

ARIE TAAL

Boom

3E DRUK

TOEGEPASTE ENERGIELEER

Warmte- en stromingsleer



Toegepaste energieleer

Toegepaste energieleer

Warmte- en stromingsleer

ir. A.C. Taal

Derde druk

Boom

**inclusief
website!**



Met behulp van onderstaande unieke activeringscode kun je een studentaccount aanmaken op www.toegepasteenergieleer.nl, voor toegang tot extra materiaal bij dit boek. Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de derde druk. Na activering heb je twee jaar toegang tot de website. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende druk worden geactiveerd.

1e druk, 2005

2e druk, 2012

3e druk, 2019

Omslagontwerp: Dog & Pony, Amsterdam

Basisontwerp binnenwerk: Blom & Ruysink, Lexmond

Opmaak binnenwerk: Nu-nique grafische voemgeving, Goor

© Arie Taal & Boom uitgevers Amsterdam, 2019

ISBN 9789024403738

ISBN 9789024403745 (e-book)

NUR 173/961

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet 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 dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van (een) gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (art. 16 Auteurswet) kan men zich wenden tot de Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.nl).

No part of this book may be reproduced in any form, by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Woord vooraf

De energieleer behandelt de natuurkundige basis die nodig is om processen te analyseren waarin energieomzettingen of -transport plaatsvinden. In dit boek komen zowel warmteleer, stromingsleer als warmtetransport aan bod. Door deze onderwerpen in één studieboek te behandelen is het mogelijk de onderlinge samenhang aan te geven en dezelfde systematische aanpak en energiebalansvergelijkingen te gebruiken.

Het boek is ingedeeld in vier delen: energie: algemeen; thermodynamica; stromingsleer; en warmtetransport- en opslag. De hoofdstukken 1-3 bevatten de basiskennis ten behoeve van de warmteleer, stromingsleer en warmteoverdracht. In de hoofdstukken 4-9 over thermodynamica komen de ideale gaswetten, omkeerbare en niet-omkeerbare toestandsveranderingen, kringprocessen en open systemen aan bod. De hoofdstukken 10-12 over stromingsleer behandelen de stroming van gassen en vloeistoffen in buizen en om lichamen, in stationaire en instationaire systemen. In de hoofdstukken 13-16 over warmtetransport worden eveneens stationaire en instationaire warmtetransportproblemen besproken, onder andere het bepalen van warmteoverdrachtscoëfficiënten en het oplossen van stralingsnetwerken.

In dit boek is ernaar gestreefd om aan elke natuurkundige vergelijking een toegepast voorbeeld toe te voegen uit het domein van de werktuigbouwkunde. De inhoud is afgestemd op de uitgave *Toegepaste energietechniek*. Samen bieden deze boeken alle benodigde kennis om energetische systemen te analyseren en te ontwerpen.

Bij de derde druk

Deze geactualiseerde, derde druk bevat talloze uitgewerkte voorbeelden, om natuurkundige concepten en vergelijkingen toe te lichten aan de hand van concrete installaties of onderdelen uit de werktuigbouwkunde. Bij veel voorbeelden wordt gebruikgemaakt van simulatiesoftware om gevoeligheidsanalyses uit te voeren. Bij warmtetransportproblemen worden numerieke oplosmethoden behandeld.

Hulpbestanden

Bij dit boek hoort een website, www.toegepasteenergieleer.nl. Hier kunt u extra materiaal vinden zoals de invoerbestanden waarmee de figuren en voorbeelden in het boek uitgewerkt zijn. Door aanpassingen kan de student andere problemen doorrekenen.

Arie Taal

Inhoud

Woord vooraf v

Symbolenlijsten kengetallen en indices xii

1 Inleiding 1

- 1.1 Doel van het studieboek 1
- 1.2 Energieleer 2
- 1.3 Ontwerpen en onderzoeken energetische processen 3
- 1.4 Systeemkundige benadering 6
 - 1.4.1 Systeem 6
 - 1.4.2 Gesloten en open systemen 7
 - 1.4.3 Stationaire en instationaire systemen 8
 - 1.4.4 Processchema's 8
 - 1.4.5 Aspect en subsystemen 9
 - 1.4.6 Systeemgrenzen 9
 - 1.4.7 Modelleren 10

Deel 1 Energie: algemeen

2 Energievormen 13

- 2.1 Inleiding 13
- 2.2 Materiegebonden energievormen 14
 - 2.2.1 Kinetische energie 15
 - 2.2.2 Potentiële energie 15
 - 2.2.3 Inwendige energie 16
 - 2.2.4 Kernenergie 18
 - 2.2.5 Chemische energie 18
- 2.3 Arbeid 19
 - 2.3.1 Wrijving 20
 - 2.3.2 Arbeid bij vloeistoffen en gassen 21
 - 2.3.3 Arbeid bij roterende bewegingen 22
 - 2.3.4 Arbeid bij elektriciteit 23
 - 2.3.5 Vermogen bij arbeidsleverende of -vragende processen 23
- 2.4 Warmte 25
 - 2.4.1 Warmtestromen 26
 - 2.4.2 Warmtestroomdichtheid 26
 - 2.4.3 Warmtetransport door geleiding 28
 - 2.4.4 Warmtetransport door convectie 30
 - 2.4.5 Warmtetransport door straling 31
 - 2.4.6 Gecombineerde warmtetransport 34
- 2.5 Specifieke energie 35
- 2.6 Samenvatting 36
- 2.7 Oefenvraagstukken 39

3 Toestandsgrootheden en stofeigenschappen 41

- 3.1 Toestandsgrootheden 41
- 3.2 Stofeigenschappen 42
 - 3.2.1 Dichtheid 43
 - 3.2.2 Soortelijke warmte 43
 - 3.2.3 Warmtegeleidingcoëfficiënt 45
 - 3.2.4 Viscositeit 45
- 3.3 Afgeleide toestandsgrootheden 47
 - 3.3.1 Volume 47
 - 3.3.2 Enthalpie 47
 - 3.3.3 Entropie S 48
- 3.4 Specifieke toestandsgrootheden 48
- 3.5 Aggregatietoestanden 49
- 3.6 Ideale gassen 50
- 3.7 Reële gassen 53
- 3.8 Mengsels 54
 - 3.8.1 Ideale gasmengsels 58
- 3.9 Technische media 61
 - 3.9.1 Water 61
 - 3.9.2 Vochtige lucht 64
- 3.10 Samenvatting 72
- 3.11 Oefenvraagstukken 73

4 Energieomzetting 77

- 4.1 Omkeerbare en niet-omkeerbare processen 78
- 4.2 Balansvergelijkingen 79
 - 4.2.1 Integrale balansen 79
 - 4.2.2 Differentiële balansen 80
 - 4.2.3 Differentiebalansen 81
- 4.3 De behoudswetten 82
 - 4.3.1 Massabalans 82
 - 4.3.2 Impulsbalans 84
 - 4.3.3 Impulsmomentbalans 86
 - 4.3.4 Energiebalans 87
- 4.4 Efficiency van energetische systemen 88
 - 4.4.1 Mechanisch rendement 89
 - 4.4.2 Thermisch rendement 90
 - 4.4.3 Coëfficiënt of Performance 91
 - 4.4.4 Primary Energy Ratio 93
- 4.5 Samenvatting 95
- 4.6 Oefenvraagstukken 96

Deel 2 Thermodynamica

5 Gesloten systemen 99

- 5.1 Inleiding 99
- 5.2 Eerste hoofdwet van de thermodynamica voor gesloten systemen 100

- 5.3 Toestandsveranderingen 106
 - 5.3.1 Polytrope toestandsverandering 107
 - 5.3.2 Toestandsverandering waarbij de druk constant blijft 112
 - 5.3.3 Toestandsverandering waarbij het volume constant blijft 114
 - 5.3.4 Toestandsverandering waarbij geen warmte-uitwisseling met de omgeving is 115
 - 5.3.5 Toestandsverandering waarbij de temperatuur constant blijft 117
 - 5.3.6 Kringprocessen 120
 - 5.4 Samenvatting 126
 - 5.5 Oefenvraagstukken 127
-

6 Theoretische kringprocessen 131

- 6.1 Inleiding 131
 - 6.2 Arbeidsleverende processen 132
 - 6.2.1 De specifieke arbeid 133
 - 6.2.2 Het thermisch rendement 136
 - 6.2.3 Het Carnotproces 137
 - 6.2.4 Het Ottoproces 142
 - 6.2.5 Het Joule- en Braytonproces 148
 - 6.3 Koude- en warmteleverende kringprocessen 155
 - 6.3.1 Koudefactor en warmteproductiegetal 156
 - 6.3.2 Het Carnotproces 156
 - 6.3.3 Het Jouleproces 160
 - 6.4 Samenvatting 163
 - 6.5 Oefenvraagstukken 164
-

7 Open systemen 167

- 7.1 Inleiding 167
 - 7.2 Eerste hoofdwet voor een open systeem 168
 - 7.3 Werktuigen en apparaten 172
 - 7.3.1 Pomp 172
 - 7.3.2 Straalbuis 174
 - 7.3.3 Smoorvoorziening 175
 - 7.3.4 Warmtewisselaar 177
 - 7.3.5 Ketel 179
 - 7.3.6 Waterturbine 180
 - 7.3.7 Compressor 181
 - 7.3.8 Turbine 195
 - 7.4 Kringprocessen 197
 - 7.5 Samenvatting 199
 - 7.6 Oefenvraagstukken 200
-

8 Niet-omkeerbaarheden 203

- 8.1 Inleiding 203
- 8.2 Isentropisch rendement 204

- 8.3 Entropie 206
 - 8.3.1 Entropieverandering bij omkeerbare toestandsveranderingen 209
 - 8.3.2 Entropieverandering bij niet-omkeerbare toestandsveranderingen 212
 - 8.3.3 TS-diagram 216
 - 8.4 Thermisch rendement 217
 - 8.5 Exergie en anergie 222
 - 8.6 Samenvatting 224
 - 8.7 Oefenvraagstukken 225
-

9 Werkelijke kringprocessen 227

- 9.1 Inleiding 227
 - 9.2 De stoomturbine-installatie 228
 - 9.2.1 Het Carnotproces in het coëxistentiegebied 228
 - 9.2.2 Rankineproces met oververhitting 234
 - 9.2.3 Het niet-omkeerbare stoomproces met oververhitting 238
 - 9.2.4 Stoomproces met heroververhitting 241
 - 9.2.5 Rankineproces met voedingswatervoorverwarming 246
 - 9.3 Gasturbine 250
 - 9.3.1 Het Braytonproces 250
 - 9.3.2 Gasturbine met niet-omkeerbare compressor en turbine 252
 - 9.3.3 Gasturbine met voorverwarming van de gecomprimeerde lucht 255
 - 9.3.4 Gasturbine met meertrapscompressie 258
 - 9.3.5 Gasturbine met herverhitting 262
 - 9.3.6 Reële gassen 266
 - 9.4 Compressiekoelmachine en -warmtepomp 267
 - 9.4.1 Compressiekoelmachine en -warmtepomp met oververhitte damp 267
 - 9.4.2 Compressiekoelmachine met meertrapscompressie 274
 - 9.5 Samenvatting 278
 - 9.6 Oefenvraagstukken 281
-

Deel 3 Stromingsleer

10 Wrijvingsloze onsamendrukbare stroming 285

- 10.1 Inleiding 285
 - 10.2 Massa- en energiebalans in een stationaire situatie 285
 - 10.3 De massabalans voor een stationaire, onsamendrukbare stroming 286
 - 10.4 De energiebalans voor een stationaire onsamendrukbare stroming 288
 - 10.5 De impulsbalans 299
 - 10.6 De impulsmomentbalans 308
 - 10.6.1 De centrifugaalpomp 308
 - 10.7 Stationaire wrijvingsloze vloeistofstroming 313
 - 10.8 Samenvatting 315
 - 10.9 Oefenvraagstukken 316
-

11 Wrijvingsloze gasstroming 319

- 11.1 Inleiding 319
- 11.2 Energiebalans voor stationaire isentropische gasstroming 319
 - 11.2.1 Geluidssnelheid 323

- 11.3 Massastroom bij isentropische gasstroming 324
 - 11.3.1 Maximale massastroom 327
 - 11.4 Supersonische stroming 330
 - 11.5 Samenvatting 337
 - 11.6 Oefenvraagstukken 339
-

12 Stroming met weerstand 341

- 12.1 Stationaire onsamendrukbare buisstroming met weerstand 341
 - 12.1.1 Bepaling van de weerstandscoefficiënt 344
 - 12.1.2 Pompkarakteristiek 356
 - 12.1.3 Systeemkarakteristiek 357
 - 12.1.4 Bedrijfspunt 358
 - 12.2 Stationaire onsamendrukbare stroming langs lichamen 359
 - 12.3 Samenvatting 365
 - 12.4 Oefenvraagstukken 366
-

Deel 4 Warmtetransport en -opslag

13 Stationair warmtetransport 369

- 13.1 Inleiding 369
 - 13.2 Differentiële warmtebalansen voor warmteoverdracht 370
 - 13.3 Warmtebalansen voor vlakke platen en wanden 375
 - 13.4 Warmtebalansen voor cilinders en staven 387
 - 13.4.1 Randvoorwaarde 1: Leiding met opgelegde wandoppervlakte-temperaturen 387
 - 13.4.2 Randvoorwaarde 2: Leiding met gegeven fluïdumtemperaturen 388
 - 13.5 Warmtewisselaars 396
 - 13.5.1 Het gemiddelde temperatuurverschil 397
 - 13.5.2 Uitgaande temperaturen bij een warmtewisselaar 400
 - 13.6 Numerieke oplosmethode 404
 - 13.6.1 Eendimensionale modellen 404
 - 13.7 Samenvatting 418
 - 13.8 Oefenvraagstukken 421
-

14 Instationair warmtetransport 423

- 14.1 Inleiding 423
- 14.2 De methode van de uniforme temperatuur 423
- 14.3 Halfoneindig medium 429
- 14.4 Numerieke oplosmethoden 432
 - 14.4.1 Stappenplan 432
 - 14.4.2 Expliciete methode 435
 - 14.4.3 Impliciete methode 447
- 14.5 Samenvatting 452
- 14.6 Oefenvraagstukken 453

15 Warmteoverdracht door convection 455

- 15.1 Inleiding 455
- 15.2 Gedwongen convection 456
 - 15.2.1 Gedwongen convection langs een vlak oppervlak 458
 - 15.2.2 Gedwongen convection in een rechte, cilindervormige buis 460
 - 15.2.3 Gedwongen convection dwars op een rechte cilinder 462
 - 15.2.4 Gedwongen convection langs een bol 465
 - 15.2.5 Gedwongen convection bij een pijpbundel 465
- 15.3 Natuurlijke convection 471
 - 15.3.1 Natuurlijke convection langs een verticaal, vlak oppervlak 472
 - 15.3.2 Natuurlijke convection langs een horizontaal, vlak oppervlak 474
 - 15.3.3 Natuurlijke convection langs een horizontale cilinder 478
 - 15.3.4 Natuurlijke convection langs een verticale cilinder 481
 - 15.3.5 Natuurlijke convection langs een bol 483
- 15.4 Vergroting warmte-uitwisselend oppervlak 484
 - 15.4.1 Het vinrendement 491
 - 15.4.2 Vineffect 496
- 15.5 Samenvatting 497
- 15.6 Oefenvraagstukken 499

16 Warmteoverdracht door straling 501

- 16.1 Inleiding 501
- 16.2 Intensiteit 502
- 16.3 Zichtfactoren 511
- 16.4 Straling tussen twee of meer oppervlakken 522
- 16.5 Samenvatting 529
- 16.6 Oefenvraagstukken 530

Bijlage 1: Wiskunde 533

- 1 Differentiëren 533
 - 1.1 Differenties 533
 - 1.2 Differentialen 534
 - 1.3 Partiële afgeleiden 536
- 2 Integreren 536
- 3 Vectoren 518
 - 3.1 Inwendig product 538
 - 3.2 Uitwendig product 538

Bijlage 2: Medieueigenschappen 539

Bijlage 3: Log *ph*-diagrammen 553

- Antwoorden 557
- Trefwoordenregister 561

Symbolenlijsten, kengetallen en indices

Symbolen

A	m^2	oppervlak
An	J	anergie
A_o	m^2	omhullend oppervlak
C	varieert	constante
C	N/m	veerconstante
COP	–	Coëfficiënt Of Performance
C_w	–	weerstandscoefficiënt
D	m	diameter
E	J	energie
E_z	W/m^2	emittantie van en zwarte straler
Ex	J	exergie
F	N	kracht
F	–	zichtfactor
H	J	enthalpie
H	m	hoogte
I	A	stroomsterkte
I	W/m^2	intensiteit (straling)
J	W/m^2	radiantie (straling)
L	m	lengte
L_s	m	karakteristieke lengte
M	Nm	moment/koppel
O	m	omtrek
P	W	vermogen
P_t	W	technisch vermogen
P_{stuw}	W	wtuwvermogen bij straalmotor
PER	–	Primary Energy Ratio
Q	J	warmte
R	m	arm van moment
R	m	straal
R	K/W	warmteweerstand
R	m^{-2}	stralingsweerstand
R_l	m^2K/W	warmteweerstand lucht op lucht
R_s	J/kgK	specifieke gasconstante
S	J/K	entropie
T	K of °C	temperatuur

U	J	inwendige energie
U	V	potentiaalverschil
U	W/m ² K	warmtedoorgangscoefficiënt
V	m ³	volume
V_S	m ³	slagvolume
W	J	arbeid
W_t	J	technische arbeid
Z	–	samendrukbaarheidsfactor

Kengetallen

Bi	–	kengetal van Biot
Fo	–	kengetal van Fourier
Gr	–	kengetal van Grashof
Ma	–	kengetal van Mach
Nu	–	kengetal van Nusselt
Pr	–	kengetal van Prandtl
Ra	–	kengetal van Rayleigh
Re	–	kengetal van Reynolds

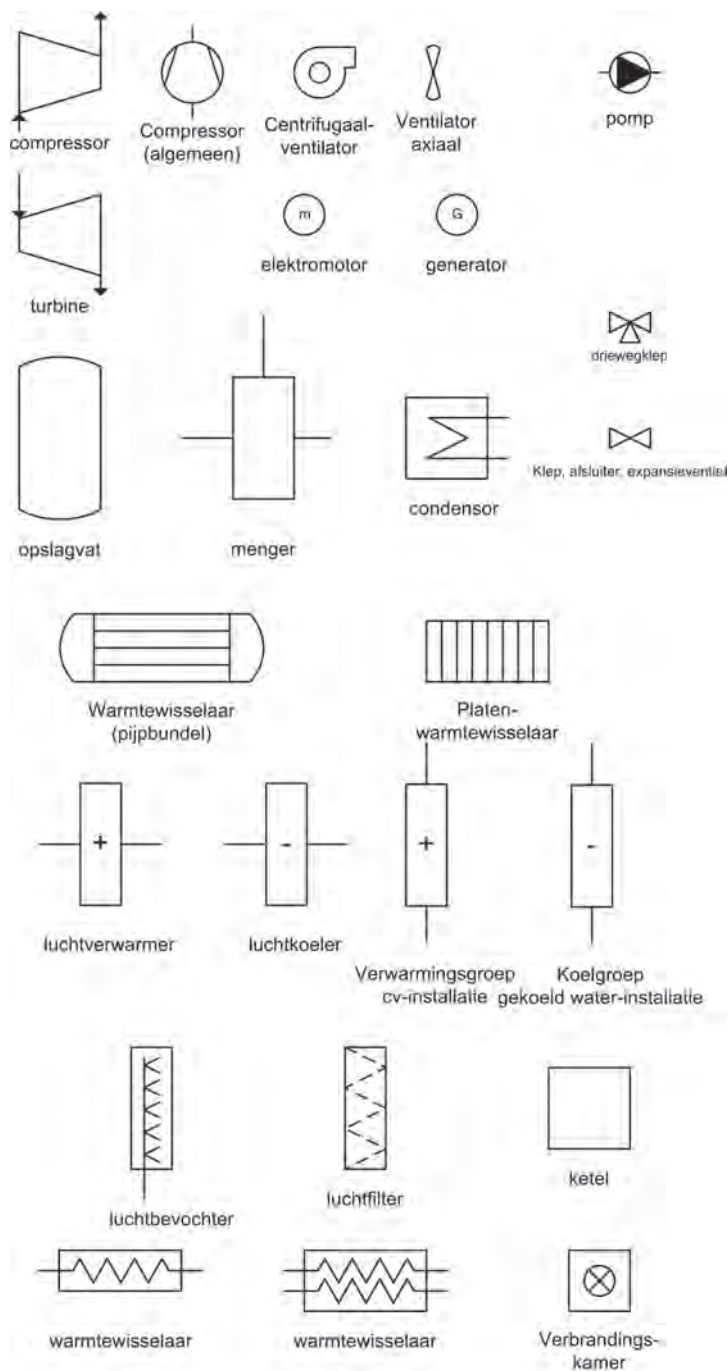
Symbolen

a	–	drukverhouding bij Seiligerproces
a	m/s	geluidssnelheid
a	m/s ²	versnelling
a	–	absorptiecoëfficiënt
a	m ² /s	temperatuurvereffeningscoëfficiënt
b	m	breedte
b	–	volumeverhouding bij Seiligerproces
c	J/kgK	soortelijke warmte
c_p	J/kgK	soortelijke warmte bij constante druk
c_v	J/kgK	soortelijke warmte bij constant volume
c	m/s	lichtsnelheid
c	m/s	absolute snelheid
d	m	diameter
d	m	dikte
e	J/kg	specifieke energie
e	m	wandruwheid
f_w	–	wrijvingscoëfficiënt
g	W/m ³	warmteproductie per volume-eenheid
g	m/s ²	zwaartekrachtversnelling
h	m	hoogte
h	J/kg	specifieke enthalpie
h_o	J/kg	onderste verbrandingswaarde
k	–	exponent van de isentroop

l	m	lengte
m	kg	massa
n	–	exponent van de polytroop
n	omw/min	toerental
p	Pa	druk
q	J/kg	specifieke warmte
q	C	elektrische lading
r	m	straal (coördinaat)
r	J/kg	verdampingswarmte
r	–	reflectiecoëfficiënt
s	m	afstand
s	J/kgK	specifieke entropie
t	s	tijd
t	–	transmissiecoëfficiënt
u	J/kg	specifieke inwendige energie
u	m/s	omtreksnelheid
v	m ³ /kg	specifiek volume
v	m/s	snelheid
w	J/kg	specifieke arbeid
w	m/s	relatieve snelheid
x	m	coördinaat
x	–	massamengverhouding (motoren)
x	–	dampgehalte
x	kg/kg	absolute vochtigheid
y	m	coördinaat
y	–	massafractie
z	m	coördinaat
z	m	hoogte
θ	rad	coördinaat bij bolcoördinaten
Φ_m	kg/s	massastroom
Φ_v	m ³ /s	volumestroom
Φ_w	W	warmtestroom
Ψ	–	uitwisselingsfactor (straling)
α	W/m ² K	totale warmteoverdrachtscoëfficiënt
α_c	W/m ² K	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt
α_s	W/m ² K	totale warmteoverdrachtscoëfficiënt

α	rad	hoek
β	rad	schoephoek
ε	–	compressieverhouding bij zuigermotor
ε	–	emissiecoëfficiënt
ε	–	koudefactor
ε	–	relatieve wand ruwheid
ε_w	–	warmteproductiegetal
ε_{vin}	–	vineffect
ζ	–	weerstandcoëfficiënt
η	Ns/m ²	dynamische viscositeit
η	–	rendement
η_{th}	–	thermisch rendement
η_{m}	–	mechanisch rendement
η_{td}	–	thermodynamisch rendement
η_{is}	–	isentropisch rendement
η_{ww}	–	rendement van een warmtewisselaar
η_{k}	–	temperatuurrendement van het koude fluïdum
η_{w}	–	temperatuurrendement van het warme fluïdum
η_{stuw}	–	voortstuwingsrendement
η_{vin}	–	vinrendement
λ	W/mK	warmtegeleidingcoëfficiënt
λ	m	golflengte
λ	–	luchtfactor bij verbrandingsproces
λ	–	wrijvingscoëfficiënt bij stroming
λ_{exp}	–	expansiefactor bij zuigercompressor
π	–	drukverhouding bij compressor, turbine of gasturbine
ρ	kg/m ³	dichtheid
σ	W/m ² K ⁴	constante van Stefan-Boltzmann
τ	Pa	schuifspanning
τ	s	tijdconstante
φ	W/m ²	warmtestroomdichtheid
φ	rad	coördinaat bij cilindercoördinaten
Φ	rad	coördinaat bij bolcoördinaten
Φ	–	relatieve vochtigheid
ω	rad/s	hoeksnelheid

Schema's



Indices

Brayton	Braytonproces	min	minimaal
Carnot	Carnotproces	N	normaal
Joule	Jouleproces	n	onder normaal condities
Otto	Ottoproces	nb	natte bol
Rankine	Rankineproces	no	niet-omkeerbaar
Seiliger	Seiligerproces	nt	netto
Stirling	Stirlingproces	omg	omgeving
aandr	aandrijving	omk	omkeerbaar
aanz	aangezogen	opp	oppervlak
af	afgevoerd	opt	optimaal
begin	begintoestand	p	potentieel
br	brandstof	pr	primaair
ch	chemisch	prod	productie
compr	compressor	syst	binnen systeem
d	damp	sg	systeemgrenzen
dl	droge lucht	tan	tangentieële component
dp	dauwpunt	td	thermodynamisch
fluïdum	ongestoorde fluïdum	th	thermisch
gem	gemiddeld	theor	theoretisch
hydr	hydraulisch	toe	toegevoerd
i	binnen	tot	totaal
in	ingaand	turb	turbine
is	isentropisch	u	buiten
eind	eindtoestand	uit	uitgaand
elek	elektrisch	V	volume
hd	hoge druk	vl	vloeistof
k	kinetisch	w	warmte
k	koud medium	w	warm medium
kr	kritisch	w	weerstand/wrijving
ld	lage druk	wd	waterdamp
ln	natuurlijke logaritme	werk	werkelijk
lucht	vochtige lucht	wr	wrijving
m	massa	wt	waterturbine
m	mengsel	ww	warmtewisselaar
max	maximaal		

1 Inleiding

1.1 Doel van het studieboek

Energie is essentieel voor het leven en de maatschappij. De zon zorgt voor biologisch leven en in de maatschappij is er behoefte aan processen waarbij energie omgezet wordt, of materie of energie verplaatst wordt. Te denken valt aan de elektriciteitsproductie, de aandrijving van een auto en de levering van warmte of koude ten behoeve van het klimatiseren van ruimten.

Door energie is het mogelijk om een inspanning te leveren, bijvoorbeeld het hijsen van een last, of organismen te laten leven en groeien, bijvoorbeeld het gebruik van zonlicht en -warmte door planten.

In dit boek houden we ons bezig met de natuurkunde die een rol speelt bij technische processen. Deze processen worden gerealiseerd door energetische werktuigen, componenten en/of installaties die de vereiste technische specificaties moeten hebben om een energiefunctie te vervullen. Belangrijke technische specificaties zijn het vermogen en de energie-efficiëntie bij energieomzetting en/of -overdracht.

In onderstaande tabel is een, niet uitputtend, overzicht gegeven van installaties, werktuigen en apparaten waarin energie omgezet of overgedragen wordt.

TABEL 1.1 Overzicht van energetische installaties en apparaten

Installatie	Werktuig/apparaat
Stoominstallatie	Verbrandingsmotor
Gasturbine	Pomp
Koudeinstallatie	Ketel Warmtepomp
Luchtbehandelinginstallatie	Warmtewisselaar
STEG-installatie	Turbine
Straalmotor	Compressor Condensor Verdamper Koeltoren Leiding Brandstofcel Luchtkanaal Straalbuis Accu

In dit boek worden de fysische vergelijkingen aangereikt waarmee energetische processen en de daarin voorkomende installaties, werktuigen en/of apparaten ontworpen of geanalyseerd kunnen worden. De fysische vergelijkingen bestaan veelal uit energiebalansen die uitgewerkt zijn voor specifieke energieprocessen. Zo komen we energievergelijkingen tegen voor warmteoverdracht, energieomzetting en voor vloeistof- en gastransport.

1.2 Energieleer

Energie komen we in de natuurkunde onder andere tegen bij de vakgebieden mechanica, elektriciteitsleer, thermodynamica, stromingsleer en warmteoverdracht.

Mechanica

Bij processen waarbij lichamen versneld of vertraagd worden maken we gebruik van de mechanica om deze processen te beschrijven. Bij deze processen spelen arbeid en krachten een rol.

Elektriciteitsleer

Elektriciteit is een vorm van arbeid. Met elektriciteit is het mogelijk om mechanische energie te leveren (elektromotor). We kunnen ook energie opslaan in de vorm van elektrische lading. Dit onderdeel wordt in dit boek niet behandeld.

Thermodynamica

In de thermodynamica wordt de natuurkunde behandeld waarbij energieomzettingen plaatsvinden, zoals de omzetting van thermische energie in mechanische energie. Bij technische processen worden vaak gebruikgemaakt van gassen en vloeistoffen die toestandsveranderingen ondergaan. In de hoofdstukken 4 t/m 9 wordt dit onderdeel van de energieleer behandeld.

Stromingsleer

De stromingsleer houdt zich bezig met het transport van vloeistoffen en gassen. Bepaald kan worden wat er gebeurt met de druk, snelheid, dichtheid en temperatuur van het stromende medium en hoe uit een stromend medium arbeid verkregen kan worden (bijvoorbeeld straalmotor) of hoe de druk van een medium verhoogd kan worden (bijvoorbeeld centrifugaalpomp). Dit onderdeel van de energieleer wordt behandeld in de hoofdstukken 10 t/m 12.

Warmtetransport

De warmtetransportleer, zie hoofdstukken 13 t/m 16, behandelt hoe warmte overgedragen wordt van het ene naar het andere medium, maar ook hoe het opwarm- en afkoelgedrag van een lichaam bepaald kan worden.

In dit studieboek komen de meest voorkomende balansvergelijkingen aan bod. In specifieke toepassingen kan het nodig zijn dat de balansvergelijkingen zelf opgesteld moeten worden. Te denken valt aan het afkoel- of opwarmgedrag van producten met geometrisch ingewikkelde vormen en gasstromingen met warmteoverdracht. In hoofdstuk 2 wordt dat behandeld.

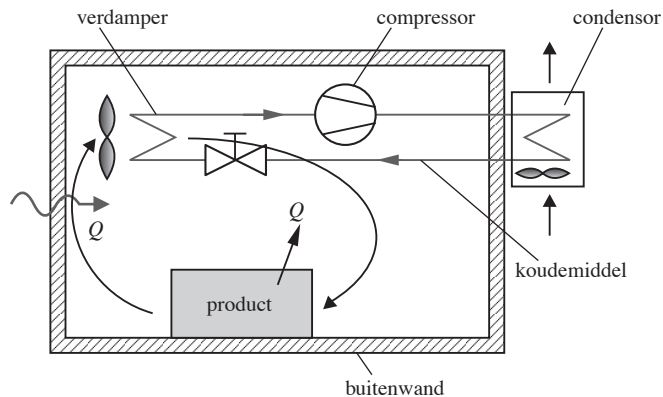
1.3 Ontwerpen en onderzoeken energetische processen

Bij het ontwerpen van technische processen waarin energie een rol speelt, is het uitgangspunt altijd de eindgebruiker van energie. Zo zal bij de energiefunctie 'ruimteverwarming' het benodigde verwarmingsvermogen de benodigde afmetingen en vermogens van de installatie en van de daarin aanwezige componenten bepalen. Om de energiefunctie te vervullen wordt er een energetisch proces ontworpen. Vaak is het mogelijk om te kiezen uit verschillende energetische processen. Zo kunnen we elektriciteit leveren met zonnecellen, windmolens, gasturbines of elektriciteitscentrales. De keuze uit de alternatieven wordt gebaseerd op vele aspecten: investeringskosten, milieuaspecten, afmetingen, energiegebruik, enzovoort. Met de in dit boek behandelde energieleer is een schatting te maken voor de maximaal haalbare energie-efficiëntie van de alternatieven. Wanneer er een keuze gemaakt is, wordt er ingezoomd op de energiefuncties binnen het beschouwde energetische systeem. Zo kan een verbrandingsmotor uitgevoerd worden als een gasmotor met of zonder een turbocompressor. Ook voor deze componenten wordt een keuze gemaakt. Aan het einde van het ontwerpproces vindt de materialisatie van de installatieonderdelen of apparaten plaats: de afmetingen en materialen worden bepaald. Zo zal van een warmtewisselaar het benodigde warmte-uitwisselend oppervlak en de dikte en materiaal van de wand bepaald worden.

Hieronder is een aantal voorbeelden gegeven waarbij de energieleer toegepast wordt.



Voorbeeld 1.1 De koelcel



FIGUUR 1.1

De koelcel

In de koelcel worden producten onder omgevingstemperatuur bewaard. Om het koelvermogen van de koude-installatie te bepalen moeten eerst de warmteverliezen door de buitenwanden van de koelcel (zie hoofdstuk 13) en het afkoelvermogen van nieuw ingebrachte, warme producten (zie hoofdstuk 14) bepaald worden. De door de verdamer op te nemen warmtestroom wordt door middel van een compressor

verplaatst naar de condensor, waar vervolgens aan de buitenlucht warmte afgevoerd wordt.

Het benodigde compressorvermogen en de door de condensor af te geven warmtestroom zijn te bepalen met de theorie van thermische kringprocessen (zie de hoofdstukken 6 en 9). In de koelmachine ondergaat het koudemiddel toestandveranderingen (zie hoofdstuk 3 voor de toestandsgrootheden die bij energieomzettingen een rol spelen). Voor en na de componenten (verdampers, compressor, verdampers en expansieventiel) is de toestand van het medium te bepalen met de theorie voor open systemen (zie hoofdstuk 7).

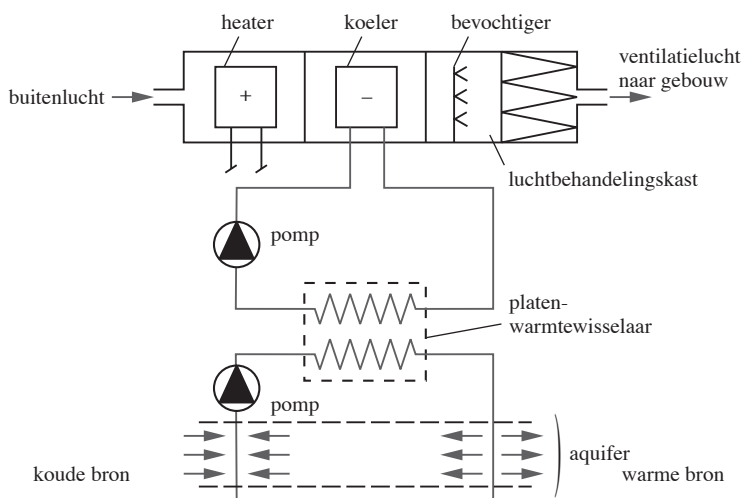
Wanneer we de componenten ontwerpen, bepalen we de afmetingen van onderdelen. Bij een warmtewisselaar, zoals de verdampers en condensor, zijn dat het warmte-uitwisselend oppervlak en de dikte van de wanden; bij een compressor de cilinderlengte en -diameter en de diameters van de in- en uitlaatpoorten die de stromingsweerstand (zie hoofdstuk 12) beïnvloeden.

Wanneer in de zuigercompressor van de koelmachine het koudemiddel gecompri-meerd wordt, kan de theorie van gesloten systemen toegepast worden (zie hoofdstuk 5). Bij de luchtgekoelde condensor wordt via convectie warmte overgedragen. Om de warmteoverdracht te bevorderen wordt het warmte-uitwisselend oppervlak met lamellen vergroot en wordt er een ventilator toegepast (zie hoofdstuk 15 voor de warmteoverdracht door convectie).



Voorbeeld 1.2 De aquiferinstallatie

In Nederland wordt voor koeling en verwarming regelmatig gebruikgemaakt van koude- en warmteopslag in aquifers. In figuur 1.2 is het gedeelte van de aquiferinstallatie gegeven waarbij buitenlucht gekoeld wordt door de aquiferinstallatie.



FIGUUR 1.2
De aquiferinstallatie

De pomp in de aquiferinstallatie zuigt koud water aan uit de koude bron. Hierdoor stijgt de temperatuur in het aquifer doordat het onttrokken water in de koude bron bijgevuld wordt met warm water uit de zandlaag van het aquifer. Door de bronnen van het aquifer op te delen in elementen met een vaste temperatuur en warmtebalansen op te stellen voor deze elementen is via numerieke oplosmethoden (zie paragraaf 14.4) de temperatuur in de elementen te bepalen.

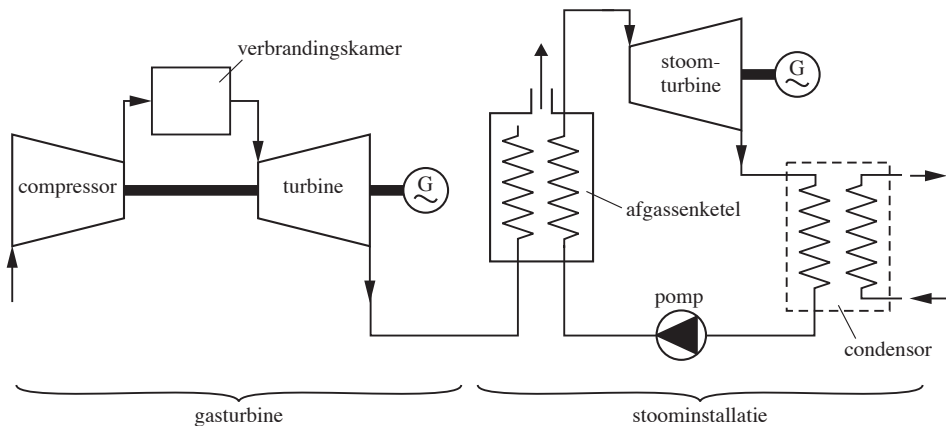
In de platenwarmtewisselaar wordt warmte onttrokken uit het gekoelde water dat in de koeler in de luchtbehandelingkast opgewarmd is. Met het afgekoelde water is warme buitenlucht af te koelen. De afmetingen van de platenwarmtewisselaar is te bepalen via de theorie in paragraaf 13.5. Het water wordt door een pomp getransporteerd van de platenwarmtewisselaar naar de koeler. De opvoerdruk van deze pomp wordt bepaald door de weerstandsverliezen die het stromende water ondergaat (zie paragraaf 12.1). In de luchtbehandelingkast kan de aangezogen buitenlucht ont- of bevochtigd worden. De daarvoor benodigde energie is te bepalen met de in hoofdstuk 3 behandelde theorie over mengsels en vochtige lucht.

De behandelde ventilatielucht wordt naar de vertrekken gevoerd waar deze ingeblazen wordt (dit is in figuur 1.2 niet gegeven).



Voorbeeld 1.3 STEG-installatie

De STEG-installatie bestaat uit twee installaties: de gasturbine gekoppeld aan de stoominstallatie. Zie figuur 1.3. Beide leveren elektriciteit. De uitlaatgassen van de gasturbine worden benut om in een afgassenketel stoom te produceren.



FIGUUR 1.3 De STEG-installatie

De componenten in de installatie, compressor, turbine, afgassenketel, stoomturbine, condensor en pomp zijn open systemen (zie hoofdstuk 7). De gasturbine en de stoominstallatie zijn te beschouwen als kringprocessen (deze worden behandeld in hoofdstuk 6 en 9).

1.4 Systemkundige benadering

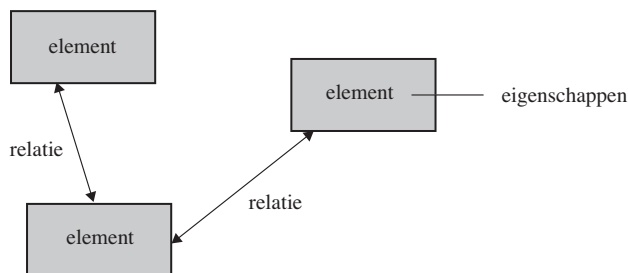
Bij de oplossing van energetische problemen is een gestructureerde systemkundige aanpak aan te bevelen.

1.4.1 Systeem

Een systeem wordt in de systemkunde gedefinieerd als een verzameling van elementen met de daarbij behorende relaties. Bij een energetisch systeem kunnen de elementen componenten, stromende media of onderdelen van apparaten zijn zoals de wand in een warmtewisselaar. De elementen hebben eigenschappen zoals energie-inhoud, temperatuur en druk.

FIGUUR 1.4

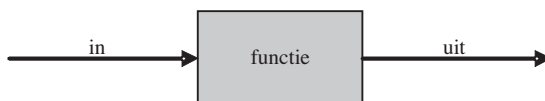
Een systeem bestaat uit elementen en de relaties tussen deze elementen



Een systeem waarin de relaties bestaan uit in- en uitgaande stromen naar en van elementen kunnen we weergeven door een *functieschema*:

FIGUUR 1.5

Functieschema



In de systemkunde maakt men onderscheid tussen de volgende stromen:

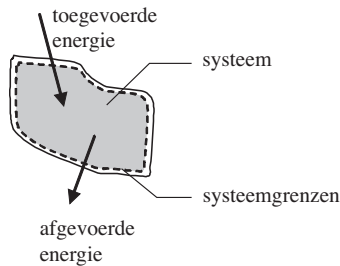
- materiestromen,
- energiestromen,
- informatiestromen.

Bij energetische systemen spelen de energiestromen en de materiestromen, doordat daarmee materiegebonden energie getransporteerd wordt, een belangrijke rol.

1.4.2 Gesloten en open systemen

Wanneer we een proces ontwerpen of analyseren moeten we eerst het te beschouwen systeem vastleggen door middel van het aanbrengen van systeemgrenzen, zie figuur 1.6. De systeemgrenzen worden weergegeven door een streeplijn.

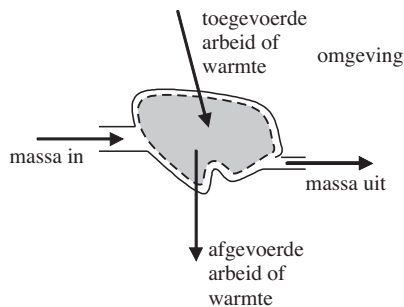
FIGUUR 1.6
De systeemgrenzen
worden weer-
gegeven door
een streeplijn



Over de systeemgrenzen wordt energie toe- en/of afgevoerd.

Wanneer er geen massa over de systeemgrenzen stroomt, spreken we over een gesloten systeem en anders over een open systeem. Via de massa wordt dan ook materiegebonden energie toegevoerd en afgevoerd. Zie figuur 1.7.

FIGUUR 1.7
Bij een open systeem
stroomt massa over
de systeemgrenzen



Het systeem buiten de systeemgrenzen wordt omgeving genoemd.



Voorbeeld 1.4 Gesloten systeem

Een afgesloten vat waarin een gas aanwezig is, bijvoorbeeld verbrandingsgassen in een motorcilinder waarbij de in- en uitlaatkleppen gesloten zijn, is een gesloten systeem.



Voorbeeld 1.5 Open systeem

Een cv-pomp is een open systeem. Aan de pomp wordt water toegevoerd dat in druk verhoogd wordt.

1.4.3 Stationaire en instationaire systemen

Bij het modelleren van energetische processen wordt onderscheid gemaakt tussen systemen waar de tijd wel of geen rol speelt en de toestand van het systeem wel of geen verandering ondergaat.

Onder de toestand van een systeem wordt verstaan de waarden van de eigenschappen in het systeem op een bepaald tijdstip. Wanneer de toestand in de tijd niet verandert, dat wil zeggen dat de toestandgrootheden druk, temperatuur, massa, volume, enzovoort constant blijven, spreken we van een *stationair systeem* en anders van een *instationair systeem*.

Bij een stationair systeem is er sprake van een eenduidige relatie tussen de uitvoer en invoer van het systeem, dat wil zeggen dat wanneer de invoer bekend is, de uitvoer ook bekend is. We kunnen het systeem dan opvatten als een blackbox. Te denken valt aan een pomp die een aantal uren aanstaat en gedurende deze tijdsduur dezelfde massastroom water levert.

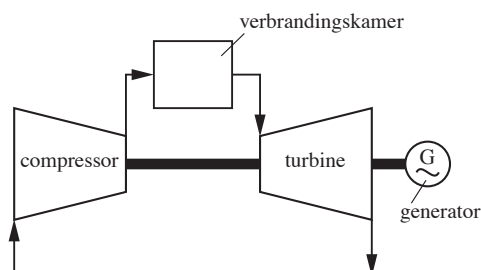
Wanneer de tijd wel een belangrijke rol speelt, zoals bij het opwarmen van een vertrek of het leeglopen van een vloeistof vat, worden er andere energetische vergelijkingen gehanteerd. Zie paragraaf 10.6 en hoofdstuk 14 waarin de instationaire stroming en warmtetransport behandeld worden.

1.4.4 Processchema's

Het is gebruikelijk in de energietechniek om *processchema's* te gebruiken waarin de relatie tussen verschillende werktuigen en apparaten weer te geven is door het verbinden van processymbolen.



Voorbeeld 1.6 Processchema van een gasturbine



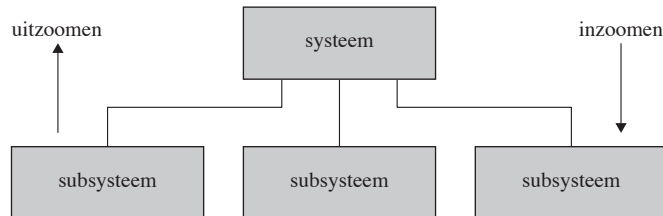
FIGUUR 1.8
Processchema

In de symbolenlijst worden de processymbolen, die in dit boek gebruikt worden, verklaard.

1.4.5 Aspect en subsystemen

Het systeem onderzoeken we voor een bepaald doel. Daarbij bekijken we meestal een bepaald aspect. Bij energetische systeem is dat het aspect energie. Alleen de eigenschappen van elementen en relaties tussen elementen die te maken hebben met het energetisch aspect worden dan bekeken.

Een systeem kan onderverdeeld worden in subsystemen. Zo zal een gasturbine onder andere het subsysteem compressor bevatten, dat op zijn beurt weer het subsysteem waaier bevat. Wanneer we vanuit een systeem kijken naar de subsystemen, zijn we aan het *inzoomen* en wanneer we vanuit het subsysteem kijken naar het systeem waar het subsysteem deel van uit maakt, zijn we aan het *uitzoomen*.

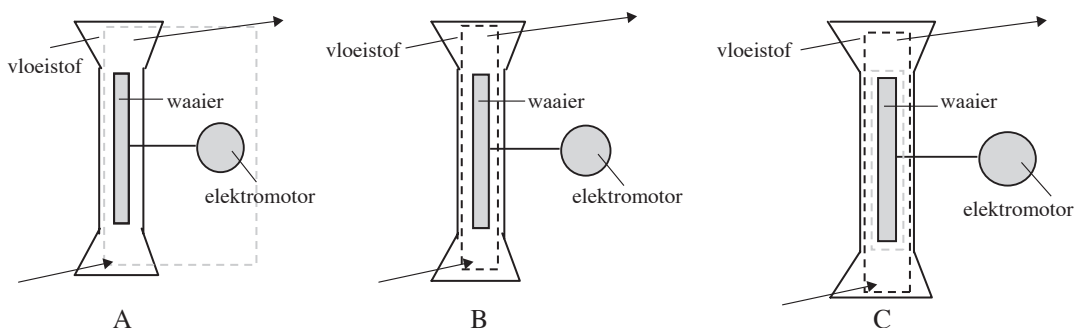


FIGUUR 1.9
Een systeem bestaat uit subsystemen

Wanneer we een installatie ontwerpen is het gebruikelijk om vanuit het gehele systeem de subsystemen te ontwerpen. We zullen tijdens het ontwerpen steeds meer op de subsystemen inzoomen.

1.4.6 Systeemgrenzen

De keuze van de systeemgrenzen van een systeem wordt bepaald door wat we willen onderzoeken en/of ontwerpen.



FIGUUR 1.10 Wat we willen onderzoeken bepaalt de systeemgrenzen

In figuur 1.10 is een voorbeeld gegeven van de keuze van systeemgrenzen bij een cv-pomp. In Figuur 1.10A zien we dat de elektromotor binnen de systeemgrenzen valt. In figuur 1.10B valt de elektromotor buiten de grenzen en in figuur 1.10C wordt alleen naar de vloeistof gekeken.

1.4.7 Modelleren

De werkelijkheid benaderen we door een *model* te maken. In het model nemen we alleen de elementen (of subsystemen) en aspectsystemen in beschouwing die voor ons onderzoek of ontwerp van belang zijn. We vereenvoudigen dus de werkelijkheid door een model. Vaak zal er een fysisch model gemaakt worden. Een fysisch model bestaat uit natuurkundige vergelijkingen voor het beschouwde systeem. Ook het fysisch model bestaat uit vereenvoudigingen en aannames. Voor een deel doordat we onvoldoende informatie hebben en voor een deel om de berekeningen te vereenvoudigen. Elke natuurkundige vergelijking bevat aannames en is alleen geldig onder bepaalde omstandigheden. Afhankelijk van het doel van de berekeningen zijn de afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid wel of niet gerechtvaardigd. Zo zal de wet van Newton $F = ma$ in bijna alle technische problemen exact zijn.

In dit studieboek worden onder andere massa en energie als onafhankelijke grootheden opgevat, terwijl we weten dat volgens Einstein massa in energie omgezet kan worden volgens $E = mc^2$. Verder zullen we lucht en zelfs verbrandingsgassen als een ideaal gas beschouwen waardoor de berekeningen eenvoudiger worden. En veelal veronderstellen we dat de stofeigenschappen constant zijn terwijl die meestal afhankelijk zijn van temperatuur en druk.

Bij warmteoverdracht door convectie kan de berekende warmteoverdrachtscoëfficiënten een onnauwkeurigheid hebben van meer dan 100%. Bij gevoeligheidsonderzoeken is dat meestal geen probleem. Het gaat er dan immers om, om te onderzoeken wat de kleinste of grootste warmteoverdracht kan zijn in een bepaalde situatie.

Deel 1

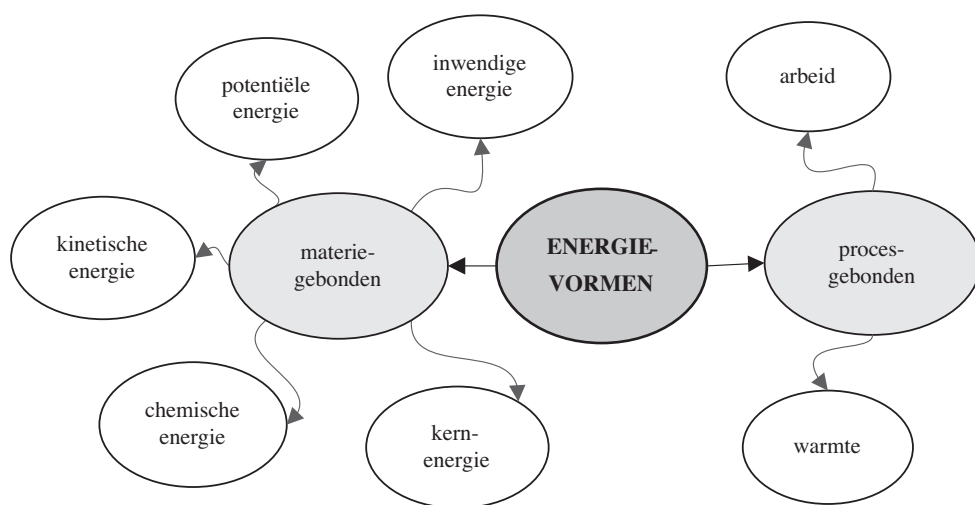
Energie: algemeen

2 Energievormen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de *energievormen* behandeld.

Energie komen we in verschillende vormen tegen, bijvoorbeeld als chemische energie, elektrische energie, mechanische energie en kinetische energie. Zo heeft een brandstof chemisch gebonden energie en is wind feitelijk lucht met een hoeveelheid kinetische energie. We kunnen onderscheid maken tussen materie- en procesgebonden energievormen. Zie figuur 2.1.



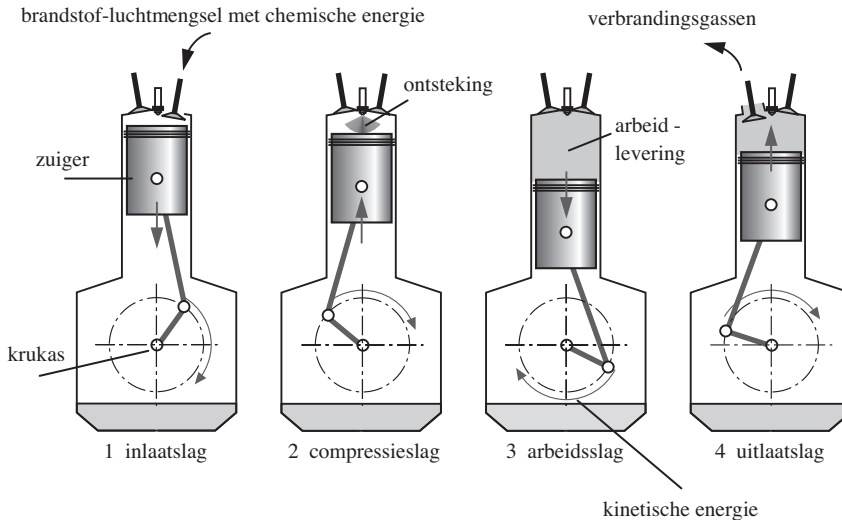
FIGUUR 2.1 Energievormen

De *materiegebonden energievormen* zijn gekoppeld aan een hoeveelheid materie. Ten gevolge van energetische processen kan de energievorm veranderen. Ook kan de energiehoeveelheid toe- of afnemen. Er zijn twee mogelijkheden om energie uit te wisselen tussen materie, via arbeid of warmte. Doordat warmte en arbeid tijdens een proces uitgewisseld worden, noemen we warmte en arbeid *procesgebonden energievormen*.



Voorbeeld 2.1 Automotor

Een voorbeeld van een werktuig waarin we verschillende energievormen tegenkomen is de *verbrandingsmotor*. In figuur 2.2 is de werking van een vierslagbenzinemotor weergegeven.



FIGUUR 2.2 De werking van een vierslagbenzinemotor

Aan de motor wordt een brandstof-luchtmengsel toegevoerd aan de cilinders. Na het comprimeren van dit mengsel (hiervoor is arbeid nodig) wordt de energievorm chemische energie in de brandstof omgezet in de energievorm warmte, waardoor de inwendige energie stijgt. Vervolgens wordt tijdens de arbeidsslag inwendige energie omgezet in arbeid. Deze arbeid zorgt ervoor dat de krukas kinetische energie krijgt. Ten behoeve van de koeling van de motoronderdelen wordt er warmte overgedragen aan het koelwater dat door de motor circuleert.

2.2 Materiegebonden energievormen

Een systeem heeft een bepaalde energiehoeveelheid. Deze bestaat uit een uitwendig en inwendig deel. Het uitwendige deel is zichtbaar aan bijvoorbeeld de snelheid dat het systeem heeft; het inwendige deel wordt bepaald door de temperatuur en druk in het systeem.

De energiehoeveelheid van een *materiegebonden energievorm* is evenredig met de massa van het voorwerp.

2.2.1 Kinetische energie

Bewegende materie heeft een *kinetische energie* die evenredig is met haar massa m en haar snelheid v in het kwadraat.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [2.1]$$

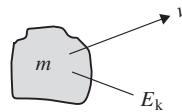
waarin:

E_k = kinetische energie [J]

m = massa [kg]

v = snelheid [m/s]

FIGUUR 2.3
Kinetische energie



Voorbeeld 2.2 Kinetische energie

Een *auto* van 1200 kg rijdt met een snelheid van 100 km/h. De kinetische energie van

$$\text{deze auto is dan } E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1200 \cdot \left(\frac{100\,000}{3600} \right)^2 = 462\,963 \text{ J} = 463 \text{ kJ}$$

Wanneer de massa niet bekend is, maar wel het volume, kan de massa m bepaald worden uit:

$$m = \rho V \quad [2.2]$$

waarin:

ρ = dichtheid [kg/m³]

V = volume [m³]

2.2.2 Potentiële energie

Op de aarde werkt op materie de zwaartekracht, de aantrekkingskracht door de aarde. Hoe verder een voorwerp verwijderd is van het middelpunt van de aarde, hoe groter de energiehoeveelheid. Er is namelijk energie nodig om het voorwerp te verwijderen en deze energie kan weer vrij beschikbaar komen. Deze energie staat bekend als de *potentiële energie*. Bij de bepaling van de potentiële energie speelt de afstand tot een horizontaal referentievlak waarvoor de potentiële energie nul gesteld wordt, een rol. Doordat alleen hoogteverschillen een rol spelen bij energetische berekeningen zijn we vrij om zelf een horizontaal referentievlak te kiezen.

$$E_p = mgz \quad [2.3]$$

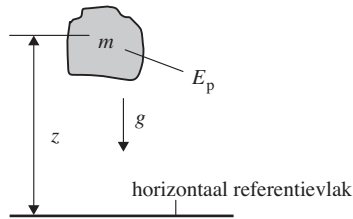
waarin:

E_p = potentiële energie [J]

g = zwaartekrachtversnelling [m/s^2]; gemiddeld is $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ op aarde

z = hoogte ten opzichte van horizontaal referentievlak [m]

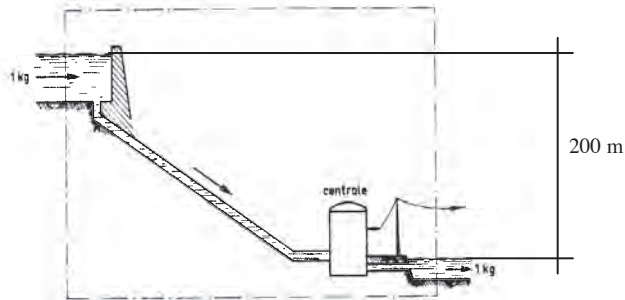
FIGUUR 2.4
Potentiële energie



Voorbeeld 2.3 Potentiële energie

Gegeven is een *waterkrachtcentrale*. In het stuwmeer voor deze centrale staat het water 200 m hoger dan in de rivier achter de stuwdam.

FIGUUR 2.5
Waterkrachtcentrale



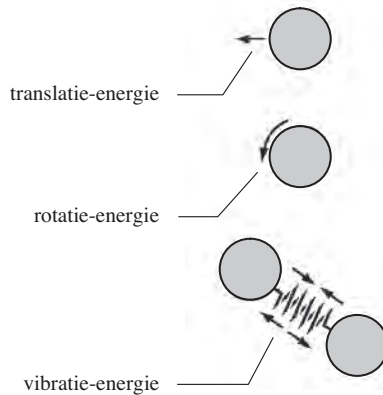
Voor een kilogram water aan het oppervlak van het stuwmeer geldt:

$$E_p = mgz = 1 \cdot 9,81 \cdot 200 = 1964 \text{ J}$$

2.2.3 Inwendige energie

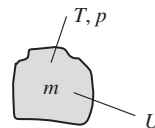
Elke stof is opgebouwd uit atomen of moleculen die in beweging kunnen zijn en/of die op elkaar aantrekkende krachten uitoefenen. Materie heeft daardoor ook inwendig kinetische en potentiële energie. De kinetische energie wordt translatie-energie genoemd. Ook binnen de moleculen kan er energie aanwezig zijn doordat atomen in de moleculen om elkaar heen kunnen wentelen (rotatie-energie) en trillingen ten opzichte van elkaar uitvoeren (vibratie-energie).

FIGUUR 2.6
Inwendige energie
bestaat uit
translatie-,
rotatie- en
vibratie-energie



De *inwendige energie* is de som van bovengenoemde energieën. Zie figuur 2.6. De waarde van de temperatuur en de druk heeft een relatie met de inwendige energie.

FIGUUR 2.7
Inwendige energie



Net als bij de potentiële energie wordt er een nulniveau voor de inwendige energie gedefinieerd. Aangezien vele technische processen boven $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ plaatsvinden, wordt de inwendige energie veelal nul gesteld bij $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Voor ideale gassen, die worden behandeld in hoofdstuk 3, geldt dat de inwendige energie van de temperatuur afhangt volgens:

$$U = mc_V T \quad [2.4]$$

waarin:

U = inwendige energie [J]

c_V = soortelijke warmte bij constant volume [J/kgK]

T = temperatuur [$^{\circ}\text{C}$]

Vergelijking [2.4] kunnen we ook toepassen op vaste stoffen en vloeistoffen.



Voorbeeld 2.4 Inwendige energie

Een blok staal van 10 kg heeft een temperatuur van $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wat is de inwendige energie?

Vloeistoffen en vaste stoffen zijn nagenoeg onsamendrukbaar. Dat wil zeggen dat het volume nagenoeg constant blijft. Er geldt dan dat $c_V = c$.

Uit tabel B2.3 in bijlage 2 volgt dat de soortelijke warmte van staal $c = 460 \text{ J/kgK}$.

Uit [2.4] volgt dan

$$U = mc_v T = mc \Delta T = 10 \cdot 460 \cdot 50 = 230\,000 \text{ J} = 230 \text{ kJ}$$

2.2.4 Kernenergie

Elk atoom heeft een bepaalde *bindingsenergie*. Door kernsplitsing of kernfusie is het mogelijk dat er nieuwe atomen gevormd worden. Wanneer de massa na de reactie afgenomen is, dan zal het verschil in massa, het *massadefect*, omgezet zijn in kinetische energie van de reactieproducten. Deze kinetische energie is gelijk aan het verschil tussen de bindingsenergie voor en na de reactie. Volgens Einstein geldt:

$$E_{\text{kern}} = mc^2 \quad [2.5]$$

waarin:

E_{kern} = kernenergie [J]

c = lichtsnelheid [m/s]

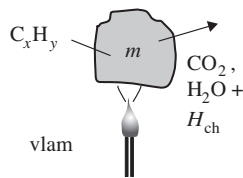


Voorbeeld 2.5 Kernenergie

Bij de kern splitsing in een *kerncentrale* kan een atoom uranium U 235 gesplitst worden in de atomen strontium Sr en xenon Xe. Bij volledige splijting van 1 g U 235 komt $8,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$ energie vrij waarvan het grootste gedeelte in de vorm van warmte. Met deze warmte is het mogelijk om vloeibaar water om te zetten in stoom.

2.2.5 Chemische energie

Een voorwerp bestaat uit moleculen die door een chemisch proces kunnen veranderen. Bij het chemische proces kan warmte vrij komen. Bij een brandstof die bestaat uit koolwaterstoffen zal per kg brandstof als warmte de *verbrandingswaarde* vrijkomen.



FIGUUR 2.8
Chemische energie

Bij verbranding ontstaat het verbrandingsproduct water (H_2O) dat in dampvorm aanwezig is in de verbrandingsgassen. Wanneer bij afkoeling van de verbrandingsgassen de waterdamp condenseert, komt er verdampingswarmte vrij naast de warmte die vrijkomt door temperatuurdaling. De totaal vrijkomende warmte staat bekend als de *bovenste verbrandingswaarde* h_b en de vrijkomende warmte zonder de verdampingswarmte als de *onderste verbrandingswaarde* h_o . Wij hanteren in overeen-

stemming met Europese afspraken de onderste verbrandingswaarde waardoor we de chemische energie kunnen definiëren als:

$$H_{\text{ch}} = m_{\text{br}} h_0 \quad [2.6]$$

waarin:

H_{ch} = chemische energie [J]

m_{br} = massa van de brandstof [kg]

h_0 = onderste verbrandingswaarde [J/kg]

De onderste verbrandingswaarde wordt ook wel *stookwaarde* genoemd.



Voorbeeld 2.6 Chemische energie

Een brandstoftank in een auto bevat 30 L benzine. De verbrandingswaarde van benzine is 42,7 MJ/kg en de dichtheid van benzine is 702 kg/m³. De energie-inhoud van de brandstoftank is:

$$H_{\text{br}} = m_{\text{br}} h_0 = \rho_{\text{br}} V h_0 = 702 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 42,7 = 899 \text{ MJ}$$

2.3 Arbeid

Arbeid is de energie die door een kracht geleverd wordt. Wanneer de kracht constant is, geldt:

$$W = F \Delta s$$

waarin:

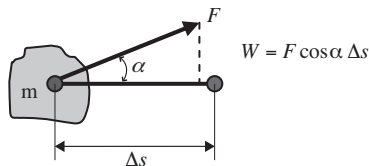
W = arbeid [J]

F = kracht [N]

Δs = afgelegde weg [m]

De kracht en afgelegde weg moeten op elkaar geprojecteerd worden. Zie figuur 2.9.

Deze vermenigvuldiging heet het *inwendig product* (zie bijlage 1).



FIGUUR 2.9
Arbeid

**Voorbeeld 2.7 Arbeid**

Een auto rijdt een afstand van 100 km op de snelweg en ondervindt daarbij een weerstandskracht van 450 N. De arbeid die verricht wordt is dan:

$$W = F\Delta s = 450 \cdot 100 \cdot 10^3 = 4,5 \cdot 10^7 = 45 \text{ MJ}$$

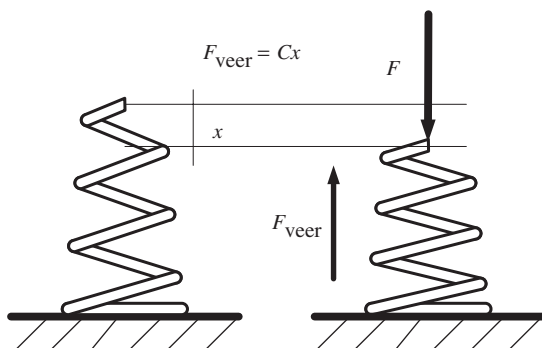
Wanneer de kracht varieert, zullen we moeten integreren om de arbeid te kunnen bepalen:

$$W = \int F ds \quad [2.7]$$

In de integraal $W = \int F ds$ worden tijdens de afgelegde weg de verschillende $F\Delta s$ bij elkaar opgeteld. Zie bijlage 1, waar het integreren toegelicht wordt.

**Voorbeeld 2.8 Arbeid bij veer**

Voor een zuivere veer geldt dat de veerkracht evenredig is met de indrukking: $F_{\text{veer}} = C \cdot x$ waarin C = veerconstante [N/m] en x = indrukking [m]. Zie figuur 2.10.



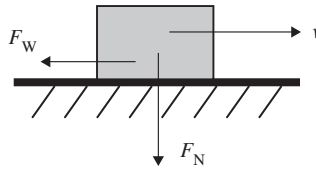
FIGUUR 2.10
Veerkracht

Gegeven is een veer met een veerconstante ter grootte van 100 000 N/m. Deze veer wordt 5 cm ingedrukt. Hoe groot is de benodigde arbeid om deze veer in te drukken?

$$W = \int_{x=0}^{x=0,05} F_{\text{veer}} dx = \int_{x=0}^{x=0,05} Cx dx = C \frac{1}{2} x^2 \Big|_0^{0,05} = 100\,000 \cdot \frac{1}{2} (0,05^2 - 0) = 75 \text{ J}$$

2.3.1 Wrijving

Een bijzondere vorm van arbeid is de *wrijvingsarbeid*. Wanneer twee lichamen met elkaar in contact zijn en verschillende snelheden hebben, zal er een kracht nodig zijn om ze ten opzichte van elkaar te laten bewegen. Zie figuur 2.11.



FIGUUR 2.11
Wrijvingskracht

De wrijvingskracht die optreedt bij droge wrijving tussen twee vaste lichamen kan bepaald worden door:

$$F_w = f_w F_N \quad [\text{N}]$$

waarin:

F_w = wrijvingskracht [N]

f_w = wrijvingscoëfficiënt [-]

F_N = normaalkracht [N]

De wrijvingsarbeid is volgens [2.7] gelijk aan: $W = \int F_w ds$

2.3.2 Arbeid bij vloeistoffen en gassen

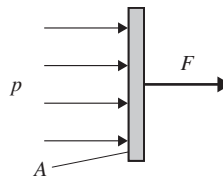
Bij gassen en vloeistoffen is er sprake van een *druk* die een kracht uitoefent op oppervlakken, zie figuur 2.12, volgens:

$$F = pA \quad [2.8]$$

waarin:

p = druk van vloeistof of gas [Pa]

A = oppervlakte waarop druk uitgeoefend wordt.



FIGUUR 2.12
 $F = pA$

Hiermee volgt voor de arbeid bij gassen en vloeistoffen uit [2.7] en [2.8]:

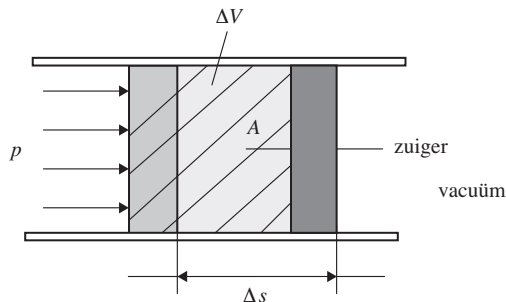
$$W = \int F ds = \int p A ds = \int p dV \quad [2.9]$$

waarin dV = het verplaatste volume [m^3].



Voorbeeld 2.9 Arbeid bij persluchtinstallatie

De compressor van een persluchtinstallatie levert lucht van 5 bar. De lucht duwt een zuiger met een diameter van 2 cm weg over een afstand van 5 cm. Zie figuur 2.13.



FIGUUR 2.13

$$W = p\Delta V$$

1 bar komt overeen met 10^5 Pa. De door de persinstallatie geleverde arbeid is:

$$\begin{aligned} W &= p\Delta V = pA\Delta s = p \frac{\pi}{4} d^2 \Delta s = \\ &= 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi}{4} (2 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 7,85 \text{ J} \end{aligned}$$

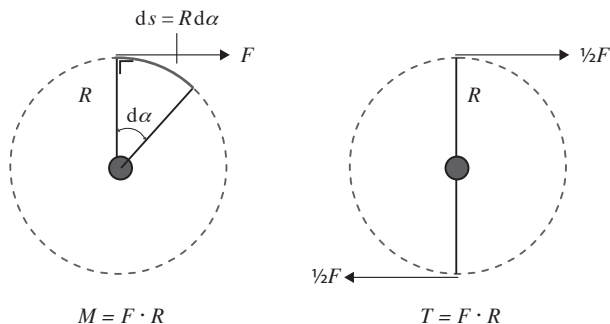
2.3.3 Arbeid bij roterende bewegingen

Bij roterende bewegingen, bijvoorbeeld bij energieoverbrengingen met tandwielen, wordt er met *momenten* gerekend:

$$M = F \times R \quad [2.10]$$

waarin F en R loodrecht op elkaar moeten staan. Zie figuur 2.14.

Dit product wordt een *uitwendig product* genoemd. Zie bijlage 1.



FIGUUR 2.14

Moment bij een roterende beweging

Wanneer er tegenoverliggende krachten aanwezig zijn die tegengesteld gericht zijn, zoals in figuur 2.14 weergegeven is, spreken we over een koppel T . Het koppel is dus een bijzondere vorm van een (kracht)moment en komen we bijvoorbeeld tegen bij verbrandingsmotoren.

De afgelegde weg ds bij een cirkelvormige beweging waarbij een hoek $d\alpha$ doorlopen wordt (zie figuur 2.14) kan als volgt bepaald worden:

$$ds = \frac{d\alpha}{2\pi} \cdot O \text{ waarin } O \text{ de cirkelomtrek is: } O = 2\pi R$$

$$\text{Hiermee wordt } ds: ds = \frac{d\alpha}{2\pi} \cdot 2\pi R = R d\alpha$$

Dit levert voor de arbeid op:

$$W = \int F ds = \int \frac{M}{R} ds = \int M \frac{R d\alpha}{R} = \int M d\alpha \quad [2.11]$$

waarin:

M = moment [Nm]

α = doorlopen hoek roterende beweging [rad]



Voorbeeld 2.10 Arbeid bij V-riemaandrijving

Gegeven is een V-riemschijf met een diameter van 0,5 m. Het koppel dat via de V-riem overgedragen wordt is 50 Nm. De arbeid na 20 omwentelingen bedraagt dan:

$$W = M\Delta\alpha = M \cdot 2\pi \cdot 20 = 50 \cdot 2\pi \cdot 20 = 6283 \text{ J} = 6,28 \text{ kJ}$$

2.3.4 Arbeid bij elektriciteit

Ook via *elektriciteit* kan er arbeid geleverd worden:

$$W = Uq \quad [2.12]$$

waarin:

U = potentiaalverschil [V]

q = elektrische lading [C]

De formule is als volgt op te vatten: tegen een potentiaalverschil in wordt lading door middel van een kracht verplaatst.

2.3.5 Vermogen bij arbeidsleverende of -vragende processen

We zijn bij technische processen niet alleen geïnteresseerd in energiehoeveelheden maar ook in de energie die per tijdseenheid overgedragen wordt. Dit wordt *vermogen* genoemd.

Het gemiddelde vermogen is gelijk aan de geleverde arbeid gedeeld door de tijdsduur:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

waarin:

P = vermogen [W]

Δt = tijdsduur waarbij de arbeid ΔW geleverd wordt [s]

Wanneer we Δt heel klein maken, krijgen we het vermogen op een bepaald tijdstip:

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt} \quad [2.13]$$

Omgekeerd, wanneer het vermogen als functie van de tijd bekend is, is de arbeid W te bepalen uit:

$$W = \int P dt \quad [2.14]$$

Voor het vermogen bij een rechtlijnige beweging geldt:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{F ds}{dt} = Fv \quad [2.15]$$

waarin:

v = snelheid [m/s]



Voorbeeld 2.11 Vermogen bij rijdende auto

Een auto rijdt met een snelheid van 100 km/h op de snelweg en ondervindt daarbij een weerstandskracht van 450 N. Het benodigde vermogen is dan:

$$P = Fv = 450 \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{3600} = 12\,500 \text{ W} = 12,5 \text{ kW}$$

Bij een roterende beweging zoals in pompen en verbrandingsmotoren volgt uit [2.13] en [2.11] dat het vermogen gelijk is aan:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{M d\alpha}{dt} = M\omega \quad [2.16]$$

waarin:

ω = hoeksnelheid [rad/s]

Wanneer het toerental bekend is kan de hoeksnelheid hieruit bepaald worden met:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad [2.17]$$

waarin:

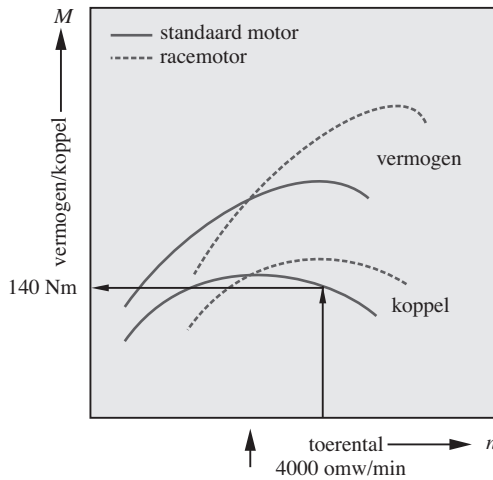
n = toerental [omw/min]



Voorbeeld 2.12 Vermogen van automotor

Een verbrandingsmotor, waarvan de koppel-toerental karakteristiek gegeven is in figuur 2.15, levert een koppel M van 140 Nm bij een toerental n van 4000 omw/min. Het geleverde vermogen is dan:

$$P = M\omega = M \frac{2\pi n}{60} = 140 \cdot \frac{2\pi 4000}{60} = 58\,600 \text{ W} = 58,6 \text{ kW}$$



FIGUUR 2.15
Koppel-toerental-
karakteristiek

Bij elektriciteit wordt het vermogen:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(Uq)}{dt} = U \frac{dq}{dt} = UI \quad [2.18]$$

waarin:

I = stroomsterkte [A]

In deze vergelijking is de stroomsterkte de lading die per seconde verplaatst wordt.

2.4 Warmte

Warmte is de energievorm die tijdens een proces tussen lichamen overgedragen wordt. Terwijl bij arbeid de drijvende kracht F is, is bij warmte de drijvende 'thermische kracht' het temperatuurverschil tussen lichamen. Zonder temperatuurverschil stroomt er geen warmte. Bij vele technische warmteproblemen kan verondersteld worden dat de overgedragen warmte rechtevenredig is met het temperatuurverschil:

$$Q = C\Delta T$$

waarin:

Q = warmte [J]

C = constante [J/K]

ΔT = temperatuurverschil tussen twee lichamen [K]

We onderscheiden drie mechanismen van warmtetransport: geleiding, convectie en straling.

2.4.1 Warmtestromen

Bij warmteoverdracht zijn we vaak geïnteresseerd of in een bepaalde tijd een hoeveelheid warmte overgedragen kan worden. Dit wordt de *warmtestroom* genoemd. Zo zal een ketel voldoende verwarmingsvermogen moeten leveren bij een lage buitentemperatuur.

$$\Phi_w = \frac{dQ}{dt} \quad [2.19]$$

waarin:

Φ_w = warmtestroom [W]

Uit [2.19] volgt:

$$Q = \int \Phi_w dt \quad [2.20]$$



Voorbeeld 2.13 Jaarlijkse warmtebehoefte woonhuis

Gegeven is een woonhuis waarin een warmtepomp geïnstalleerd is met een vollastvermogen (dit is maximale vermogen dat de warmtepomp kan leveren) van 8 kW. Op jaarbasis is het aantal vollasturen 1600 uren.

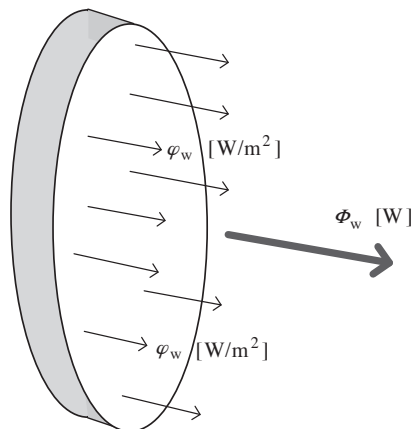
Wat is de jaarlijkse warmtebehoefte?

Uit [2.20] volgt de jaarlijkse warmtebehoefte:

$$Q = \int \Phi_w dt = \Phi_{w,vollast} \Delta t_{vollast} = 8 \cdot 10^3 \cdot 1600 \cdot 3600 = 4,61 \cdot 10^{10} = 46,1 \text{ GJ}$$

2.4.2 Warmtestroomdichtheid

Vaak komen we de *warmtestroomdichtheid* tegen, dat is de warmtestroom per oppervlakte-eenheid. Zie figuur 2.16.



FIGUUR 2.16

Warmtestroom-
dichtheid

Een voorbeeld daarvan is de van de zon afkomstige warmte die uitgedrukt wordt in de warmtestroom per oppervlakte-eenheid.

$$\varphi_w = \frac{\Phi_w}{A} \quad [2.21a]$$

waarin:

φ_w = warmtestroomdichtheid [W/m^2]

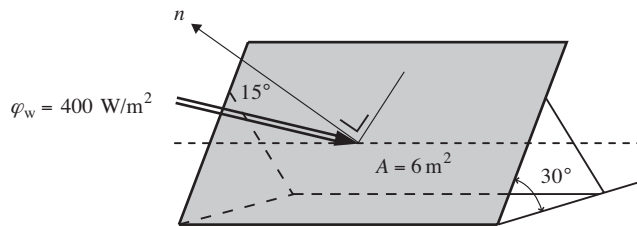
De warmtestroomdichtheid staat loodrecht op het beschouwde oppervlak. We kunnen voor de warmtestroom dus ook schrijven:

$$\Phi_w = \varphi_w A \quad [2.21]$$



Voorbeeld 2.14 Zonnecollector

Op een zonnecollector, zie figuur 2.17, met een oppervlak van 6 m^2 onder 30° met een horizontaal vlak, valt zonnestraling met een warmtestroomdichtheid van $400 \text{ W}/\text{m}^2$.



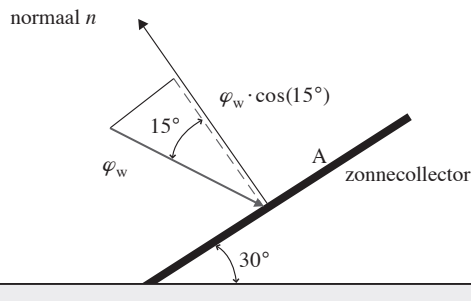
FIGUUR 2.17
Een zonnecollector

De invallende zonnestraling maakt een hoek van 15° met de normaal n van het zonnecollectoroppervlak.

Wat is de warmtestroom?

De warmtestroom is gelijk aan, zie figuur 2.18:

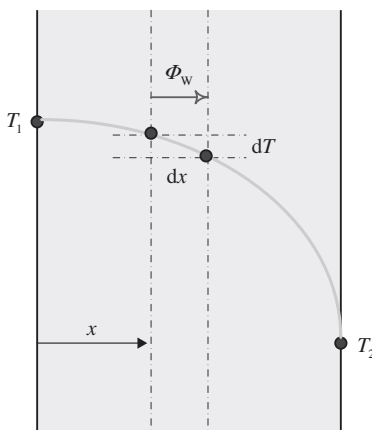
$$\Phi_w = \varphi_w A = 400 \cdot \cos(15^\circ) \cdot 6 = 2318 \text{ W} = 2,32 \text{ kW}$$



FIGUUR 2.18
Projectie van de
warmtestroomdicht-
heid op de normaal
van de zonne-
collector

2.4.3 Warmtetransport door geleiding

Warmtetransport door geleiding komen we in gasen, vloeistoffen en vaste stoffen tegen. Deeltjes in materie botsen tegen elkaar en dragen op deze manier energie aan elkaar over. Bij vaste materie wordt vibratie-energie doorgegeven en energie overgedragen door vrije elektronen.



FIGUUR 2.19
Warmtegeleiding

In figuur 2.19 is een mogelijk temperatuurverloop gegeven in een afkoelende wand. De warmte die op een plaats x overgedragen wordt volgt uit:

$$\Phi_w = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad [2.22a]$$

waarin:

A = oppervlak loodrecht op de warmtestroom [m^2]

λ = warmtegeleidingcoëfficiënt [W/mK]

$\frac{dT}{dx}$ = temperatuurgradiënt [K/m]

De warmtegeleidingcoëfficiënt is een stofeigenschap. In hoofdstuk 3 wordt daarop nader ingegaan.

Een gradiënt is de richtingscoëfficiënt van een grootheid als functie van een afstand. In ons geval geeft die de steilheid aan van de temperatuurverandering in x -richting. Zie het onderdeel differentiëren in bijlage 1.

In [2.22a] zien we een minteken. Dit heeft te maken met de richting van de warmtestroom. Bij toename van de temperatuur T in x -richting zal de warmtestroom tegengesteld zijn aan de x -richting.

In figuur 2.19 is de warmtestroom links kleiner dan rechts. We zien dat de helling groter wordt. Dus er gaat meer warmte uit dan in. De wand koelt af.

Met $\phi_w = \frac{\Phi_w}{A}$ [2.21a] volgt:

$$\phi_w = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [2.22]$$

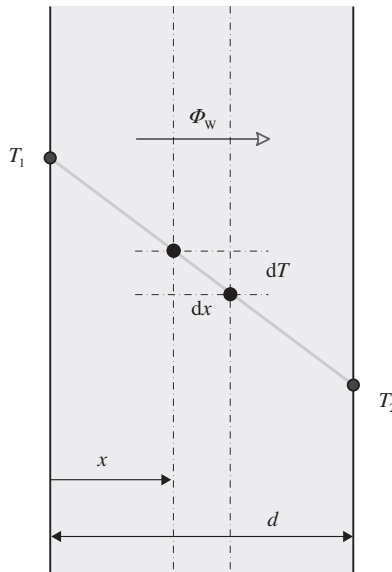
Deze vergelijking staat bekend als de *wet van Fourier*.



Voorbeeld 2.15 Stationaire warmtestroom in een vlakke wand

Gegeven is een vlakke wand met aan de ene zijde een oppervlaktetemperatuur van 80°C en aan de andere zijde een oppervlaktetemperatuur van 30°C . De temperatuur verloopt volgens figuur 2.20. Het wandoppervlak is 10 m^2 en de dikte van de wand is 5 mm . De warmtegeleidingcoëfficiënt is 386 W/mK .

Bepaal de warmtestroom.



FIGUUR 2.20
Stationaire
warmtegeleiding

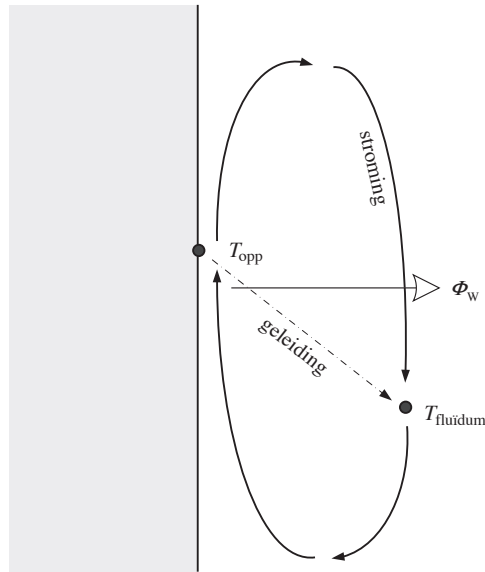
De warmtestroom volgt uit [2.22a]

$$\begin{aligned} \Phi_w &= -\lambda A \frac{dT}{dx} = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} = 386 \cdot 10 \cdot \frac{50}{0,005} = 3,86 \cdot 10^5 \text{ W} \\ &= 386 \text{ kW} \end{aligned}$$

Deze is dus onafhankelijk van de plaats x . Er gaat net zo veel warmte de wand in als uit. Doordat er geen temperatuurverandering plaatsvindt is er sprake van een stationaire toestand (zie paragraaf 1.4.3).

2.4.4 Warmtetransport door convectie

Wanneer we een vaste stof hebben waarlangs een gas of een vloeistof stroomt met een andere temperatuur, zal er warmte overgedragen worden doordat gas- of vloeistofdeeltjes dicht bij het wandoppervlak vervangen worden door deeltjes verder op in het gas of vloeistof. Zie figuur 2.21.



FIGUUR 2.21
Warmtetransport
door convectie

Ook door geleiding zal warmte overgedragen worden. De combinatie van warmtetransport door stroming en geleiding bij fluïda (gassen en vloeistoffen) wordt *warmtetransport door convectie* genoemd.

De warmte die overgedragen wordt kunnen we bepalen met:

$$\Phi_w = \alpha_c A \Delta T \quad [2.23]$$

waarin:

A = oppervlak [m^2]

α_c = convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ΔT = temperatuurverschil tussen fluïdum en wandoppervlak [K] = $T_{\text{opp}} - T_{\text{fluïdum}}$

Vergelijking [2.23] staat bekend als *de afkoelingswet van Newton*.

De *convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt* is geen constante en hangt van vele factoren af (vorm, stand, soort stroming, medium). In hoofdstuk 15 wordt nader ingegaan op de bepaling van deze coëfficiënt.

Toegepaste energieleer behandelt de natuurkundige basis die nodig is om processen te analyseren waarin energieomzettingen of -transport plaatsvinden. Het boek is ingedeeld in vier delen:

- energie: algemeen
- thermodynamica
- stromingsleer
- warmtetransport- en opslag

In het eerste deel komt de basiskennis aan de orde. Daarna worden warmteleer, stromingsleer en warmteoverdracht behandeld, steeds volgens dezelfde conceptuele leerlijn en systematische aanpak, waardoor deze complexe stof één samenhangend geheel vormt.

Deze geactualiseerde, derde druk bevat talloze uitgewerkte voorbeelden, om natuurkundige concepten en vergelijkingen toe te lichten aan de hand van concrete installaties of onderdelen uit de werktuigbouwkunde. Bij veel voorbeelden wordt gebruikgemaakt van simulatiesoftware om gevoeligheidsanalyses uit te voeren. Bij warmtetransportproblemen worden numerieke oplosmethoden behandeld.

Op de website bij het boek, www.toegepastenergieleer.nl, vind je onder andere hulpbestanden voor simulatiesoftware, formulebladen en extra verdiepend materiaal.

Toegepaste energieleer is afgestemd op de inhoud van *Toegepaste energietechniek*, dat een inleiding biedt op energetische systemen, en *Duurzame energietechniek*, dat in het teken staat van duurzame energie.

Ir. A.C. Taal is docent aan de opleiding Werktuigbouwkunde aan De Haagse Hogeschool, coördinator van de minor Smart Energy Technology en lid van de kenniskring van het lectoraat Energy in Transition. Zijn specialismen zijn modelleren en simuleren van energetisch systemen, klimaatinstallaties en energiediagnose. Daarnaast is hij co-auteur van het boek *Toegepaste energietechniek*.



9 789024 403738

www.toegepasteenergieleer.nl
www.boomhogeronderwijs.nl