

Vraagstukken Thermodynamica

W. Buijze
H.C. Meijer
E. Stammers
W.H. Wisman

© VSSD

Eerste druk 1989

Vierde druk 1998, verbeterd 2006-2010

Uitgegeven door de VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 2782124, telefax +31 15 2787585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL over dit boek en het theorieboek: <http://www.vssd.nl/hlf/c007.htm>

Voor docenten die het theorieboek adopteren zijn de collectie illustraties en een elektronische versie beschikbaar. Men kan de bestanden aanvragen bij e-mail hlf@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

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 90-407-1295-6

ISBN-13 978-90-407-1295-1

NUR 924

Trefw.: thermodynamica.

Voorwoord

De vraagstukken uit deze bundel worden gebruikt bij de werkcolleges Thermodynamica, die aan de TU-Delft worden gegeven voor studenten van verscheidene faculteiten. Sommige vraagstukken werden eens bedacht voor examens in dit vak. Andere vraagstukken zijn opgezet als een illustratie van de in de theorie aangesneden problemen en als oefenmateriaal. Veel van zulke vraagstukken werden vaak al jaren gebruikt en stammen nog uit de tijd dat prof.dipl.ing. J.B. Westerdijk zijn inspirerende lessen Thermodynamica gaf.

Wij hebben een verdeling in hoofdstukken aangebracht die ons, gelet op de structuur van het vak, zinvol lijkt. Omdat de inhoud van diverse colleges niet dezelfde is, kan men zo ook de voor een bepaalde faculteit gewenste hoofdstukken kiezen.

Delft, juni 1989

W. Buijze
E. Stammers
W.H. Wisman

Voorwoord bij tweede druk

Ten opzichte van de eerste druk is de belangrijkste verandering dat de indeling van de hoofdstukken is aangepast aan die van het leerboek 'Inleiding Thermodynamica' van W.H. Wisman (2e druk, Delft, 1991). Elke hoofdstuk uit deze bundel sluit qua nummer en naam aan bij een hoofdstuk uit dat boek. Het gevolg daarvan is dat geen vraagstukken voorkomen waarvan de nummers beginnen met 1, 5, 9, 11 en 12; die hoofdstukken lenen zich niet goed voor vraagstukken. Voor het overige zijn een aantal fouten hersteld en een paar vraagstukken toegevoegd.

Delft, oktober 1991

W. Buijze
E. Stammers
W.H. Wisman

Voorwoord bij derde druk

Ten opzichte van de tweede druk is weer een aantal fouten verbeterd. Verder is een enkel vraagstuk vervangen en zijn enkele vraagstukken toegevoegd. Van enkele vraagstukken (in de antwoordenlijst te herkennen aan de grijze achtergrond) is de uitwerking toegevoegd.

Delft, juli 1994

W. Buijze
H.C. Meijer
W.H. Wisman

Voorwoord bij vierde druk

Deze druk verschilt niet sterk van de vorige. Toch is er een aanzienlijk aantal foutjes en onnauwkeurigheden verbeterd en heeft in een enkel geval een vraagstuk een andere plaats gekregen, of is weggelaten. Tevens is (bijna) overal de eenheid kmol door de SI-eenheid mol vervangen. Wij zijn dr.ir. G.C.J. Bart erkentelijk voor zijn zeer ter zake doende op- en aanmerkingen.

Delft, juli 1998

De auteurs

Bericht bij de vierde verbeterde druk

Behalve voor de verbeteringen van enkele antwoorden op de vraagstukken (in het bijzonder die op vraagstuk 14.11) zijn we prof. Paul Van der Meeren van de Universiteit van Gent erkentelijk voor het aandragen van nog enkele uitwerkingen en van ander ondersteunend materiaal, zoals fasediagrammen en URL's. Deze informatie kan worden benaderd via <http://www.vssd.nl/hlf/c007.htm>

Voorts kent deze versie een aanpassing van de nummering van de hoofdstukken na hoofdstuk 8, waardoor deze nummering blijft aansluiten bij de nummering van de nieuwe, 5e editie van het theorieboek (ISBN 978-90-6562-252-5) dat binnenkort verschijnt.

Delft, augustus 2010

De uitgever

Inhoud

Voorwoord	5
Algemene gegevens	8
2. Warmteleer	9
3. De Eerste Hoofdwet	12
4. De Tweede Hoofdwet	20
5. Entropie	25
6. T,S- en H,S-diagrammen	27
7. Standaard vermogens- en koelcycli	34
8. De thermodynamische potentiaalfuncties	39
11. Fase-overgangen	41
12. Mengsels, legeringen en oplossingen	44
13. Vloeistofmengsels in evenwicht met hun dampen	46
14. Vormingsenthalpie en reactiewarmten; chemisch evenwicht	48
15. Andere thermodynamische systemen	55
16. Elektromagnetische straling	57
Uitwerkingen	58
Antwoorden	64

Algemene gegevens

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

$$R = 8,31 \text{ J/molK.}$$

$$\frac{c_p}{c_v} = \gamma.$$

Toestandsvergelijking 1 mol ideaal gas: $p v_m = RT$.

Toestandsvergelijking 1 mol vanderwaalsgas:

$$\left(p + \frac{a}{v_m^2} \right) (v_m - b) = RT.$$

Standaarddruk: $p_0 = 101,325 \text{ kPa} = \text{standaard atmosfeer.}$

Standaardtemperatuur: $T_0 = 298,15 \text{ K.}$

2

Warmteleer

2.1. Bereken R uit de toestandsvergelijking van een ideaal gas als gegeven is dat 1 mol van zo'n gas bij 1,014 bar en 0°C een volume heeft van $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

In welke eenheid is R uitgedrukt?

2.2. Uit stoomtabellen halen wij de gegevens dat bij 50 bar en 264°C het specifieke volume van stoom is $v_g = 0,03937 \text{ m}^3/\text{kg}$. Voor stoom is $M = 18 \text{ g/mol}$.

Beschouw de stoom als een ideaal gas en bereken R_{eff} hiervoor, in J/molK .

Hoeveel % is de afwijking t.o.v. de juiste waarde $R = 8,31 \text{ J/molK}$ voor een ideaal gas en trek uw conclusie.

2.3. Een ketel is voor $\frac{1}{3}$ gevuld met water en voor $\frac{2}{3}$ met stoom, de druk is 7 bar.

Bij die druk vinden wij in een stoomtabel voor de specifieke volumina :

$v_l = 1,108 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ en $v_g = 0,272 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Bereken de dampfractie x .

2.4. Vochtige lucht met een totale druk van 0,5 bar en 60°C heeft een relatieve vochtigheid van 60 %. De maximale dampspanning van water bij 60°C is 0,2 bar. Men comprimeert de vochtige lucht isotherm tot de helft van het oorspronkelijke volume. Lucht en waterdamp beschouwen wij als een ideaal gas.

a. Bereken de druk van de vochtige lucht in de eindtoestand.

b. Schets in één p, V -diagram apart het verloop van de druk van de lucht en de druk van de waterdamp bij deze compressie.

c. Bereken hoeveel procent van de oorspronkelijke massa waterdamp condenseert.

2.5. Toon aan dat de formule van Clausius-Clapeyron soms bij benadering kan worden geschreven als:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{rMp}{RT^2}.$$

Bepaal $p(T)$. Welke vereenvoudigingen/benaderingen heeft u dan gebruikt?

2.6. Van een stof mag men aannemen dat de dampfase zich gedraagt als een ideaal gas. Verder geldt: $v_l \ll v_g$.

a. Bewijs dat de vergelijking van Clapeyron geschreven kan worden als:

$$\ln(p) = A - \frac{B}{T}$$

Hierin zijn A en B constanten. Bepaal B .

3

De Eerste Hoofdwet

3.1. Tijdens een quasistatische isotherme toestandsverandering van een gas geldt: $pV = A + Bp + Cp^2$. A, B en C zijn constant en positief. Merk op dat dit geen toestandsvergelijking is.

Bereken de arbeid die moet worden verricht om dit gas van een druk p_1 te comprimeren tot een druk p_2 .

3.2. Een kg lucht – te beschouwen als ideaal gas – wordt verwarmd van $0\text{ }^\circ\text{C}$ tot $90\text{ }^\circ\text{C}$ zo, dat het volume constant blijft. De verwarming geschiedt quasistatisch.

Hoeveel warmte wordt gebruikt voor het verrichten van arbeid en hoeveel voor het vergroten van de inwendige energie van het gas? Hoeveel warmte is toegevoerd?

$$c_v = 0,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

3.3. Men laat 2 mol van een ideaal gas bij constante temperatuur van 300 K quasistatisch expanderen tot het volume driemaal zo groot is geworden.

Bereken de door het gas verrichte arbeid, alsook de door het gas opgenomen warmte.

3.4. Een kg lucht – te beschouwen als ideaal gas – wordt onder constante druk quasistatisch verwarmd van $20\text{ }^\circ\text{C}$ tot $70\text{ }^\circ\text{C}$. Hoeveel warmte wordt toegevoerd voor het verrichten van arbeid en hoeveel wordt gebruikt voor het vergroten van de inwendige energie van het gas? Bepaal M_{lucht} .

$$c_p = 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} ; c_v = 0,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

3.5. Een hoeveelheid lucht (ideaal gas) is opgesloten in een horizontaal opgestelde cilinder achter een zuiger die zonder wrijving kan bewegen. De buitenzijde van de zuiger is in contact met de buitenlucht (druk = 1 bar); bovendien is aan de buitenzijde van de zuiger een schroefveer bevestigd die een teruggedrukkende kracht uitoefent evenredig met de verplaatsing van de zuiger. Aanvankelijk is het volume van de lucht 10^{-3} m^3 , de temperatuur 200 K, de druk 1 bar; de veer is dan juist ontspannen. De temperatuur wordt langzaam verhoogd tot 400 K waarbij het volume toeneemt tot $1,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3$.

a. De veerconstante K is gelijk aan αS^2 , waar S het oppervlak van de zuiger is.

Bereken α .

b. Hoeveel arbeid is er tijdens de uitzetting door het gas verricht?

c. Gegeven is dat de molaire soortelijke warmte $c_{v,m} = \frac{5}{2}R$. Laat zien dat $nR = 0,5 \frac{\text{J}}{\text{K}}$