigingstoestand 356
Tabel X	Oververhitte ammoniakdamp 357
Tabel XI	Dampspanning en enthalpie van vochtige lucht 360

### **Register 361**

### **Symbolen 363**





## Inleiding

In een industriële maatschappij bestaat een grote behoefte aan mechanische energie. Deze wordt meestal verkregen door transformatie van thermische energie afkomstig van fossiele brandstoffen. Mechanische energie wordt voor allerlei doeleinden toegepast, zoals voor tractie en voor de productie van elektriciteit.

Met behulp van de technische warmteleer is inzicht te verkrijgen in werking en inrichting van de apparatuur en de installaties waarin de gewenste energieomzettingen worden gerealiseerd. De basis van de beschouwingen wordt gevormd door twee hoofdwetten en de verschillende thermodynamische betrekkingen die hieruit kunnen worden afgeleid.

De leerstof kan in grote trekken worden verdeeld in:

- de eerste hoofdwet met toepassingen op open en gesloten systemen (hoofdstuk 2 t/m 6);
- de tweede hoofdwet met introductie van de toestandsgrootheid 'entropie' (hoofdstuk 7 en 8);
- opzet en gebruik van toestandsdiagrammen waarin processen kunnen worden weergegeven en die een nuttige functie hebben voor de berekeningen (hoofdstuk 9);
- de toepassing van het voorgaande op onderdelen zoals ketels, turbines, compressoren en op installaties zoals stoomturbine-installaties en koelinstallaties (hoofdstuk 10 t/m 13).

De stof wordt ingeleid met een overzicht van de begrippen en definities die voor dit vakgebied relevant zijn (hoofdstuk 1), en we besluiten dit boek met een behandeling van de exergie en anergie (hoofdstuk 14).

Elk hoofdstuk is voorzien van een aantal vraagstukken waarvan de antwoorden aan het einde van het boek zijn opgenomen.



Op een aantal plekken in hoofdstukken 9 en 12 wordt verwezen naar het *h-s*-diagram. Deze is als download beschikbaar op de bij het boek horende website [www.warmteleer.noordhoff.nl](http://www.warmteleer.noordhoff.nl).





# Algemene begrippen



## 1

- 1.1 Eenhedenstelsel
    - 1.1.1 Druk en vermogen
    - 1.1.2 Volume en dichtheid
  - 1.2 Soortelijke warmte
    - 1.2.1 Gemiddelde soortelijke warmte
  - 1.3 Verbrandingswaarde en stookwaarde
  - 1.4 Rendement
  - 1.5 Ideale gassen
    - 1.5.1 Wet van Boyle-Gay Lussac
    - 1.5.2 Algemene gasconstante
  - 1.6 Gasmengsels en wet van Dalton
    - 1.6.1 Volumeverhouding en massaverhouding
    - 1.6.2 Gasconstante van een gasmengsel
    - 1.6.3 Dichtheid van een gasmengsel
    - 1.6.4 Soortelijke warmte van een gasmengsel
- Vraagstukken

In de techniek komen veel machines en installaties voor waarin energie en energieomzettingen een voorname rol spelen. De energiedrager is gewoonlijk een gas of vloeistof waarvan de toestand verandert bij de processen die zich hierbij afspelen.

Uit deze toestandsverandering kunnen conclusies worden getrokken over de hoeveelheid arbeid en warmte die worden overgedragen, over het rendement van de energietransformatie, over de verliezen die optreden enzovoort.

Dit eerste hoofdstuk is bedoeld als een korte herhaling van begrippen en definities die voor dit vakgebied relevant zijn en die voor het merendeel in de vooropleiding reeds ter sprake zijn gekomen.

## 1.1 Eenhedenstelsel

Om de waarde van allerlei grootheden die gemeten of berekend worden, in een getal te kunnen vastleggen, is er behoefte aan een stelsel van eenheden. Internationaal is het SI (Système International d'Unités) als eenhedenstelsel aanvaard; het bestaat uit zeven *basiseenheden*; zie tabel 1.1.

Tabel 1.1 Basisgrootheden en basiseenheden van het SI

Grootheid	SI-eenheid	
	Naam	Symbool
Lengte	meter	m
Massa	kilogram	kg
Tijd	seconde	s
Elektrische stroom	ampère	A
Thermodynamische temperatuur	kelvin	K
Hoeveelheid stof	mol	mol
Lichtsterkte	candela	cd

Uit de tabel blijkt dat de temperatuur in kelvin als norm is aanvaard. Deze temperatuur gaat uit van het 'natuurlijke' nulpunt ( $-273\text{ °C}$ ), waarbij de moleculen hun beweeglijkheid hebben verloren; dit wordt de *absolute* temperatuur  $T$  genoemd.

Voor het verband tussen de temperatuur  $T$  en de temperatuur  $t$  in graden Celsius geldt met enige benadering:

$$T = t + 273$$

Hieruit volgt dat een bepaald temperatuurverschil op beide schalen met hetzelfde aantal eenheden overeenkomt. Hoewel het wel is toegestaan om de temperatuur in  $^{\circ}\text{C}$  uit te drukken – behalve in samengestelde eenheden zoals in tabel 1.3 – zullen we van deze mogelijkheid slechts sporadisch gebruikmaken.

Voor het opgeven van een hoeveelheid stof, wordt de 'mol' als eenheid voorgeschreven. Het is echter, behalve in de chemische sector, gebruikelijk om uit te gaan van de hieraan gerelateerde massa.

Het quotiënt van de massa ( $m$ ) van een stof in kilogram en de stofhoeveelheid in kmol ( $n$ ) noemen we de molaire massa  $M$ . Hiervoor geldt dus dat  $M = m/n$  [kg/kmol]. De massa van 1 kmol ( $n = 1$ ) komt overeen met  $M$  kg.

De molaire massa van een stof kan worden vastgesteld uit de chemische formule en de (relatieve) atoommassa's; bijvoorbeeld 1 kmol  $\text{CH}_4 \approx 16$  kg.

Grootheden betrokken op de mol als eenheid worden *molaire grootheden* genoemd.

In gevallen waarin er van een massastroom (kg/s) sprake is, schrijven we  $\dot{m}$ . Een volumestroom wordt aangegeven met  $\dot{V}$ .

Uit de basiseenheden van tabel 1.1 kunnen andere eenheden worden afgeleid. Een aantal daarvan zijn vermeld in tabel 1.2.

Tabel 1.2 Afgeleide SI-eenheden

Grootheid	SI-eenheid	
	Naam	Symbool
Oppervlakte	vierkante meter	$m^2$
Volume (inhoud)	kubieke meter	$m^3$
Snelheid	meter per seconde	$m/s$ of $m \cdot s^{-1}$
Versnelling	meter per seconde kwadraat	$m/s^2$ of $m \cdot s^{-2}$
Dichtheid	kilogram per kubieke meter	$kg/m^3$ of $kg \cdot m^{-3}$

Er bestaan ook afgeleide SI-eenheden met een eigen naam en een eigen symbool, zoals de newton, pascal, joule, watt en hertz. Door een combinatie van deze eenheden en de grondeenheden kunnen weer nieuwe eenheden worden gevormd. Voorbeelden hiervan zijn aangegeven onder de horizontale stippellijn in tabel 1.3.

Tabel 1.3 Samengestelde eenheden

Grootheid	SI-eenheid	
	Naam	Symbool
Kracht	newton	$N = kg \cdot m/s^2$
Druk	pascal	$Pa = N/m^2$
Energie, arbeid, hoeveelheid warmte	joule	$J = N \cdot m$
Vermogen	watt	$W = J/s$
Frequentie	hertz	$Hz = 1/s$
Moment van een kracht	newtonmeter	$N \cdot m$
Soortelijke warmte	joule per kilogram kelvin	$J/(kg \cdot K)$ of $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Thermische geleiding	watt per meter kelvin	$W/(m \cdot K)$ of $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Molaire energie	joule per mol	$J/mol$ of $J \cdot mol^{-1}$

De newton als eenheid van kracht is afgeleid uit de wet van Newton ( $F = ma$ ) en wordt uitgedrukt in  $kg \cdot m/s^2$ .

Het vroegere begrip 'toerental', uitgedrukt in omwentelingen per minuut, is vervangen door het begrip 'omwentelingsfrequentie' (het aantal omwentelingen per seconde).

Zijn de gebruikte grootheden zeer klein of zeer groot ten opzichte van de bijbehorende eenheid, dan kan men gebruikmaken van een aantal internationaal aanvaarde voorvoegsels waarvan de meest toegepaste in tabel 1.4 zijn opgenomen. De symbolen van deze voorvoegsels worden zonder spatie vóór de symbolen van de eenheden geplaatst. Zo is de joule als eenheid van warmte in de praktijk te klein en wordt de kJ of MJ als eenheid gebruikt.

Tabel 1.4 Internationale voorvoegsels

Voorvoegsel	Symbol	Factor	Voorvoegsel	Symbol	Factor
peta	P	$10^{+15}$	centi	c	$10^{-2}$
tera	T	$10^{+12}$	milli	m	$10^{-3}$
giga	G	$10^{+9}$	micro	$\mu$	$10^{-6}$
mega	M	$10^{+6}$	nano	n	$10^{-9}$
kilo	k	$10^{+3}$	pico	p	$10^{-12}$
deci	d	$10^{-1}$	femto	f	$10^{-15}$

### 1.1.1 Druk en vermogen

Aan de eenheid van druk ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) is de naam *pascal* gegeven, met symbool Pa. Deze eenheid is echter te klein voor praktisch gebruik. Daarom is een hulpeenheid – de bar – ingevoerd die  $10^5$  maal zo groot is:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Het voordeel van de bar als eenheid van druk is dat deze vrijwel gelijk is aan de atmosferische druk  $p_a$ . Deze komt gemiddeld overeen met de druk die wordt uitgeoefend door een kwikkolom met een hoogte  $h$  van 76 cm ( $\rho_{\text{kw}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

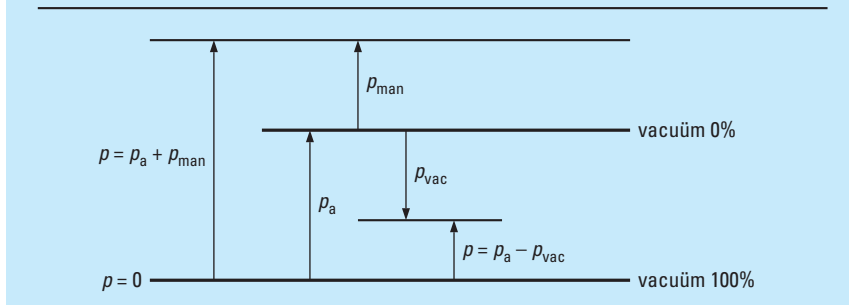
Substitutie in  $p_a = \rho gh$  levert:  $p_a = 1,013 \text{ bar}$ .

In alle berekeningen moet voor  $p$  de *absolute druk* worden ingevuld. Gemeten wordt echter het drukverschil met de atmosferische druk  $p_a$ , zodat bij een manometeraanwijzing  $p_{\text{man}}$  geldt:

$$p = p_a + p_{\text{man}}$$

Is  $p < p_a$  dan wordt de absolute druk verkregen door de aanwijzing van de vacuümmeter  $p_{\text{vac}}$  van de atmosferische druk af te trekken. Het vacuüm kan ook in procenten worden uitgedrukt. Is de beschouwde druk  $p = p_a$ , dan is het vacuüm 0%; is de druk  $p = 0$ , dan is het vacuüm 100%. Een en ander is in figuur 1.1 verduidelijkt.

Figuur 1.1 Verband absolute druk  $p$  en  $p_a$ ,  $p_{\text{man}}$ , en  $p_{\text{vac}}$



Onder het vermogen  $P$  verstaat men een energiehoeveelheid per tijdseenheid. De naam van de SI-eenheid is watt, het symbool  $W$ . Het product van vermogen en tijd is  $W \cdot s$ , en, evenals de joule, een energiehoeveelheid.

De bekende kWh is dus ook een energiehoeveelheid. Deze eenheid past niet in het SI en het gebruik daarvan is daarom niet meer toegestaan. Alleen voor de levering van elektrische energie is, om praktische redenen, een uitzondering gemaakt.

Indien behoefte bestaat om onderscheid te maken tussen mechanisch, thermisch of elektrisch vermogen, dan kan dit door een aanwijzing in de tekst (bijv. het elektrisch vermogen is ...  $W$ ) of door een toevoeging tussen haakjes achter de eenheid, bijv. kW (me.), kW (th.) of kW (el.).

### 1.1.2 Volume en dichtheid

Het volume van een stof is in het algemeen afhankelijk van de druk en de temperatuur. Bij vaste stoffen is de invloed hiervan gering en in de meeste gevallen te verwaarlozen. Voor vloeistoffen geldt dit in mindere mate; daar kan echter veelal wel de invloed van de druk ten opzichte van die van de temperatuur buiten beschouwing worden gelaten.

Bij gassen daarentegen is het volume sterk afhankelijk van zowel  $p$  als  $T$ , zodat bij een opgave van het volume tevens de bijbehorende druk en temperatuur moeten worden vermeld. Het is in veel gevallen wenselijk het volume op een genormaliseerde druk en temperatuur te herleiden. Meestal wordt voor de temperatuur  $0\text{ }^\circ\text{C}$  als norm genomen en voor de druk  $1013\text{ mbar}$ . Men spreekt dan van *normale omstandigheden*.\*

Is het volume van een gas in de normtoestand  $1\text{ m}^3$ , dan noemt men dit volume een normaal kubieke meter, afgekort  $\text{m}_n^3$ . Deze afkorting is niet genormaliseerd; ook de schrijfwijze  $\text{m}_0^3$  komt voor.

Is van een stof met massa  $m$  het volume  $V$ , dan is de dichtheid (soortelijke massa of volumieke massa)  $\rho$  per definitie:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Omdat een volume afhankelijk is van druk en temperatuur, geldt dit ook voor de dichtheid. In de normtoestand schrijven we hiervoor  $\rho_0$ .

Het soortelijk (specifiek) volume  $v$  is gedefinieerd als het volume per massa-eenheid en is dus de reciproke waarde van  $\rho$ :

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

## 1.2 Soortelijke warmte

Voor de hoeveelheid warmte  $dQ$  die aan een stof met massa  $m$  moet worden toegevoerd voor een temperatuurtoename  $dT$  kan worden geschreven:

$$dQ = m c dT \quad [1.1]$$

\* In plaats van  $0\text{ }^\circ\text{C}$  wordt in de praktijk ook wel  $15\text{ }^\circ\text{C}$  als standaardtemperatuur genomen.

Hierin stelt  $c$  de soortelijke warmte per massa eenheid voor. De waarde van de soortelijke warmte kan voor verschillende stoffen zeer uiteenlopen. Ook voor één bepaalde stof is  $c$  echter geen constante, maar neemt gewoonlijk toe met het toenemen van de druk en de temperatuur.

Bij vaste stoffen en vloeistoffen is de invloed van de druk ten opzichte van die van de temperatuur zeer gering en kan meestal worden verwaarloosd. In dat geval is  $c$  alleen van de temperatuur afhankelijk, bijvoorbeeld:

$$c = a + bt + dt^2$$

waarin  $a$ ,  $b$  en  $d$  constanten voorstellen.

De toe te voeren warmte kan dan door integratie worden bepaald. Dit levert:

$$Q_{1,2} = m \int_1^2 c \, dt = m \int_1^2 (a + bt + dt^2) dt$$

$$Q_{1,2} = m \left\{ a(t_2 - t_1) + \frac{1}{2}b(t_2^2 - t_1^2) + \frac{1}{3}d(t_2^3 - t_1^3) \right\}$$

De berekening verloopt echter eenvoudiger als een gemiddelde waarde van  $c$  bekend is, zoals hierna zal worden aangetoond.

Bij *gassen* is de waarde van  $c$  ook nog afhankelijk van de omstandigheden bij de warmtetoever. We kunnen hierbij twee bijzondere gevallen onderscheiden:

- Het gas bevindt zich in een afgesloten ruimte zodat het volume constant is. Bij de warmtetoever neemt de druk toe en voor de soortelijke warmte schrijven we  $c_v$ .
- Het gas kan bij de warmtetoever vrij uitzetten zodat de druk constant blijft ( $c = c_p$ ). Voor eenzelfde temperatuurtoename is er meer warmte nodig dan in het voorgaande geval zodat  $c_p > c_v$ .

In het algemeen zijn  $c_p$  en  $c_v$  nog afhankelijk van druk en temperatuur. We rekenen echter steeds met ideale gassen (zie paragraaf 1.5), waarbij niet alleen de drukafhankelijkheid vervalt maar ook de invloed van de temperatuur over een groot temperatuurgebied buiten beschouwing kan blijven.

Voor de verhouding van  $c_p$  en  $c_v$  wordt gewoonlijk  $k$  geschreven en voor het verschil  $R$  (de gasconstante) zoals in paragraaf 2.4.3 zal worden aangetoond. Deze gasconstante is onafhankelijk van de temperatuur:

$$c_p / c_v = k \quad \text{en} \quad c_p - c_v = R$$

### 1.2.1 Gemiddelde soortelijke warmte

Voor de toe te voeren hoeveelheid warmte die nodig is voor een temperatuurverhoging van  $t_1$  tot  $t_2$ , volgt uit [1.1] per eenheid van massa, dat:

$$q_{1,2} = \int_1^2 c \, dt$$

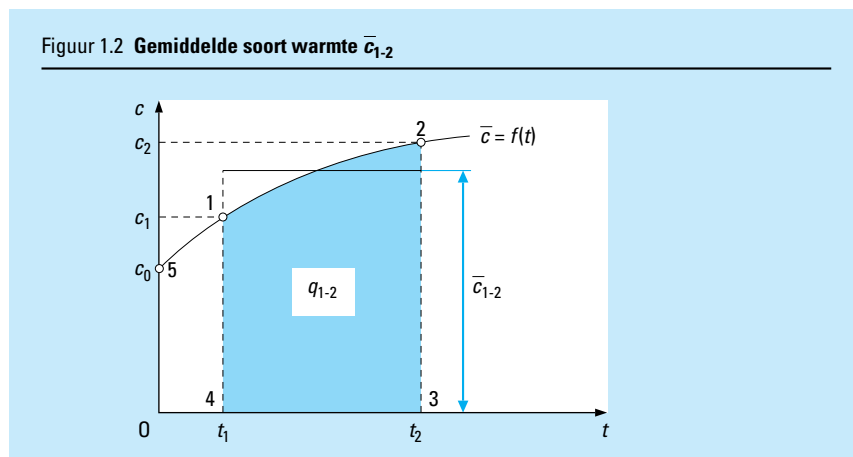
Stel dat de soortelijke warmte  $c$  van de temperatuur afhangt zoals in figuur 1.2 is aangegeven, dan is  $q_{1,2} \triangleq$  opp. 1-2-3-4.

Wordt met een gemiddelde waarde van de soortelijke warmte ( $\bar{c}$ ) gerekend, dan geldt de volgende gelijkheid:

$$q_{1,2} = \bar{c}_{1,2}(t_2 - t_1) = \int_1^2 c \, dt$$

Het oppervlak 1-2-3-4 in figuur 1.2 wordt dus vervangen door een *rechthoek* met dezelfde oppervlakte en met dezelfde breedte ( $t_2 - t_1$ ). De hoogte van deze rechthoek is dan per definitie  $\bar{c}_{1-2}$ .

Voor een snelle bepaling van  $q_{1-2}$  zou  $\bar{c}_{1-2}$  aan een tabel moeten kunnen worden ontleend. Tabellen voor  $\bar{c}$  zijn wel beschikbaar maar daarin is  $\bar{c}$  niet af te lezen als het gemiddelde tussen twee *willekeurige* temperaturen  $t_1$  en  $t_2$ , maar als het gemiddelde tussen een vaste begintoestand ( $0^\circ\text{C}$ ) en een willekeurig andere temperatuur. Uit het navolgende blijkt dat daaruit dan de gewenste  $\bar{c}_{1-2}$  kan worden bepaald.



In figuur 1.2 is:

$$q_{1-2} = \text{opp. } 1-2-3-4 = \text{opp. } 5-2-3-0 - \text{opp. } 5-1-4-0$$

ofwel, als we de oppervlakken als integralen schrijven:

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c \, dt = \int_0^{t_2} c \, dt - \int_0^{t_1} c \, dt$$

Vervangen we elk van de eerdergenoemde drie oppervlakken door rechthoeken, dan geldt dat:

$$\text{opp. } 1-2-3-4 = \bar{c}_{1-2}(t_2 - t_1)$$

$$\text{opp. } 5-2-3-0 = \bar{c}_{0-2}(t_2 - 0) = \bar{c}_2 t_2$$

$$\text{opp. } 5-1-4-0 = \bar{c}_{0-1}(t_1 - 0) = \bar{c}_1 t_1$$

Hierin stelt  $\bar{c}_1$  de gemiddelde waarde van  $c$  voor tussen  $0^\circ\text{C}$  en  $t_1$ , en  $\bar{c}_2$  de gemiddelde waarde van  $c$  tussen  $0^\circ\text{C}$  en  $t_2$ . We kunnen dus schrijven dat:

$$q_{1-2} = \bar{c}_{1-2}(t_2 - t_1) = \bar{c}_2 t_2 - \bar{c}_1 t_1$$

Hieruit volgt dat:

$$\bar{c}_{1-2} = \frac{1}{t_2 - t_1} (\bar{c}_2 t_2 - \bar{c}_1 t_1) \quad [1.2]$$

Daarmee wordt de toe te voeren warmte voor een massa  $m$ :

$$Q_{1,2} = m\bar{c}_{1,2}(t_2 - t_1) = m(\bar{c}_2 t_2 - \bar{c}_1 t_1)$$

Voor veel stoffen zijn tabellen opgesteld waarin  $\bar{c}_1$  en  $\bar{c}_2$  direct afleesbaar zijn (zoals tabel 1.5). Daar de variatie van  $\bar{c}$  met de temperatuur betrekkelijk gering is, kan worden volstaan met een tabel waarbij de temperatuur met bijvoorbeeld 100 °C of 200 °C oploopt. Voor tussenliggende waarden moet men dan lineair interpoleren.

Als het beschouwde temperatuurtraject klein is, kan met enige benadering het verloop van de soortelijke warmte als rechte lijn worden beschouwd. In dat geval is  $\bar{c}_{1,2}$  het rekenkundig gemiddelde van  $\bar{c}_1$  en  $c_2$ .

Tabel 1.5 Gemiddelde soortelijke warmte  $\bar{c}$  tussen 0...1 500 °C in kJ/(kg · K)

Temp $t$ [°C]	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	lucht
0	14,241	1,038	0,912	0,820	1,004
200	14,420	1,046	0,933	0,917	1,013
400	14,493	1,059	0,967	0,988	1,030
600	14,555	1,076	0,992	1,050	1,050
800	14,660	1,096	1,017	1,092	1,071
1 000	14,781	1,117	1,038	1,130	1,088
1 500	15,200	1,163	1,071	1,193	1,138

### ■ Toepassing 1.1

De gemiddelde soortelijke warmte van een zeker metaal tussen 0 °C en  $t$  °C is in tabel 1.6 gegeven.

Tabel 1.6 Gemiddelde soortelijke warmte

$t$ [°C]	$\bar{c}$ [kJ/(kg·K)]	$t$ [°C]	$\bar{c}$ [kJ/(kg·K)]
0	0,428	300	0,475
100	0,445	400	0,491
200	0,461	500	0,506

Bereken met behulp hiervan de hoeveelheid warmte die moet worden toegevoerd om 5 kg van dit metaal van 125 °C tot 350 °C te verwarmen.

*Oplossing*

Voor de gevraagde warmtehoeveelheid kan worden geschreven:

$$Q_{1,2} = m \bar{c}_{1,2}(t_2 - t_1)$$

waarin alleen  $\bar{c}_{1,2}$  nog moet worden bepaald. Substitutie van  $\bar{c}_{1,2}$  volgens [1.2] levert:

$$Q_{1,2} = m (\bar{c}_2 t_2 - \bar{c}_1 t_1) \quad [a]$$

De waarden van  $\bar{c}_2$  en  $\bar{c}_1$  zijn weliswaar niet gegeven maar door lineaire interpolatie wel uit de gegevens te berekenen:



$$\bar{c}_1 = \left( 0,445 + \frac{0,461 - 0,445}{100} \times 25 \right) \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0,449 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\bar{c}_2 = \left( 0,475 + \frac{0,491 - 0,475}{100} \times 50 \right) \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0,483 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Deze waarden gesubstitueerd in [a] levert:

$$Q_{1-2} = 5 \times (0,483 \times 350 - 0,449 \times 125) \text{ kJ} = 564,6 \text{ kJ}$$

### 1.3 Verbrandingswaarde en stookwaarde

Onder de verbrandingswaarde van een vaste of vloeibare brandstof verstaat men de warmtehoeveelheid die vrijkomt bij volledige verbranding van 1 kg brandstof met inbegrip van de condensatiewarmte van de, bij de verbranding gevormde, waterdamp.

De verbrandingswaarde wordt met een proef bepaald. Hierbij worden de verbrandingsgassen die ontstaan bij verbranding van een brandstofmonster, tot ongeveer kamertemperatuur afgekoeld, zodat bovengenoemde condensatie ook daadwerkelijk plaatsvindt. De afgevoerde warmte wordt gemeten en dit is per definitie de verbrandingswaarde.

In de praktijk ontwijken de verbrandingsgassen meestal met een zo hoge temperatuur dat er geen condensatie optreedt. De verbrandingswaarde is dan geen juiste maatstaf voor de hoeveelheid warmte die voor praktische doeleinden beschikbaar komt. Men rekent dan met de zogenoemde *stookwaarde* van de brandstof (ook wel onderste verbrandingswaarde genoemd).

De stookwaarde is de verbrandingswaarde verminderd met de condensatiewarmte van de bij de verbranding gevormde waterdamp.

Bij gasvormige brandstoffen worden stookwaarde en verbrandingswaarde niet per massa-eenheid maar per volume-eenheid opgegeven. Om de verschillende gassen onderling gemakkelijk te kunnen vergelijken, wordt het volume genomen bij normale omstandigheden ( $\text{m}_n^3$ ).

### 1.4 Rendement

In veel machines en installaties (verbrandingsmotor, stoomketel, elektromotor, stoomturbine enz.) vinden energieomzettingen plaats. Steeds zal men daarbij constateren dat de energie die is toegevoerd, groter is dan de energie die hieruit nuttig wordt verkregen. Met 'nuttige' energie wordt de energievorm bedoeld die het werktuig moet leveren.

Men tracht uiteraard machines en installaties zo te ontwerpen dat de verhouding tussen de nuttige energie en de toegevoerde energie zo gunstig (groot) mogelijk is. Bij de omzetting van warmte in arbeid – een voor de techniek zeer belangrijke omzetting – wordt deze verhouding het *thermische rendement*  $\eta_{\text{th}}$  genoemd.

Het thermische rendement is dus per definitie de verhouding tussen de verkregen nuttige arbeid en de hiervoor benodigde warmte:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\text{nuttige arbeid}}{\text{toegevoerde warmte}} = \frac{W_{\text{nuttig}}}{Q_{\text{toe}}} \quad [1.3]$$

De waarde van dit quotiënt is in de praktijk 0,20 à 0,50 ofwel het thermisch rendement bedraagt 20% à 50%.

Voor een elektromotor is het rendement de verhouding tussen de mechanische energie die aan de uitgaande as wordt geleverd en de elektrische energie die hiervoor aan de motor wordt toegevoerd.

In een ketel waarin water wordt verwarmd, is het rendement gedefinieerd als de verhouding tussen de hoeveelheid warmte die door het water wordt opgenomen en de warmtehoeveelheid die men voor dit doel – meestal in de vorm van chemische energie van een brandstof – heeft moeten toevoeren.

Ook deelrendementen kunnen bij de beoordeling van een werktuig nuttige informatie leveren, zoals het mechanisch rendement  $\eta_m$ . Bij een verbrandingsmotor bijvoorbeeld is dit rendement gedefinieerd als de verhouding tussen de effectieve arbeid  $W_e$  die aan de uitgaande as vrijkomt en de arbeid  $W_i$  (de z.g. indicatorarbeid) die aan zuigers wordt afgegeven ( $W_e < W_i$ ). Het verschil tussen  $W_e$  en  $W_i$  wordt veroorzaakt door de mechanische wrijvingsverliezen.

$$\eta_m = \frac{W_e}{W_i} = \frac{P_e}{P_i} \quad [1.4]$$

Bij een machine waaraan mechanische energie moet worden toegevoerd, zoals bij een compressor, is  $W_e > W_i$  en moeten in formule [1.4] de teller en noemer worden verwisseld. De waarde van  $\eta_m$  kan immers nooit groter zijn dan één ofwel 100%.

In de literatuur komen vele rendementen voor; de benamingen zijn echter niet genormaliseerd, zodat voor hetzelfde soort rendement soms verschillende benamingen worden gebruikt en omgekeerd dezelfde benaming geen waarborg is dat ook hetzelfde soort rendement wordt bedoeld. Dit betekent dat steeds moet worden nagegaan hoe de rendementen zijn gedefinieerd.

### ■ Toepassing 1.2

Hoeveel liter brandstof verbruikt een motor per uur als het thermisch rendement van de motor 25% bedraagt en het vermogen 30 kW? Van de brandstof is de stookwaarde  $S = 38 \text{ MJ/kg}$  en de dichtheid  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Wat is het brandstofverbruik in gram per kW's?

*Oplossing*

Het motorrendement  $\eta_{th} = \frac{W}{Q} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$ , zodat voor de warmtestroom geldt:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{W}}{\eta_{th}} = \frac{30}{0,25} \text{ kW} = 120 \text{ kW}$$

Deze warmtestroom moet door de brandstof worden geleverd, zodat de benodigde hoeveelheid brandstof volgt uit:

$$\dot{m}_{br} S = 120 \rightarrow \dot{m}_{br} = \frac{120}{38 \times 10^3} \text{ kg/s} = 11,37 \text{ kg/h}$$

De volumestroom brandstof  $\dot{V} = \dot{m} / \rho = \frac{11,37}{900} \text{ m}^3/\text{h} = 0,0126 \text{ m}^3/\text{h} = 12,6 \text{ l/h}$

Het brandstofverbruik bedraagt 11 370 g/h en in dat tijdsbestek levert de motor 30 kWh aan arbeid, overeenkomend met  $30 \times 3600 \text{ kWs}$ . Het gevraagde brandstofverbruik in g/kWs is dus:

$$\frac{11\,370}{30 \times 3\,600} \text{ g/kWs} = 0,105 \text{ g/kWs}$$

## 1.5 Ideale gassen

Alle stoffen kunnen onder bepaalde omstandigheden in de gasvorm overgaan. Wat die omstandigheden zijn, wordt bepaald door de aard van de stof. Wordt aan een kokende vloeistof bij constante druk warmte toegevoerd, dan ontstaat verzadigde damp die bij verdere warmtetoevoer overgaat in zogenoemde oververhitte damp. Bij een zeer sterk oververhitte damp spreekt men van een gas.

Verzadigde damp, oververhitte damp en een gas zijn verschillende toestanden van een stof in de gasfase. Een scherpe grens tussen oververhitte damp en een gas is niet te trekken.

In installaties of machines waarin thermische energie in mechanische energie wordt omgezet, fungeert een gas of een damp als *energiedrager*. Daarbij is het, voor het uitvoeren van berekeningen, van essentieel belang te weten hoe druk, temperatuur en volume verlopen en hoe hun onderlinge samenhang is. Deze samenhang is niet op theoretische gronden vast te stellen en moet dus experimenteel worden bepaald.

Uit proefnemingen van Boyle en Gay Lussac bleek het verband tussen  $p$ ,  $V$  en  $T$  van een stof in de gasfase met een eenvoudige formule te kunnen worden weergegeven. De geldigheid van de *Wet van Boyle-Gay Lussac* is echter beperkt tot *ideale gassen*. Hieronder verstaat men gassen waarvan het eigen volume van de moleculen kan worden verwaarloosd, alsmede hun onderlinge aantrekkingskracht.

Hoewel de in de techniek toegepaste gassen in werkelijkheid niet ideaal zijn, blijkt deze wet in een groot aantal gevallen toch redelijk te voldoen. Zijn de afwijkingen ten opzichte van een ideaal gas echter te groot, dan moet men empirisch bepaalde correctietermen aanbrengen waardoor de eenvoud van de formule verloren gaat.

Het verdient in dat geval de voorkeur gebruik te maken van tabellen of grafische voorstellingen waaruit het verband tussen  $p$ ,  $V$  en  $T$  kan worden afgelezen. Voor veel technisch belangrijke stoffen zijn deze gegevens beschikbaar.

### 1.5.1 Wet van Boyle-Gay Lussac

Volgens deze wet, ook wel de *gaswet* genoemd, is voor een bepaalde hoeveelheid van een ideaal gas het product van druk en volume gedeeld door de absolute temperatuur constant.

$$\frac{pV}{T} = C \quad [1.5]$$

Tussen twee willekeurige toestanden van een *bepaalde hoeveelheid* gas bestaat dus de volgende betrekking:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Door in [1.5] achtereenvolgens  $p$ ,  $V$  of  $T$  constant te stellen, verkrijgen we voor een toestandsverandering waarbij:

- de druk constant is (isobaar):  $V/T = C$
- het volume constant is (isochor):  $p/T = C$
- de temperatuur constant is (isotherm):  $pV = C$

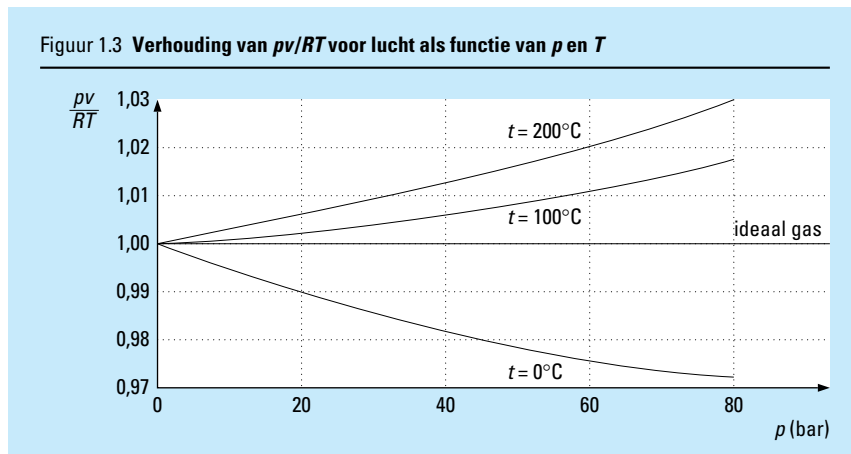
Voor 1 kg gas is het volume  $V$  in [1.5] per definitie het soortelijk volume  $v$ , terwijl voor de constante  $C$  een  $R$  wordt geschreven. In dat geval geldt:  $pv = RT$ . We noemen  $R$  de *specifieke gasconstante*. Deze is afhankelijk van de aard van het gas en kan door meting van  $p$ ,  $v$  en  $T$  worden bepaald. Substitutie van  $v = V/m$  in  $pv = RT$  levert:

$$pV = mRT \quad [1.6]$$

Een vergelijking die het verband weergeeft tussen druk, temperatuur en volume van een stof, wordt een *toestandsvergelijking* genoemd. Formule [1.6] is dus de toestandsvergelijking van een ideaal gas. In deze vergelijking is  $p$  de *absolute* druk van het gas en wordt de gasconstante  $R$  uitgedrukt in  $J/(kg \cdot K)$ . De uitdrukkingen [1.5] en [1.6] gelden alleen voor ideale gassen. In werkelijkheid zal geen enkel gas geheel aan de wet van Boyle-Gay Lussac voldoen. Ze vertonen alle afwijkingen, maar deze zijn kleiner naarmate de druk lager is. Dit blijkt ook uit figuur 1.3 waarin voor *lucht* bij verschillende drukken en temperaturen de experimenteel bepaalde waarde van het quotiënt  $pv / RT$  is uitgezet.

Voor 1 kg van een ideaal gas in  $pv / RT = 1$ . Uit de grafiek blijkt dat geen grote fout gemaakt wordt als we lucht, bij niet te hoge drukken, als een ideaal gas beschouwen.

Hetzelfde geldt voor alle een- en twee-atomige gassen, zoals helium, argon, zuurstof, stikstof, waterstof en koolstofmonoxide. Het hangt van de gewenste rekennauwkeurigheid af onder welke omstandigheden een gas nog als ideaal kan worden opgevat.



Voor een aantal *reële gassen*, die niet voldoen aan de gaswet, zijn ook toestandsvergelijkingen opgesteld. Hierin zijn dan termen opgenomen die rekening houden met het eigen volume van de moleculen en met de onderlinge aantrekkingskrachten. Het rekenen met deze toestandsvergelijkingen is echter aanzienlijk gecompliceerder dan met de gaswet.

### 1.5.2 Algemene gasconstante

Vervangen we de massa in [1.6] door het product van  $n$  (kmol) en de molaire massa  $M$  (kg/kmol), dan verkrijgen we de volgende uitdrukking:

$$pV = nMRT$$

Hieruit volgt dat:

$$MR = \frac{pV}{nT} \quad [b]$$

Volgens de wet van Avogadro is van elk ideaal gas bij *dezelfde druk en temperatuur* het volume per kmol ( $V/n$ ) gelijk. Dit betekent dat het rechterlid van [b] voor elk ideaal gas dezelfde waarde heeft, zodat ook het product  $MR$  constant is.

Men noemt dit product de *algemene* of *absolute gasconstante*  $R_a$ , welke wordt uitgedrukt in J/(kmol · K). Ook spreekt men wel van de *molaire gasconstante*:

$$R_a = MR \quad [1.7]$$

Hoewel de molaire massa  $M$  en de gasconstante  $R$  voor elk ideaal gas een andere waarde hebben, blijkt het product van  $M$  en  $R$  wel steeds gelijk te zijn. Als  $R_a$  bekend is, kan de gasconstante  $R$  van *elk* ideaal gas berekend worden door  $R_a$  te delen door de molaire massa van het desbetreffende gas. De waarde van  $R_a$  is uit metingen bepaald en bedraagt:

$$R_a = 8\,315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

Voor reële gassen is het product van  $R$  (uit tabel I achterin het boek) en de molaire massa  $M$  niet precies 8 315 J/(kmol · K) maar de verschillen zijn klein. De gaswet kan nu geschreven worden als:

$$pV = nR_aT \quad [1.8]$$

Deze toestandsvergelijking is *onafhankelijk* van de aard van het gas. Het molaire volume  $V_m$  in de normtoestand (1,013 bar en 273 K) bedraagt volgens [1.8]:

$$V_m = \frac{V}{n} = \frac{R_a T}{p} = \frac{8\,315 \times 273}{1,013 \times 10^5} \text{ m}^3/\text{kmol} = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Eén kmol ( $M$ kg) van elk ideaal gas heeft dus een volume van 22,4  $\text{m}_n^3$  of anders geformuleerd: *elk ideaal gas heeft een volume van 22,4  $\text{m}_n^3$ /kmol.*

#### ■ Toepassing 1.3

50 liter lucht van 1 bar en 17 °C wordt gecomprimeerd tot 9 bar, waarbij het volume daalt tot 10 liter. Als  $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  bepaal dan:

- de hoeveelheid lucht in kg en in kmol als  $R_a = 8\,315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;
- de eindtemperatuur van de lucht;
- het aantal  $\text{m}^3$  lucht betrokken op 0 °C en 1,013 bar;
- de dichtheid en het molaire volume in de eindtoestand.

### Oplissing

- a De massa  $m$  kan worden berekend uit [1.6] en het aantal kmol  $n$  uit [1.8].  
In de gegeven begintoestand geldt:

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{10^5 \times 0,05}{287 \times 290} \text{ kg} = \mathbf{0,06 \text{ kg}}$$

$$n = \frac{p_1 V_1}{R_a T_1} = \frac{10^5 \times 0,05}{8\,315 \times 290} = \mathbf{2,07 \cdot 10^{-3} \text{ kmol}}$$

- b De temperatuur na compressie volgt uit:

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{mR} = \frac{9 \times 10^5 \times 0,01}{0,06 \times 287} \text{ K} = \mathbf{523 \text{ K}}$$

- c Geeft men de nieuwe toestand aan met de index 0 (normaaltoestand) dan is:

$$V_0 = \frac{mRT_0}{\rho_0} = \frac{0,06 \times 287 \times 273}{101\,300} \text{ m}_n^3 = \mathbf{0,0464 \text{ m}_n^3}$$

Daar het volume van 1 kmol gelijk is aan  $22,4 \text{ m}_n^3$ , is  $V_0$  ook te bepalen door  $22,4 \text{ m}_n^3/\text{kmol}$  te vermenigvuldigen met  $n$  ( $2,07 \cdot 10^{-3} \text{ kmol}$ ).

- d In de eindtoestand 2 geldt voor de dichtheid:

$$\rho_2 = \frac{m}{V_2} = \frac{0,06}{0,01} \text{ kg/m}^3 = \mathbf{6,0 \text{ kg/m}^3}$$

Het molaire volume is:  $V_m = \frac{V_2}{n} = \frac{R_a T_2}{p_2}$ . Uitwerking levert:

$$V_m = \frac{V_2}{n} = \frac{0,01}{0,002\,07} \text{ m}^3/\text{kmol} = \mathbf{4,8 \text{ m}^3/\text{kmol}} \quad \text{of}$$

$$V_m = \frac{R_a T_2}{p_2} = \frac{8\,315 \times 523}{9 \times 10^5} \text{ m}^3/\text{kmol} = \mathbf{4,8 \text{ m}^3/\text{kmol}}$$

## 1.6 Gasmengsels en wet van Dalton

In de praktijk bestaan gasvormige media dikwijls uit een mengsel van verschillende gassen (aardgas, lucht, verbrandingsgassen). Zoals bekend kunnen gassen gemakkelijk en in iedere verhouding met elkaar worden gemengd (diffusie).

Van bekende gasmengsels (zoals lucht) zijn de stoffeigenschaften voldoende bekend, maar in veel andere gevallen – verbrandingsgassen – niet. We kunnen deze eigenschappen echter afleiden uit die van de gassen waaruit het mengsel is samengesteld. Daarbij wordt aangenomen dat we te maken hebben met een *homogeen* mengsel van *ideale gassen* die chemisch niet met elkaar reageren.

Een belangrijk uitgangspunt bij de bepaling van de stoffeigenschaften van gasmengsels is de wet van Dalton. Deze empirisch gevonden wet kan als volgt worden geformuleerd:

**De druk  $p$  die een gasmengsel in een ruimte met volume  $V$  uitoefent, is de som van de partiële drukken.**

De partiële druk ( $p_i$ ) is de druk die door elke component van het mengsel afzonderlijk wordt uitgeoefend, als deze zich bij dezelfde temperatuur *alleen* in

de ruimte met volume  $V$  zou bevinden. De wet van Dalton kan voor een mengsel bestaande uit  $n$  verschillende componenten als volgt genoteerd worden:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad [1.9]$$

waarin  $p_i$  de partiële druk voorstelt van het  $i$ -de gas.

In een gasmengsel zijn de temperatuur  $T$  en het volume  $V$  van elke component gelijk aan die van het mengsel. Wordt in gedachten één van de gassen uit het mengsel, met partiële druk  $p_i$  bij constante temperatuur samengeperst tot de druk  $p$  van het mengsel, en verandert het volume hierbij van  $V$  tot  $V_i$  dan geldt:

$$p_i V = p V_i \rightarrow V_i = \frac{p_i V}{p} \quad [c]$$

Sommering van de volumina  $V_i$  voor alle componenten van het mengsel levert:

$$\sum_{i=1}^n V_i = \frac{V}{p} \sum_{i=1}^n p_i = \frac{V}{p} p = V$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad [1.10]$$

Het volume  $V$  van een gasmengsel is de som van de volumina van de componenten, genomen bij de druk  $p$  en de temperatuur  $T$  van het mengsel. De samenstelling van een gasmengsel wordt normaliter gegeven door volumeverhoudingen ( $V_i / V$ ) of door massaverhoudingen ( $m_i / m$ ).

### 1.6.1 Volumeverhouding en massaverhouding

Schrijven we voor [c]:  $p_i / V_i = p / V$ , dan blijkt de verhouding  $p_i / V_i$  voor elke component van het mengsel gelijk te zijn. Dit leidt tot de conclusie dat de verhouding van de partiële drukken gelijk is aan de volumeverhouding.

Daar  $m_i = n_i M_i$  kan een mol-verhouding eenvoudig in een massaverhouding worden omgerekend als de molaire massa  $M_i$  van de afzonderlijke gassen bekend is. Ook is van elk gas, bij dezelfde  $p$  en  $T$ , het volume per mol gelijk, zodat een molverhouding overeenkomt met een volumeverhouding ( $n_i / n = V_i / V$ ). Er geldt dus dat:

$$\frac{n_i}{n} = \frac{V_i}{V} = \frac{m_i / M_i}{m / M} \quad [1.11]$$

Voor elke component uit een gasmengsel geldt de gaswet, zodat:

$$p_i V = p V_i = m_i R_i T \quad [1.12]$$

Uit deze betrekking kunnen volumeverhoudingen worden berekend als de massaverhoudingen gegeven zijn. De  $V_i$  opgelost uit [1.12] levert  $V_i = m_i R_i T / p$  zodat:

$$V_1 : V_2 : \dots : V_n = \frac{m_1 R_1 T}{p} : \frac{m_2 R_2 T}{p} : \dots : \frac{m_n R_n T}{p}$$

Deling van de termen uit het linkerlid door  $V$  en vermenigvuldiging van alle termen uit het rechterlid met  $p / mT$  levert:

$$\frac{V_1}{V} : \frac{V_2}{V} : \dots : \frac{V_n}{V} = \frac{m_1}{m} R_1 : \frac{m_2}{m} R_2 : \dots : \frac{m_n}{m} R_n \quad [1.13]$$

Uit [1.12] volgt ook dat  $m_i = pV_i / R_i T$ . In analogie met de afleiding van [1.13] kan worden aangetoond dat:

$$\frac{m_1}{m} : \frac{m_2}{m} : \dots : \frac{m_n}{m} = \frac{V_1}{V} \frac{1}{R_1} : \frac{V_2}{V} \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{V_n}{V} \frac{1}{R_n} \quad [1.14]$$

Hieruit kunnen de massaverhoudingen worden berekend als de volumeverhoudingen bekend zijn.

### 1.6.2 Gasconstante van een gasmengsel

Voor een gasmengsel waarvoor op elk van de afzonderlijke componenten de gaswet ( $p_i V = m_i R_i T$ ) mag worden toegepast, geldt:

$$\left( \sum_{i=1}^n p_i \right) V = \left( \sum_{i=1}^n m_i R_i \right) T \quad \text{of} \quad pV = m \left( \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} R_i \right) T$$

Uit een vergelijking met de gaswet voor een mengsel, geschreven als:

$$pV = m R_m T$$

blijkt dat in het laatste lid de term tussen haakjes beschouwd kan worden als de gasconstante  $R_m$  van het mengsel:

$$R_m = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} R_i \quad [1.15]$$

### 1.6.3 Dichtheid van een gasmengsel

Voor de *dichtheid*  $\rho_m$  van een gasmengsel kan met behulp van de gaswet worden geschreven:

$$\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_m T}$$

De dichtheid  $\rho_m$  kan echter ook berekend worden uit die van de afzonderlijke gassen. We schrijven dan:

$$\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V} \frac{V_i}{V_i} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} \frac{m_i}{V_i} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} \rho_i$$

Hierin is  $\rho_i = m_i / V_i$  de dichtheid van een willekeurige component uit het mengsel bij de druk  $p$  en temperatuur  $T$  van het mengsel:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} \rho_i \quad [1.16]$$

### 1.6.4 Soortelijke warmte van een gasmengsel

Wordt aan een gasmengsel warmte toegevoerd, dan kan de totaal toe te voeren warmte worden gevonden door sommering van de termen  $dQ = m c dT$  voor de afzonderlijke gassen. Dit levert:

$$dQ = \sum_{i=1}^n m_i c_i dT = m \left( \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} c_i \right) dT$$



De term tussen haakjes kan beschouwd worden als de soortelijke warmte van het mengsel zodat:

$$c_m = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} c_i \quad [1.17]$$

Als de soortelijke warmte  $c_i$  gegeven wordt per eenheid van volume ( $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ), kan op soortgelijke wijze worden aangetoond dat:

$$c_m = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} c_i \quad [1.18]$$

#### ■ Toepassing 1.4

Een gasmonster bestaat uit 30% koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ), 15% waterstof ( $\text{H}_2$ ) en 55% stikstof ( $\text{N}_2$ ). De percentages hebben betrekking op het volume. Bepaal van dit mengsel:

- de massapercentages van  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  en  $\text{N}_2$ ;
- de gasconstante;
- de dichtheid bij  $10^\circ\text{C}$  en 1 bar.

$$R_{\text{CO}_2} = 189 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}), R_{\text{H}_2} = 4\,123 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \text{ en } R_{\text{N}_2} = 297 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}).$$

#### Oplossing

- Stel dat we uitgaan van  $100 \text{ m}^3$  mengsel van 1 bar en  $10^\circ\text{C}$ . Uit de gaswet kan dan de massa  $m_1$ ,  $m_2$  en  $m_3$  van resp.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  en  $\text{N}_2$  worden berekend.

$$m_1 = \frac{pV_1}{RT} = \frac{10^5 \times 30}{189 \times 283} \text{ kg} = 56,09 \text{ kg}$$

Op dezelfde wijze vinden we:

$$m_2 = 1,285 \text{ kg H}_2 \quad \text{en} \quad m_3 = 65,44 \text{ kg N}_2 \quad \text{zodat} \quad m_1 + m_2 + m_3 = 122,8 \text{ kg}$$

Het massapercentage  $\text{CO}_2$  bedraagt dus:  $\frac{56,09}{122,8} \times 100\% = 45,67\%$ .

Voor  $\text{H}_2$  wordt dit dan **1,05%** en voor  $\text{N}_2$  **53,28%**.

- Voor dit mengsel in  $R_m = \frac{pV}{mT} = \frac{10^5 \times 100}{122,8 \times 283} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 287,7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

De gasconstante van het mengsel kan ook uit [1.15] worden berekend.

- Voor de dichtheid geldt:  $\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{122,8}{100} \text{ kg}/\text{m}^3 = 1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Dezelfde uitkomst levert de gaswet geschreven als  $\rho_m = p / R_m T$ .

Als we bij *a* van een ander volume, een andere druk of een andere temperatuur zouden zijn uitgegaan, zouden de uitkomsten van *a* en *b* hetzelfde zijn gebleven. In *c* wordt de dichtheid gevraagd bij 1 bar en  $10^\circ\text{C}$ , zodat het een logische keuze was van deze toestand uit te gaan.

## Vraagstukken

- 1.1 Voor het meten van de hoeveelheid water die door een leiding stroomt, is een meetflens ingebouwd. De leiding direct voor en achter de meetflens is op een U-buis aangesloten die gevuld is met kwik. Als de kwikspiegel aan de ene zijde 150 mm boven de onderkant van de U-buis staat en aan de andere zijde 255 mm, hoe groot is dan het drukverschil over de meetflens in Pa?  
 $\rho_{\text{kw}} = 13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{\text{w}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .
- 1.2 Als de soortelijke warmte afhankelijk is van de temperatuur volgens  $c = a + bt$ , waarin  $a = 0,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $b = 0,0125 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2)$  en  $t$  de temperatuur in  $^{\circ}\text{C}$ , hoeveel warmte moet dan worden toegevoerd om 2,5 kg van de desbetreffende stof van  $60^{\circ}\text{C}$  op  $400^{\circ}\text{C}$  te brengen?
- 1.3 Gegeven is dat voor stikstof tussen  $27^{\circ}\text{C}$  en  $4000^{\circ}\text{C}$  gerekend mag worden met:

$$c_p = \left\{ 39632 - \frac{8,07 \cdot 10^6}{T} + \frac{1498 \cdot 10^6}{T^2} \right\} [\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$$

Bereken nu de hoeveelheid warmte in kJ die nodig is om 8 kg stikstof van  $30^{\circ}\text{C}$  bij constante druk tot  $180^{\circ}\text{C}$  te verwarmen. Wat is de gemiddelde waarde van  $c_p$  (in  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) voor het laatstgenoemde temperatuurtraject? De relatieve atoommassa  $A_r$  van stikstof is 14.

- 1.4 Een as van 50 mm diameter roteert met een frequentie van 60 Hz. De asbelasting is 1500 N en de wrijvingscoëfficiënt  $\mu = 0,03$ . Bereken het vermogen dat door wrijving verloren gaat.  
Als de wrijvingswarmte volledig door olie van  $50^{\circ}\text{C}$  moet worden afgevoerd, hoeveel liter olie moet men dan per minuut toevoeren als de eindtemperatuur  $60^{\circ}\text{C}$  bedraagt?  
Van de olie is gegeven dat  $c_{\text{olie}} = 1700 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  en  $\rho_{\text{olie}} = 900 \text{ kg/m}^3$ .
- 1.5 Door een schepsturbine die een vermogen levert van 10 MW, wordt de schroefas aangedreven. Om de rotatiefrequentie te reduceren wordt tussen de turbine en de as een tandwielkast geplaatst met een mechanisch rendement van 96%. Als de wrijvingswarmte door de smeeroilie wordt opgenomen waardoor deze een temperatuurstijging verkrijgt van  $12^{\circ}\text{C}$ , hoeveel ton olie wordt dan per uur aan de tandwielkast toegevoerd?  
 $c_{\text{olie}} = 1,7 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
- 1.6 a Het uitgaande vermogen van een tandwielkast met een mechanisch rendement  $x$  [%] is  $P_{\text{uit}}$  [kW]. De wrijvingswarmte wordt opgenomen door smeeroilie waarvan de temperatuurstijging  $\Delta T_{\text{olie}}$  bedraagt en de doorstromende hoeveelheid  $m_{\text{olie}}$  [kg per minuut]. Bepaal de soortelijke warmte  $c_{\text{olie}}$  [kJ]/(kg · K) van de olie uitgedrukt in de gegevens.  
b De smeeroilie wordt in een koeler weer op de begintemperatuur gebracht. Als de doorstromende hoeveelheid koelwater  $m_{\text{w}}$  [kg per uur] bedraagt, bereken dan de temperatuurstijging  $\Delta T_{\text{w}}$  van het koelwater, uitgedrukt in de gegevens.  
 $c_{\text{w}} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

- 1.7 Aan een verbrandingsmotor wordt per seconde 12,5 kJ chemische energie (brandstof) toegevoerd. De uitgaande as is gekoppeld aan een elektrische generator. Het ingaande vermogen hiervan bedraagt 5,0 kW (me.), het uitgaande vermogen is 4,5 kW (el.). Vervolgens wordt de elektrische energie toegevoerd aan een elektromotor die, via een verliesloze overbrenging, een gewicht van 500 N in 3 s over een afstand van 18 m omhoogbrengt. Bereken het rendement van de energieomzetting in de verbrandingsmotor, de generator en de elektromotor, alsmede het totale rendement van de energieomzetting.
- 1.8 Van een scheepsdieselmotor is het brandstofverbruik 60 g/MJ. Bereken het thermisch rendement van deze motor als de stookwaarde van de brandstof 40 MJ/kg bedraagt.
- 1.9 Een auto verbruikt in 1,25 uur 18 liter brandstof met een stookwaarde van 40 MJ/kg. Het geleverde vermogen bedraagt 30 kW. Bereken het thermisch rendement van de motor als de brandstof ( $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ ) volledig wordt verbrand.
- 1.10 Als het thermisch rendement van een elektrische centrale op 36% gesteld wordt en de prijs van elektrische energie 0,12 €/kWh bedraagt, bereken dan het procentuele aandeel van de brandstofkosten in de prijs van elektrische energie. Ruwe olie ( $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ ) met een stookwaarde van  $S = 40 \text{ MJ/kg}$  wordt ingekocht voor €40,- per vat van 159 liter.
- 1.11 Welk vermogen kan een windmolen met een wiekdiameter van 10 m leveren als 41,5% van de kinetische energie van de aanstromende lucht ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) nuttig wordt gebruikt? De windsnelheid bedraagt 8 m/s. Als voor een stad van een miljoen inwoners een vermogen van 1 000 MW moet worden opgesteld, hoeveel windmolens zou men dan nodig hebben? Wat wordt dit aantal als met een windsnelheid van 4 m/s moet worden gerekend?
- 1.12 Door een pomp, aangedreven door een dieselmotor, wordt elk uur  $50 \text{ m}^3$  water over een afstand van 90 m omhoog gebracht. Als in pomp en leidingen geen verliezen optreden en het thermisch rendement van de dieselmotor 30% bedraagt, bereken dan het brandstofverbruik in kg per uur. De stookwaarde van de brandstof is 40 MJ/kg,  $\rho_w = 1 000 \text{ kg/m}^3$  en  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .
- 1.13 Een straalmotor verbruikt per seconde 15 kg brandstof met een stookwaarde van 39 500 kJ/kg. De benodigde massa lucht is 125 maal zo groot als die van de brandstof. Men tracht de chemische energie van de brandstof om te zetten in snelheidsenergie van het gas. Als de snelheid  $c$  van het uitstromende gas 500 m/s bedraagt, hoe groot is dan het rendement van de energieomzetting en het vermogen dat de uittredende gasstraal vertegenwoordigt?
- 1.14 Een met kolen gestookte elektriciteitscentrale van 1 500 MW heeft een thermisch rendement van 40%. De stookwaarde van de brandstof is 30 MJ/kg, de massafractie as bedraagt 0,10. Bereken bij een bedrijfstijd van 5 700 uur per jaar:
- het kolenverbruik per jaar alsmede de brandstofkosten per jaar als de prijs van 1 ton kolen €150,- bedraagt;

- b de hoeveelheid as die de centrale in 25 jaar produceert;
- c de benodigde grondoppervlakte (in  $\text{m}^2$ ) als de as in een kuil van 5 m diepte wordt gestort.

$$\rho_{\text{as}} = 2\,500 \text{ kg/m}^3.$$

- 1.15** In een industriële installatie wordt per uur 12 ton stoom geproduceerd die vervolgens in een machine een vermogen levert van 4 000 kW. Het brandstofverbruik bedraagt 1 350 kg/h, de stookwaarde van de brandstof is 27 500 kJ/kg. Bereken het thermisch rendement van de installatie alsmede het rendement van de ketel als voor de omzetting van 1 kg water in stoom 2 500 kJ warmte nodig is.
- 1.16** In een elektriciteitscentrale moet aan de turbine per seconde 1 kg stoom worden toegevoerd voor de levering van een vermogen van 1 MW. De stoom wordt met een druk van 0,04 bar naar een condensor afgevoerd. Bij de condensatie die hierin optreedt, wordt per kg stoom 1 899,5 kJ warmte aan het koelwater afgestaan. De beschikbare hoeveelheid koelwater waarvan de temperatuurstijging maximaal 9 K mag zijn, bedraagt 72 000 ton per uur. Bepaal het maximale vermogen van de turbine die in de centrale mag worden opgesteld.  
 $c_w = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
- 1.17** Een compressor zuigt lucht aan met een onderdruk van 0,1 bar. De barometerstand is 720 mm kwik. Als bij de compressie de temperatuur constant blijft en het volume verkleind wordt tot  $\frac{1}{4}$  van de oorspronkelijke waarde, wat is dan de aanwijzing van een manometer in bar (overdruk) aan het einde van de compressieslag?  
 $\rho_{\text{kw}} = 13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .
- 1.18** In de luchtverhitter van een ketel wordt per uur 5 000  $\text{m}^3$  lucht verwarmd van 20 °C tot 250 °C. Hierbij treedt geen drukverlies op. Bereken de volumetoename in procenten alsmede het percentage waarmee de zijde van een vierkant luchtkanaal moet worden vergroot als de eis wordt gesteld dat de luchtsnelheid vóór en na de luchtverhitter gelijk moet zijn.
- 1.19** In een tank met een inhoud van  $60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  bevindt zich zuurstof van 140 bar en een constante temperatuur van 17 °C. Voor het lassen van een constructie is per minuut 10 liter zuurstof van 17 °C en een druk van 2,5 bar nodig. Deze zuurstof wordt aan het bovengenoemde vat onttrokken. Als aan het einde van de lasperiode de druk in het vat nog 98 bar bedraagt, hoeveel kilogram zuurstof is dan uit het vat ontweken en hoe lang heeft het lassen geduurd?  
 De molaire massa van zuurstof is 32 kg/kmol,  $R_a = 8\,315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ .
- 1.20** In een vat van 5  $\text{m}^3$  bevindt zich een gas dat van 0 °C tot 82 °C wordt verwarmd. Bij dit proces blijft de druk constant doordat het gas door een veiligheidsklep kan ontwijken. Hoeveel procent van de oorspronkelijke massa blijft in het vat achter?
- 1.21** In een zuurstoffles bevindt zich 50  $\text{dm}^3$  zuurstof van 17 °C en 150 bar. Als  $R = 260 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  bereken dan:

- a de temperatuur die de zuurstof heeft als de druk in het vat door warmte-toevoer tot 180 bar is opgelopen;
- b de druk en de dichtheid bij 17 °C resp. 0 °C als de helft van de zuurstof verbruikt is.
- 1.22** Een ketel met een rendement van 80% verbruikt per uur 200 kg olie met een stookwaarde van 40 MJ/kg. Per kilogram brandstof ontstaat bij de verbranding  $15 \text{ m}_n^3$  rookgassen ( $R = 280 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) die met 160 °C en een druk van 1 bar de ketel verlaten. Bereken:
- a de hoeveelheid rookgassen in kg/h;
- b de dichtheid hiervan zowel in de normaaltoestand als direct na de ketel;
- c het oppervlak van het rookkanaal na de ketel als de gassnelheid er 4 m/s bedraagt;
- d de stoomproductie van de ketel per uur, als voor de vorming van 1 kg stoom 3 000 kJ warmte aan het water moet worden toegevoerd.
- 1.23** Een ballon wordt volledig gevuld met  $250 \text{ m}^3$  helium van 20 °C en 1 bar. Op grote hoogte is de temperatuur van het gas  $-23 \text{ °C}$ , de druk  $\frac{2}{3}$  van de oorspronkelijke waarde en de dichtheid  $0,128 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Hoeveel  $\text{m}^3$  helium, betrokken op de begintoestand, is uit de ballon ontweken als de diameter gelijk is gebleven, en wat is de gasconstante  $R$ ?
- 1.24** Door zoninstraling wordt een gas ( $\text{CH}_4$ ) van 320 K, dat zich in een gesloten tank bevindt, 80 °C in temperatuur verhoogd. Als de warmtetoevoer 1 524 kJ bedraagt, bereken dan van dit gas:
- a de hoeveelheid gas in kg en in kmol;
- b de gasconstante  $R$  in  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  en de molaire gasconstante in  $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;
- c het percentage waarmee de druk in het vat is toegenomen.
- $c_v = 38,1 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ; relatieve atoommassa van koolstof is 12 en van waterstof 1.
- 1.25** a Van een gas is bekend dat bij 2 bar en 300 K de dichtheid  $\rho = a \text{ [kg}/\text{m}^3]$ . Als bovendien gegeven is dat 1 kmol van dit gas een massa heeft van  $b \text{ [kg]}$ , bereken dan het quotiënt  $b/a$ .
- b Voor de soortelijke warmte van een gas met een molaire massa van  $0,3p$  wordt opgegeven  $30 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ . Reken de laatstgenoemde waarde om in  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
- 1.26** In een gasmotor wordt 32% van de toegevoerde warmte in nuttige arbeid omgezet. Als aan de motor per uur 8 kmol gas met een molaire massa  $M = 16 \text{ kg}/\text{kmol}$  wordt toegevoerd, bepaal dan het geleverde motorvermogen en het brandstofverbruik in  $\text{m}_n^3/\text{MJ}$ . De stookwaarde van de brandstof bedraagt 21 MJ/kg.
- 1.27** Een gasmotor van 500 kW gebruikt per uur  $650 \text{ m}^3$  gas van 1 bar en 30 °C. De stookwaarde van dit gas is  $13 \text{ MJ}/\text{m}_n^3$ .
- a Als deze motor een ander gas zou gebruiken met een temperatuur van 47 °C, een druk van 0,85 bar en een stookwaarde  $S$  van  $30 \text{ MJ}/\text{m}_n^3$ , wat zou dan het gasverbruik per uur zijn? Het thermisch rendement van de motor blijft gelijk.
- b Wat is in het laatste geval het gasverbruik in  $\text{m}_n^3$  per MJ en wat is het thermisch rendement van de motor?

- 1.28** Een ballon met een inhoud van  $5 \text{ dm}^3$  wordt gevuld met  $3 \text{ dm}^3$  lucht van  $100 \text{ kPa}$  en  $57 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $4 \text{ dm}^3$  koolstofdioxide van  $175 \text{ kPa}$  en dezelfde temperatuur.  
Bepaal van dit mengsel de partiële drukken, de massaverhouding, de volumeverhouding en de gasconstante. Bereken de partiële drukken eveneens als door warmteafvoer bij constant volume de temperatuur is afgenomen tot  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .  
 $R_{\text{lu}} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $R_{\text{CO}_2} = 189 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
- 1.29** Tien kilogram gas ( $R = 297 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) wordt gemengd met  $5 \text{ kg}$  van een ander gas waarvan de gasconstante  $519 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  bedraagt. De temperatuur van de gasen is gelijk.  
Bereken de gasconstante van het mengsel, de volumeverhouding en de dichtheid bij  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $1,013 \text{ bar}$ . Hoe groot zijn de partiële drukken als de druk van het mengsel  $2 \text{ bar}$  bedraagt?
- 1.30** In een vat van  $5 \text{ m}^3$  bevindt zich lucht met een temperatuur van  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  en een druk van  $2 \text{ bar}$ . Men vult het vat verder met zoveel propaan van  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  dat het mengsel ten slotte een druk van  $10 \text{ bar}$  verkrijgt. De stookwaarde van het propaan is  $45 \text{ MJ}/\text{kg}$ .  
Bepaal de partiële drukken, de massa- en volumeverhoudingen, de gasconstante van het mengsel en de stookwaarde van het mengsel in  $\text{MJ}/\text{m}^3$ .  
 $R_{\text{lu}} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  en  $R_{\text{pr}} = 189 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
- 1.31** Een mengsel van waterstof en stikstof wordt zo samengesteld dat de volumeverhouding  $4 : 1$  bedraagt. De druk van het mengsel is  $3 \text{ bar}$  en de temperatuur  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .  
Bereken de benodigde massa stikstof en het vereiste volume van het opslagvat, beide per  $\text{kg}$  waterstof.  
 $R_a = 8315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ; relatieve atoommassa's:  $A_{\text{r,H}} = 1$  en  $A_{\text{r,N}} = 14$ .
- 1.32** Een mengsel van  $2 \text{ kmol CO}$  en  $6 \text{ kmol}$  lucht bevindt zich in een vat bij een temperatuur van  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  en een druk van  $2 \text{ bar}$ . Van lucht is de samenstelling in volumefracties:  $0,79$  stikstof en  $0,21$  zuurstof. Als voor de relatieve atoommassa's geldt dat  $A_{\text{r,C}} = 12$ ,  $A_{\text{r,O}} = 16$  en  $A_{\text{r,N}} = 14$ , bereken dan:  
a de massa  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  en  $\text{N}_2$ ;  
b het massapercentage koolstof in het mengsel.
- 1.33** Een gasmengsel bestaat uit  $56 \text{ kg CO}$  en  $96 \text{ kg O}_2$  van  $500 \text{ K}$ . Dit mengsel wordt bij een constante druk van  $3 \text{ bar}$  tot  $300 \text{ K}$  afgekoeld. Voor koolstofmonoxide is  $\bar{c}_p = 1,055 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  tussen  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $\bar{c}_p = 1,076 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  tussen  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Voor zuurstof zijn deze waarden resp.  $0,950 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  en  $0,979 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .  
 $R_a = 8315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ; relatieve atoommassa's:  $A_{\text{r,C}} = 12$  en  $A_{\text{r,O}} = 16$ .  
Bereken van dit gasmengsel:  
a het aantal kilomol  $\text{CO}$  en  $\text{O}_2$  en hun volumefracties;  
b de molaire massa en de gasconstante  $R_m$  in  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
c het volume van  $\text{CO}$  en  $\text{O}_2$  in de begintoestand;  
d de dichtheid in de begintoestand en in de normaaltoestand;  
e de af te voeren warmte  $Q_{1-2}$  in  $\text{MJ}$ .