

Boom

TOEGEPASTE ENERGIE- TECHNIEK

Joop Ouwehand, Trynke Papa,
Egbert Post en Arie Taal

ZESDE DRUK



Toegepaste energietechniek

Toegepaste energietechniek

Joop Ouwehand, Trynke Papa, Egbert Post en Arie Taal

Boom

**inclusief
website!**

Met onderstaande unieke activeringscode krijg je via www.boomstudent.nl toegang tot de website met extra materiaal. Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de zesde druk. Na activering van de code is de website twee jaar toegankelijk. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende druk geactiveerd worden. De code is eenmalig te gebruiken.

Opmaak binnenwerk: Holland Graphics, Amsterdam

Basisontwerp omslag: Dog & Pony, Amsterdam

Omslagontwerp: DPS, Amsterdam

Beeld omslag: hramovnick/Shutterstock

© Ouwehand, Post, Papa en Taal & Boom uitgevers Amsterdam, 2022

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 het overnemen van (een) gedeelte(n) uit deze uitgave in bijvoorbeeld een (digitale) leeromgeving of een reader in het onderwijs (op grond van artikel 16, Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting Uitgeversorganisatie voor Onderwijslicenties, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-uvo.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.

ISBN 9789024436576

ISBN e-book 9789024436583

NUR 961

www.boomstudent.nl

www.boomhogeronderwijs.nl

Woord vooraf

Dit boek beschrijft de belangrijkste soorten energietechnische apparaten en systemen en is bestemd voor het eerste en tweede studiejaar van het hoger technisch onderwijs. In eerste instantie gaat het daarbij om de studierichting werktuigbouwkunde. Het is echter ook voor andere studierichtingen geschikt, doordat specifieke werktuigbouwkundige berekeningen (zoals sterkteberekeningen) niet aan de orde komen. Bovendien is de behandeling van de theorie nadrukkelijk afgestemd op studenten met havo als vooropleiding. Het is daarbij wel wenselijk dat er een basiskennis aanwezig is op het gebied van de technische warmteleer: de Eerste Hoofdwet, toestandsvergelijkingen van gassen en vloeistoffen, de continuïteitsvergelijking en de wet van Bernoulli. Een beknopte samenvatting van deze onderwerpen is daarom opgenomen in de bijlagen.

Het boek heeft de volgende uitgangspunten:

- Een benadering van de diverse machines, apparaten en energiesystemen vanuit de optiek van de toepasser en de gebruiker. Daarbij wordt uitgegaan van een systeembenadering waarbij het systeem in eerste instantie wordt beschouwd als een black box die naderhand wordt ingevuld.
- Inzicht geven in de hoofdkenmerken van de machines, apparaten en energiesystemen. De nadruk ligt hierbij op de gebruikseigenschappen en kenmerken; daarnaast is er aandacht voor bijvoorbeeld hoofdafmetingen en energietechnische berekeningen.
- Het leggen van de relaties tussen de algemene energietechnische principes en de kenmerken van de behandelde systemen.
- Het bieden van basiskennis over lastprocessen, verbrandingstechniek en stoomvorming.
- Het aanbrengen van een logische samenhang tussen de aandrijvende energiebron/machine en het lastproces/de verbruiker. De overbrenging en het distributiesysteem blijven hierbij buiten beschouwing, omdat deze worden opgevat als typisch werktuigbouwkundige onderwerpen.
- Optimalisering van de rendementen is bij alle in dit boek behandelde soorten machines en apparaten en systemen de 'rode draad' met de doelstelling om deze systemen en apparaten zo optimaal mogelijk te laten werken.
- Regeltechnische aspecten komen alleen aan de orde voor zover deze van belang zijn voor het begrijpen van het functioneren van het behandelde systeem. Karakteristieke kenmerken worden zoveel mogelijk weergegeven in de vorm van prestatiediagrammen (koppel/toerenkromme, pompkarakteristiek, rendementsgrafiek enzovoort).
- Het geven van een breed overzicht van de vele soorten energiewerktuigen en de werkingsprincipes waarop deze zijn gebaseerd.



- De onderwerpen worden zodanig in afzonderlijke hoofdstukken uitgewerkt dat deze, op de eerste drie hoofdstukken na, in willekeurige volgorde kunnen worden behandeld of bestudeerd.
- In alle hoofdstukken is een groot aantal uitgewerkte berekeningsvoorbeelden opgenomen. Daarnaast worden alle hoofdstukken afgesloten met een aantal analysevragen. Meer analyse- en kennisvragen en berekeningsopgaven zijn te vinden op de online leeromgeving bij dit boek die te bereiken is via www.boomstudent.nl. Hierdoor is het boek geschikt voor zelfstudie.
- Bij de bepaling van de vaststelling van de diepgang van de behandelde onderwerpen is ervan uitgegaan dat dit boek grotendeels kan worden doorgewerkt in het eerste en tweede studiejaar van het hoger technisch onderwijs, waarbij de studiebelasting telkens 1,5 à 2 studiepunten is. Daarbij is het boek geschikt als oriëntatie op het vakgebied én als naslagwerk.

Bij de behandeling van de verschillende soorten energiesystemen ligt de nadruk op de algemene principes, die voortkomen uit de Eerste en de Tweede Hoofdwet. De vele varianten, met voortdurend technische vernieuwingen, komen alleen aan de orde voor zover deze trendsettend lijken voor toekomstige toepassingen en ontwikkelingen.

Daarnaast is er ook aandacht voor energie-efficiency en vermindering van de milieubelasting bij energieprocessen en apparaten.

Dit boek maakt deel uit van een driedelige reeks studieboeken. De andere delen zijn:

- *Duurzame energietechniek*, dat in het teken staat van duurzame energie: zonne-energie, windenergie, waterkracht, bio-energie, omgevingswarmte en aardwarmte;
- *Toegepaste energieleer*, dat een inleiding biedt op *Toegepaste energietechniek* en *Duurzame energietechniek*. Het boek behandelt de theoretische basiskennis van de warmteleer (thermodynamica), stromingsleer en warmtetransport.

Zesde druk

Deze zesde druk van *Toegepaste energietechniek* is geactualiseerd. Er is bij de herziening aandacht geweest voor de aansluiting van de technieken bij de ontwikkelingen met betrekking tot de verduurzaming van de energievoorziening. Aan het eind van de hoofdstukken zijn analysevragen opgenomen, waarbij de kennisvragen uit de vorige editie op de online leeromgeving bij dit boek zijn geplaatst. De zesde druk is geheel in kleur uitgegeven waardoor de figuren beter tot hun recht komen. Ook zijn er nieuwe figuren en afbeeldingen toegevoegd. De auteurs bedanken Njord van Erck voor het meelesen en de nuttige tips.

Amsterdam, herfst 2022

Inhoud

Symbolenlijst

xiv

1	Energietechniek	1
1.1	Energiebronnen	3
1.2	De energievoorraad is oneindig	6
1.3	Van brandstof naar energiedrager	10
1.4	Distributie van energiedragers	11
1.4.1	Distributie van mechanische energie	12
1.4.2	Distributie van elektrische energie en aardgas	13
1.4.3	Distributie van warmte en koude	14
1.4.4	Transportverliezen	15
1.5	Lastprocessen	16
1.5.1	Lastkarakteristiek van een rijdende auto	17
1.5.2	Stromingsweerstand	22
1.6	Energieketens en energiefuncties	23
1.6.1	Energieketens	24
1.6.2	Energiefuncties	25
1.7	Conversie van energiedragers	31
1.7.1	Conversie van fossiele en nucleaire brandstoffen	33
1.7.2	Conversie van energie uit duurzame energiebronnen	35
1.8	Samenvatting	38
1.9	Analysevragen	42
2	Verbrandingstechniek	45
2.1	Basisreacties van de verbranding	48
2.1.1	Verbrandingschemie	48
2.1.2	Algemene verbrandingsvergelijkingen	50
2.2	Verbrandingsberekeningen van hoeveelheid verbrandingslucht en verbrandingsgassen	52
2.2.1	Theoretische zuurstofbehoefte	52
2.2.2	Theoretische luchthoeveelheid en rookgashoeveelheid	53
2.2.3	Het maximale koolstofdioxidepercentage, $\text{CO}_{2,\text{max}}$	57
2.2.4	Luchtfactor λ , luchtvermaat en luchtondermaat	58
2.3	Verbrandingswarmte	64
2.4	Onvolledige verbranding en verbrandingsemissies	67
2.4.1	Koolstofmono-oxide (CO) en rookgassamenstelling bij onvolledige verbranding	68
2.4.2	Stikstofoxiden NO_x	71
2.4.3	Meting van de rookgassamenstelling	73

2.5	Het verbrandingsproces	76
2.5.1	Begrippen	79
2.6	Branders	83
2.6.1	Aardgasbranders	84
2.6.2	Oliebranders	89
2.6.3	Verbranding van steenkolen, vaste biomassa en afval	97
2.6.4	Reductie van NO_x -emissie	101
2.6.5	Rookgasontzwaveling	102
2.7	Samenvatting	103
2.8	Analysevragen	108
3	Warmwaterketels	111
3.1	Toepassingen en kenmerken van warmwaterketels	114
3.1.1	Toepassingen	115
3.1.2	Constructiekenmerken	115
3.1.3	Ketelconstructie en toepassingen	116
3.1.4	Ketels voor kleinschalige warmteopwekking	117
3.1.5	Ketels voor utiliteitsbouw	120
3.2	Warmtebalans en ketelrendement	121
3.2.1	Warmtebalans van een ketel	121
3.2.2	Ketelrendement	127
3.3	Ketelgebruiksrendement	131
3.3.1	Bepaling van het ketelgebruiksrendement	131
3.3.2	Invloed van de ketelregeling op het ketelgebruiksrendement	136
3.4	Samenvatting	139
3.5	Analysevragen	143
4	Verbrandingsmotoren	147
4.1	Werking van de zuigermotor	151
4.2	Prestaties van de zuigermotor	154
4.2.1	Effectief vermogen	155
4.2.2	Effectief rendement	158
4.2.3	Uitlaatemissies	161
4.2.4	Geluidsproductie	161
4.2.5	Koppel-toerental karakteristiek	162
4.2.6	Brandstoffen	165
4.3	Processen in de zuigermotor	168
4.3.1	Wijze van ontsteking	169
4.3.2	Arbeidscyclus	171
4.3.3	Theoretisch thermisch rendement	179
4.4	Luchttoevoer naar de cilinders	183
4.4.1	Vierslagsysteem	184
4.4.2	Tweeslagsystemen	187

4.4.3	Praktijkwaarden	187
4.5	Brandstoftoevoer naar de cilinders	188
4.5.1	Ottomotor	188
4.5.2	Dieselmotor	190
4.6	Omzetting chemische energie in gasarbeid	193
4.6.1	Geïndiceerd vermogen	193
4.6.2	Thermodynamisch rendement	194
4.7	Omzetting gasarbeid in krukasarbeid	197
4.7.1	Krukasarbeid	197
4.7.2	Mechanisch rendement	198
4.7.3	Uitvoering van het drijfwerk	199
4.8	Verbrandingsgassenafvoer	203
4.8.1	Samenstelling van de uitlaatgassen	204
4.9	Ontsteking in verbranding	207
4.9.1	Detonatie	207
4.9.2	Ontstekingsstijdstip	209
4.9.3	Vorm van de verbrandingskamer	211
4.10	Ladingwisseling	212
4.10.1	Vullingsgraad	214
4.11	Vermogensregeling	219
4.12	Samenvating	221
4.13	Analysevragen	226
5	Gasturbines	229
5.1	Werking van de gasturbine	234
5.1.1	De kringloop	234
5.1.2	De industrieturbine	235
5.1.3	Straalmotoren en aero derivatives	237
5.1.4	Microturbines	239
5.1.5	Starten en regelen van een gasturbine	241
5.2	Hoofdcomponenten van de gasturbine	242
5.2.1	De compressor	242
5.2.2	De turbine	243
5.2.3	De verbrandingskamer	244
5.3	Prestaties van de gasturbine	246
5.3.1	Theoretisch rendement	246
5.3.2	Optredende verliezen in de gasturbine	249
5.3.3	Specifieke arbeid	251
5.3.4	Luchtbehoefte	253
5.3.5	Vermogen en totaalrendement	254
5.3.6	Invloed van de drukverhouding en temperaturen op het rendement en de specifieke arbeid	255
5.4	Verbetering van prestatie	256
5.4.1	Recuperatie	257

5.4.2	Tussenkoeling en verdampingskoeling	258
5.4.3	Herverhitting	259
5.4.4	Stoominjectie	261
5.4.5	Variabele inlaatleidschoepen	261
5.5	Praktijkvoorbeelden	262
5.5.1	General Electric MS6	262
5.5.2	OPRA Turbine OP16	266
5.6	Samenvatting	269
5.7	Analyse vragen	271
6	Stoominstallaties	277
6.1	Werking van een stoominstallatie	279
6.1.1	Effectief vermogen	281
6.1.2	Rendementen	282
6.2	Stoomprocessen	285
6.2.1	De stoomcyclus voor verwarmingsdoeleinden	285
6.2.2	De stoomcyclus voor opwekking van mechanische energie	287
6.2.3	De theoretische kringloop en het rendement	289
6.2.4	De kringloop van Rankine	290
6.3	Stoomvorming bij constante druk	294
6.3.1	Uitvoeringsvormen van stoomketels	297
6.4	Stoomwerktuigen	307
6.4.1	De stoomturbine	308
6.4.2	Absolute en relatieve snelheid	314
6.4.3	Typen stoomturbines	316
6.4.4	Verliezen bij stoomturbines	325
6.4.5	Praktische uitvoeringen	329
6.5	Warmteafvoer in het kringproces	331
6.5.1	De condensor	332
6.6	Toevoer van mechanische energie in het kringproces	333
6.6.1	De voedingspomp	334
6.7	De voedingwaterbehandeling	335
6.7.1	De ontgasser	335
6.7.2	Voedingwatersuppletie	337
6.8	Regelgeving voor drukapparatuur	338
6.9	Samenvatting	340
6.10	Analyse vragen	343
7	Pompen, compressoren en ventilatoren	347
7.1	Prestaties van pompen	348
7.1.1	Opvoerdruk	349
7.1.2	Asvermogen	352
7.1.3	Rendement	353

7.1.4	Zuighoogte	354
7.1.5	Karakteristieken en bedrijfspunt	358
7.2	Leidingsystemen	359
7.2.1	Weerstand in rechte leidingen	359
7.2.2	Het moodydiagram	362
7.2.3	De weerstand van appendages	363
7.2.4	Leidingkarakteristiek	364
7.3	Verdringerpompen	368
7.3.1	Overzicht van verdringerpompen	369
7.3.2	Werking van zuiger- en plunjerpomp	372
7.3.3	Het pV-diagram van een zuiger- of plunjerpomp	374
7.3.4	Windketels	375
7.4	Waaierpompen	378
7.4.1	Werking en typen	378
7.4.2	Snelheidsdriehoeken bij centrifugaalpompen met radiale uittrede	383
7.4.3	Eulerse opvoerdruk	385
7.4.4	Pompkarakteristiek	388
7.4.5	Het bedrijfspunt	392
7.4.6	Regelen van de opbrengst van waaierpompen	395
7.4.7	Serie- en parallelschakeling van pompen	396
7.4.8	Pompdigram	398
7.4.9	Rendement	398
7.4.10	NPSH	401
7.4.11	Specifiek toerental	402
7.5	Prestaties van compressoren	405
7.5.1	Compressiearbeid	406
7.5.2	Koeling	407
7.5.3	Vermogen	408
7.5.4	Rendement	409
7.6	Verdringercompressoren	410
7.6.1	Overzicht van verdringercompressoren	410
7.6.2	De zuigercompressor	411
7.7	Waaiercompressoren	418
7.7.1	Radiale compressoren	420
7.8	Ventilatoren	424
7.8.1	Radiale ventilatoren	425
7.8.2	Axiale ventilatoren	430
7.9	Samenvatting	432
7.10	Analysevragen	436
8	Koelmachines en warmtepompen	443
8.1	Werking van de warmtepomp en koelmachine	448
8.1.1	Warmtepomp- en koelmachinecyclus	448

8.1.2	De mechanische compressiemachine	449
8.1.3	De absorptiemachine	451
8.2	Prestaties van de compressiewarmtepomp en koelmachine	454
8.2.1	Effectief warmte- en koudevermogen	455
8.2.2	Effectieve koudefactor (EER_{eff}) en warmtefactor (COP_{eff})	456
8.3	Koudemiddelen	459
8.4	Warmte- en koudedistributie	463
8.4.1	Gekoeld waterdistributie	464
8.4.2	Warmteafvoer condensorwarmte	465
8.5	Uitvoeringen van compressiemachines	468
8.5.1	De mechanische compressiemachine	468
8.5.2	De thermische compressiemachine	473
8.6	Rendementen in compressiemachines	475
8.6.1	Carnotrendement	475
8.6.2	Verliezen	477
8.7	Compressie van het koudemiddel	483
8.7.1	Uitvoeringen van de compressor	484
8.7.2	Verliezen bij de mechanische compressor	488
8.7.3	Verliezen bij de thermische compressor	493
8.8	Verdamping van het koudemiddel	497
8.8.1	Uitvoeringen van verdamper	497
8.8.2	Verliezen bij verdamping	499
8.9	Condensatie van het koudemiddel	501
8.9.1	Uitvoeringen van condensers	501
8.9.2	Verliezen bij condensatie	503
8.10	Expansie van het koudemiddel	506
8.10.1	Werking van het expansieventiel	507
8.10.2	Verliezen bij expanderen	508
8.11	Externe regeling van de compressiemachine	509
8.12	Samenvatting	511
8.13	Analyse vragen	515
9	Gecombineerde technieken	519
9.1	Warmtekrachtkoppeling (wkk)	520
9.1.1	Wkk met motoren en warmteterugwinning	526
9.1.2	Wkk met een Organic Rankine Cycle (ORC)	529
9.2	Integratie van wkk in het energievoorzieningssysteem	532
9.3	Brandstofbesparing door wkk	534
9.4	STEG-installaties	538
9.4.1	Uitvoeringsvormen	539
9.4.2	Rendementen van STEG-installaties	541
9.5	Warmte- en krachtlevering in de toekomst	541
9.5.1	Grenzen aan de brandstofbesparing	543

9.5.2	Brandstofbesparing met kleinschalige warmtekrachtinstallaties en warmtepompen	543
9.6	Samenvatting	549
9.7	Analysevragen	553
Appendix A		557
9.1	Eerste Hoofdwet	557
9.2	Omkeerbare toestandsveranderingen	560
9.2.1	Omkeerbare toestandsveranderingen van een ideaal gas	561
9.2.2	Kringprocessen	566
9.2.3	Toestandsveranderingen in open systemen	569
9.3	Onomkeerbare toestandsveranderingen en entropie	570
9.3.1	Tweede Hoofdwet	571
9.3.2	Entropie	572
Appendix B Wet van Bernoulli		579
Appendix C log p-h-diagram		583
Appendix D Warmteoverdracht		587
Illustratieverantwoording		591
Trefwoordenregister		595

Symbolenlijst

ε	[-]	koudefactor
ε_W	[-]	warmteproductiegetal, warmteopbrengstgetal
η	[Pa · s]	dynamische viscositeit
η	[-]	rendement
κ	[-]	verhouding c_p/c_v , isentroop exponent
ν	[m ² /s]	kinematische viscositeit
ρ	[kg/m ³]	dichtheid, soortelijke massa
Φ_m	[kg/s]	massastroom
Φ_V	[m ³ /s]	volumestroom
Φ_W	[J/s]	warmtestroom
ω	[1/s]	hoeksnelheid
A	[m ²]	oppervlak
b	[m]	breedte
COP	[-]	coefficient of performance
c	[J/(kg · K)]	soortelijke warmte
c_p	[J/(kg · K)]	soortelijke warmte bij constante druk
c_v	[J/(kg · K)]	soortelijke warmte bij constant volume
D	[m]	diameter
E_k	[J]	kinetische energie
E_p	[J]	potentiële energie
g	[m/s ²]	valversnelling
H	[J]	enthalpie
h	[J/kg] of [J/m ³]	specifieke (soortelijke) enthalpie
h_b	[kJ/kg]	bovenste verbrandingswaarde
h_o	[kJ/kg]	onderste verbrandingswaarde (of stookwaarde)
l	[m]	lengte
m	[kg]	massa
M	[Nm]	motorkoppel
n	[1/min]	toerental
n	[-]	polytroopexponent (algemeen)
p	[Pa]	druk
P	[W]	vermogen
q	[J/kg]	specifieke warmte
Q	[J]	warmtehoeveelheid
r	[J/kg]	verdampingswarmte
R	[J/(kg · K)]	specifieke gasconstante
s	[J/(kg · K)]	specifieke entropie
s	[m]	afgelegde weg
S	[J/K]	entropie

T	[°C] of [K]	temperatuur
U	[W/(m ² · K)]	warmtedoorgangscoefficiënt
U	[J]	inwendige energie
v	[m/s]	snelheid
w	[kJ/kg]	specifieke arbeid
W	[kJ]	arbeid (algemeen)

Indices

af	af(gevoerd)	max	maximaal
br	brandstof	min	minimaal
comp	compressor	n	normaalomstandigheden
cond	condensor	n.o.	niet omkeerbaar
C	Carnot	omg	omgeving
eff	effectief	rookg	rookgas
elek	elektrisch	st	stoomturbine
exp	expansie	td	thermodynamisch
gt	gasturbine	th	thermisch
gem	gemiddeld	theor	theoretisch
gen	generator	toe	toe(gevoerd)
in	in(trede)	tot	totaal
inw	inwendig	turb	turbine
is	isentrop	uit	uittrede
kt	ketel	vent	ventilator
l	lucht	V	volume
m	massa	W	warmte
mech	mechanisch	z	zuiger



Energietechniek

1

Overall is energie, of dit nu zonnestraling is, elektrische stroom, warmte voor verwarming, kernenergie, stromings- of bewegingsenergie, het valt onder het verzamelbegrip energie. Maar wat is energie nu eigenlijk en waarom kunnen we niet zonder?

Biologisch leven en groei zijn zonder energie ondenkbaar; de zon levert hiertoe het licht en de warmte. Onze moderne, techniek-georiënteerde maatschappij is ondenkbaar zonder het gebruik van energie. Ondanks de vele manieren waarop energie wordt gebruikt, zijn we niet in staat om er een precieze definitie van te geven. Energie kunnen we wel beschrijven aan de hand van twee wetten uit de thermodynamica, de vormen waarin zij zich manifesteert en de manier waarop we er gebruik van maken. Energie heeft te maken met het leveren van inspanning (arbeid), het leven en de groei van organismen (licht en warmte), de verandering van materie (chemische processen, productieprocessen) en het transport (arbeid). In het blokschema van figuur 1.1 is dit nog eens samengevat, waarbij de genoemde processen bijdragen tot verandering door toevoer van energie. De energie wordt omgezet.



Figuur 1.1 *Energieomzetting*

In figuur 1.1 is er een verband gelegd tussen energiestromen (licht, warmte en arbeid) en het uiteindelijke doel van het energiegebruik ten dienste van de mens. De processen zijn noodzakelijke voorwaarden voor het menselijk bestaan en verhogen tevens het comfort daarvan. Leven, groei en verandering is zonder energie ondenkbaar. Energie gaat hierbij niet verloren, maar krijgt een andere bruikbare vorm. Bij praktische toepassingen maken we onderscheid

tussen de energievormen, die de energetische toestand van de materie beschrijven. Dit zijn de:

- *inwendige energie*: thermodynamisch (U), chemisch (brandstof), fysisch (kernenergie);
- *kinetische energie*: translatie en rotatie van massa, trillingsenergie van een massa, golfenergie, stromingsenergie van wind en water;
- *potentiële energie*: valenergie, veerenergie, drukenergie van een gas;
- *optische energie*: licht, warmtestraling.

In alle gevallen is materie de drager van de energie. Arbeid, licht en warmte zijn vormen van energieoverdracht en zorgen voor de toestandsverandering van een systeem. In dit boek *Toegepaste energietechniek* worden de processen en werktuigen nader belicht, die bij de omzetting van hoofdzakelijk fossiele energiedragers van de ene naar de andere vorm een centrale rol spelen. In volgorde van de hoofdstukken zijn dit:

- hoofdstuk 1: energiebronnen, energietransitie, energieconversie, energie-efficiëntie, lastprocessen, energieketens;
- hoofdstuk 2: verbrandingstechniek, berekeningen van luchthoeveelheid en rookgas bij verbranding van brandstoffen, branders en stookinrichtingen, emissie van schadelijke gassen;
- hoofdstuk 3: warmwaterketels voor verwarming van (woon-)gebouwen en industriële processen, warmtebalans van de ketel en rendementen;
- hoofdstuk 4: benzine- en dieselmotoren, arbeidscycli en procesdiagrammen, energieomzetting van brandstof naar asarbeid, uitvoeringen van zuigermotoren, vermogensregeling;
- hoofdstuk 5: werking van gasturbines, arbeid en vermogen van open gasturbines, prestaties van en technieken voor de verbetering van de prestaties van open gasturbines;
- hoofdstuk 6: stoominstallaties, schema's van stoominstallaties, de energiedrager stoom en stoombereiding, stoomketels, waterbehandeling, werking van stoomturbines, apparaten in de installatie en regels voor apparaten onder druk en beveiliging;
- hoofdstuk 7: pompen, selectie- en prestatiecriteria, vermogen en rendement van pompen, leidingweerstand en bedrijfspunt, verdringer- en waaierpompen, snelheidsdiagrammen, cavitatie en NPSH (Net Positive Suction Head), werking van compressoren en ventilatoren, zuiger-, centrifugaal en axiaal-compressoren, centrifugaal- en axiaalventilatoren;
- hoofdstuk 8: koelmachines en warmtepompen, koude- en warmteopwekking, prestaties en rendementen (COP-prestatiecoëfficiënt van de kringloop), grote en kleine installaties, distributie van warmte en koude, soorten compressoren;
- hoofdstuk 9: gecombineerde technieken, warmtekrachtkoppeling, brandstofbesparing, gecombineerde stoom- en gasturbineinstallaties voor op-

wekking van elektriciteit (STEG), kleinschalige voor gecombineerde productie van warmte en elektriciteit, of uitsluitend warmte.

Door de veranderingen in de herkomst van energiebronnen van fossiele energiedragers naar duurzame energiebronnen – de ‘energietransitie’ –, zie paragraaf 1.1, vinden er in een periode van enkele decennia veranderingen plaats in de technologieën voor de opwekking van warmte, kracht en elektriciteit. Het zal nog tientallen jaren duren voordat deze veranderingen afgesloten zijn.

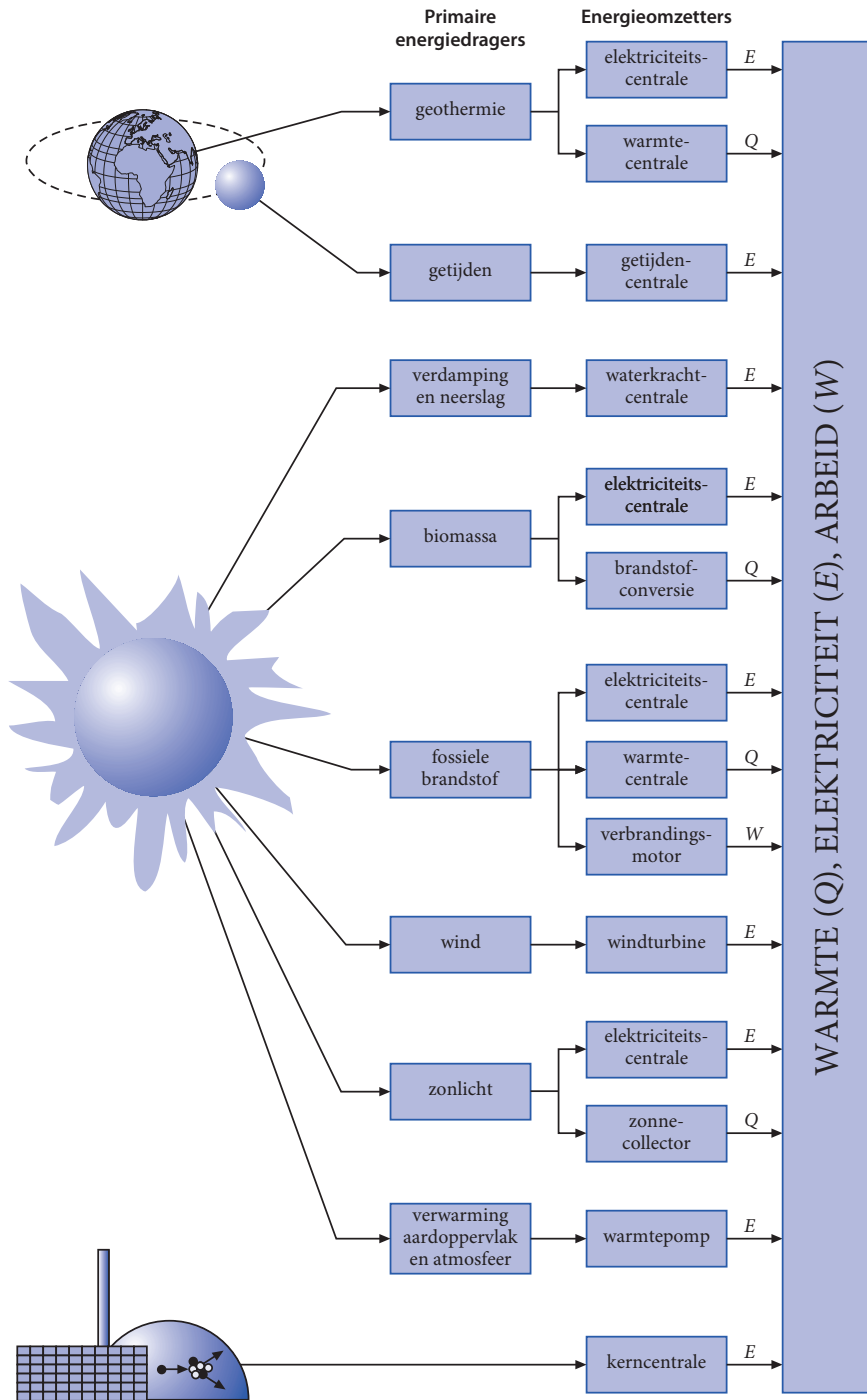
In alle hoofdstukken zijn rekenvoorbeelden opgenomen om de werking van de theorie toe te lichten en de hoofdstukken eindigen met een korte samenvatting en een overzicht van belangrijke formules van de behandelde leerstof.

1.1 Energiebronnen

We spreken over energiebronnen, -conversie, -distributiesystemen, -opslag en -gebruikers. Als we de doelen van het energiegebruik als uitgangspunt nemen, dan zijn de energieconversie, energiedistributie en de energiebronnen noodzakelijke voorwaarden. De energiebronnen zijn de leveranciers van energie en de distributiesystemen zorgen voor het transport, de overbrenging van energie. In bepaalde gevallen is opslag van energie nodig. Denk bijvoorbeeld aan een autoaccu.

In dit boek *Toegepaste energietechniek* besteden we aandacht aan de principes en werktuigen, die de energie van de energiebronnen omzetten in een voor bepaalde doelen gewenste vorm van energie. De energievorm verandert. In een ketel wordt brandstof omgezet in warmte en in een boormachine wordt elektriciteit omgezet in rotatie-energie van de boor. Een pomp zet elektrische energie om in stromingsenergie en drukenergie. Deze werktuigen rekenen wij meestal tot de energiebronnen, omdat ze gekoppeld zijn aan een proces of energiegebruiker. Afhankelijk van de beschouwde systemen is een werktuig een energiebron, -overbrenger of -gebruiker. (Voorbeeld: een radiator is een *gebruiker* in een cv-systeem en een *bron* voor ruimteverwarming. Een cv-pomp is weer te splitsen in *bron* (elektromotor), *overbrenging* (as) en *gebruiker* (waaier)). Werktuigen hebben echter een heel ander karakter dan de dragers van energie. De dragers van energie noemen we ook wel de primaire energiebronnen. De bekendste zijn:

- zonne-energie;
- wind- en waterkracht;
- fossiele brandstoffen (kolen, olie, bruinkool, aardgas, turf);
- biomassa (hout, biogas, biodiesel en methanol);
- aardwarmte;
- kernenergie.



Figuur 1.2 Zonne-energie als oorsprong

Het verband tussen de zonne-energie en de overige primaire energiedragers is weergegeven in figuur 1.2. Kernenergie is niet direct een gevolg van de zonne-energie, maar wel een gevolg van het ontstaan van ons zonnestelsel. De zon zelf mogen we als een grote kerncentrale beschouwen, waarvan de optische energie voor vrijwel de gehele energievoorziening van de planeet aarde zorgt. Secundaire energiebronnen zijn de werktuigen die met behulp van een verbrandingsproces een primaire energiedrager omzetten – converteren – in warmte en/of arbeid, elektriciteit genereren met wind- of waterkracht of direct warmte en elektriciteit maken uit het zonlicht. We noemen ze ook wel de energieomzetters; in deze werktuigen of apparaten verandert de energievorm. Voorbeelden hiervan zijn:

- Conventionele energieomzetters:
 - zuigermotoren;
 - gasturbines;
 - stoomturbines;
 - ketels.
- Duurzame energieomzetters:
 - windturbines;
 - waterturbines;
 - zonnepanelen en zonnecollectoren.

Een elektromotor is meestal onderdeel van een huishoudelijk apparaat, zoals een keukenmachine, ventilator, wasmachine, boormachine enzovoort. De motor is de energiebron ten behoeve van de aandrijving van het apparaat. We beschouwen deze motor als een tertiaire energiebron.

Het verband tussen de energiebron en de gebruiker of het proces waar de energiebron aan gekoppeld is, is weergegeven in figuur 1.3.



Figuur 1.3 Verband tussen de energiebron en de gebruiker

Voor de gebruiker of het proces gebruiken we vaak het begrip ‘lastproces’, om aan te geven dat op die plaats het energie-eindgebruik plaatsvindt. Neem bijvoorbeeld het rijden van een auto als lastproces. De brandstof die een auto tijdens het rijden verbruikt, wordt uiteindelijk omgezet in wrijvingswarmte. Deze warmte gaat op in de inwendige energie van de atmosfeer.

De verbranding van fossiele brandstoffen is de belangrijkste oorzaak van de klimaatverandering op aarde. Volgens het ‘Klimaatakkoord van Parijs’ van 2015 moet de emissie van koolstofdioxide (CO_2) door verbranding van kolen, turf, olie en aardgas stoppen, zodat de opwarming van de aardatmosfeer beperkt wordt tot $1,5^\circ\text{C}$.

Energietransitie

De Nederlandse energievoorziening bevindt zich in transitie. Dat wil zeggen, dat fossiele brandstoffen voor de productie van elektriciteit en warmte, in verkeer en vervoer tot het jaar 2050 volledig vervangen worden door beschikbare duurzame energiebronnen, zoals zon, wind- en waterkracht en biobrandstoffen – zie figuur 1.2. De maatschappelijke energievoorziening moet worden verduurzaamd, zodat verdere temperatuurstijging van de aardbiosfeer wordt voorkomen.

In de transitiefase naar deze 'duurzame energievoorziening' is een belangrijke rol weggelegd voor elektriciteit uit duurzame energiebronnen. De maatschappelijke energiebehoefte aan warmte is enkele keren groter dan de behoefte aan elektriciteit en de infrastructuur voor de distributie van gasvormige energiedragers is in Nederland goed ontwikkeld. Waterstofgas, biogas, synthese gas en bio-olie uit afvalstromen, zijn in ontwikkeling ter vervanging van fossiele brandstoffen. De volledige elektrificering van alle energiefuncties is met de bestaande infrastructuur van de nationale energievoorziening onmogelijk.

De totale energieketen van winning tot eindgebruik verandert en moet efficiënter worden. Energiebesparing, rendementsverhoging van energiewerktuigen en processen bij de conversie en het eindgebruik zijn belangrijke uitgangspunten, zowel bij de industriële energievoorziening, de verwarming van gebouwen als bij het vervoer op de weg.

In de overgangsperiode tot een volledige duurzame energievoorziening hebben we te maken met bestaande technische installaties en systemen, die gebaseerd zijn op de verbranding van fossiele brandstoffen. De transitiefase zal dan ook gepaard gaan met veranderingen in de technieken voor opwekking van elektriciteit en warmte, voor vervoer en transport. Dit boek behandelt principes van werktuigen en installaties, die ook tijdens en na de transitiefase eventueel in aangepaste vorm blijven bestaan. Per hoofdstuk zal worden ingegaan op de relevantie tijdens en na de transitie. De duurzame energieomzetters worden in een apart boek behandeld, *Duurzame Energietechniek*, en komen derhalve in dit boek niet aan bod.

1.2 De energievoorraad is oneindig

Bij alle energiebeschouwingen spelen de eerste en de tweede hoofdwet van de thermodynamica een belangrijke rol. De eerste hoofdwet brengt tot uitdrukking dat energie niet verloren gaat en warmte en arbeid in elkaar omgezet kunnen worden. Dat dit laatste niet volledig mogelijk is, laat de tweede hoofdwet zien in het volgende voorbeeld.

Toegepaste energietechniek biedt een inleiding in de wereld van de energietechnische systemen. Na twee algemene hoofdstukken over energietechniek en verbrandingstechniek wordt achtereenvolgens aandacht besteed aan de onderwerpen: warmwaterketels, verbrandingsmotoren, gasturbines, stoominstallaties, pompen, compressoren en ventilatoren, warmtepompen en koelmachines, en aan geïntegreerde installaties zoals STEG.

Bij de bespreking van deze systemen wordt uitgegaan van een systeembenadering, waarbij de nadruk ligt op de gebruikseigenschappen en -kenmerken van de werktuigen en energiesystemen. Daarbij is er ook aandacht voor het verbeteren van de efficiency en optimalisering van de rendementen om de milieubelasting te verlagen.

Dit boek maakt deel uit van de reeks over energietechniek. Deze boeken sluiten dankzij hun inhoudelijke samenhang en didactische structuur op elkaar aan, maar zijn ook afzonderlijk te gebruiken:

- **Toegepaste energieleer: Warmte- en stromingsleer** behandelt de theoretische basiskennis van de warmteleer, de thermodynamica en de stromingsleer.
- **Toegepaste energietechniek** gaat over de conventionele, meestal op fossiele energiebronnen gebaseerde energietechniek.
- **Duurzame energietechniek** behandelt de op duurzame energiebronnen gebaseerde energietechniek.

Op de online leeromgeving is studiemateriaal beschikbaar voor docenten en studenten. Op de website vind je kennisvragen, de uitwerkingen van de analysevragen uit het boek, een begripentrainer, relevante video's en het online boek.

Deze zesde druk van **Toegepaste energietechniek** is herzien, geactualiseerd en in kleur uitgegeven zodat de figuren beter tot hun recht komen. Daarnaast zijn er analysevragen opgenomen bij elk hoofdstuk.

Toegepaste energietechniek is geschikt voor studenten in het technisch hoger onderwijs en als naslagwerk voor professionals.

Ir. J. Ouwehand is oud-docent van Saxion Hogescholen. **Ir. T.J.G. Papa** is als docent verbonden aan Saxion Hogescholen en **ir. A.C. Taal** aan de Haagse Hogeschool. **Ing. E. Post** was verbonden aan de Vrije Universiteit Amsterdam.

