

DUURZAME ENERGIETECHNIEK

Technologie voor de energietransitie

6^e, geheel herziene editie

Onder redactie van:

ir. Trynke Papa, dr. ir. Bram Entrop, drs. Jan de Geus, dr. ir. Richard van Leeuwen,
ir. John Bernard

Met bijdragen van:

dr. ir. Ballard Asare-Bediako, ir. John Bernard, dr. ir. Stefan Blankenburg, dr. ir. Jack Doomernik,
dr. ir. Bram Entrop, drs. Jan de Geus, dr. ir. Richard van Leeuwen, ir. Trynke Papa,
dr. ir. Edwin Tazelaar

Met medewerking van:

dr. ir. ing. Jacob van Berkel, ing. Arjan Bos, Rick Catau MSc, Sander Dijk MSc,
Gerco Pijffers MSc, dr. Wilko Planje

Met dank aan:

ir. Joop Ouwehand

Boom



Met onderstaande unieke activeringscode krijg je via **www.boomstudent.nl** toegang tot de online leeromgeving. Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de 6^e editie. Na activering van de code is de online leeromgeving twee jaar toegankelijk. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende editie geactiveerd worden. De code is eenmalig te gebruiken. Deze activeringscode is alleen bruikbaar voor een studentlicentie en geeft geen toegang tot de docentomgeving van het platform. Ben je docent? Dan heb je jouw activeringscode per e-mail ontvangen. Deze code activeer je op **boomdocent.nl**.

Omslagontwerp: Emma Raben

© 2025 De auteurs | Boom

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. Auteursrecht ten aanzien van tekst- en datamining en machinelearning is nadrukkelijk voorbehouden.

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. No part of this publication may be reproduced in the context of text and data mining for any other purpose which is not expressly permitted by law without permission of Boom Uitgevers.

ISBN 9789024469154

NUR 961

www.boomstudent.nl

www.boom.nl/hogeronderwijs

Inhoud

Voorwoord	9
Symbolenlijst	12
Deel A: Energiebeginselen	13
1 Energiegebruik	15
1.1 Inleiding	15
1.2 Begrippen uit de energieleer	17
1.3 Internationaal energiegebruik	19
1.4 Nationaal energiegebruik	22
1.5 Reduceren energiegebruik	25
1.6 Samenvatting	27
1.7 Literatuur	27
2 Energievoorziening	29
2.1 Inleiding	29
2.2 Energieconversie	29
2.3 Fossiele energiebronnen	32
2.4 Kernenergie	37
2.5 Duurzame energiebronnen	38
2.6 Effectieve en efficiënte energievoorziening	41
2.7 Samenvatting	43
2.8 Literatuur	43
3 Energiebeleid	45
3.1 Inleiding	45
3.2 Internationaal en Europees duurzaamheids- en energiebeleid	45
3.3 Nationaal duurzaamheids- en energiebeleid	50
3.4 Wet- en regelgeving	53
3.5 Financiële beleidsinstrumenten	56
3.6 Onderzoek, voorlichting en demonstratie	57
3.7 Samenvatting	59
3.8 Literatuur	59
Deel B: Energieproductie	61

4	Windenergie	63
4.1	Inleiding	63
4.2	Windsnelheid	64
4.3	Vermogenslevering uit wind	66
4.4	Windturbines	72
4.5	Windparken	82
4.6	Offshore windenergie	85
4.7	Lokale effecten	93
4.8	Economische aspecten	94
4.9	Toekomstige ontwikkelingen	95
4.10	Samenvatting	96
4.11	Literatuur	97
5	Energie uit water	99
5.1	Inleiding	99
5.2	Waterkracht	100
5.3	Golfenergie	115
5.4	Energie uit getijden	117
5.5	Blauwe energie	123
5.6	Energie uit temperatuurverschillen in de oceaan	129
5.7	Toekomstige ontwikkelingen	130
5.8	Samenvatting	130
5.9	Literatuur	131
6	Elektriciteit uit zonne-energie	133
6.1	Inleiding	133
6.2	Fotovoltaïsche energie – principe	136
6.3	Fotovoltaïsche energie – zonnepanelen en -systemen	151
6.4	PV-systemen in de praktijk	162
6.5	Kunststof en andere alternatieve zonnecellen	167
6.6	Saldering	172
6.7	Concentrated solar power	174
6.8	Toekomstige ontwikkelingen	174
6.9	Samenvatting	176
6.10	Literatuur	176
7	Thermische benutting van zonne-energie	179
7.1	Inleiding	179
7.2	Zonnecollectoren voor warm tapwater en verwarming	182
7.3	Ontwerp zonneboilers	194
7.4	Energiebijdrage zonneboiler	209
7.5	Toepassingen zonneboilersystemen	213
7.6	Koelen met zonne-energie	216
7.7	Toekomstige ontwikkelingen	216
7.8	Samenvatting	217
7.9	Literatuur	217

8	Energie uit biomassa	219
8.1	Inleiding	219
8.2	Beschikbaarheid verschillende soorten biomassa	222
8.3	Samenstelling biomassa	224
8.4	Energie-inhoud biomassa	226
8.5	Verwerkingsenergie	229
8.6	Berekening energiebalans	233
8.7	Bio-energie uit afvalstromen	234
8.8	Verwerkingsmethodes biomassa	234
8.9	Energiedragers	244
8.10	Vloeibare brandstoffen	244
8.11	Aquatische biomassa	246
8.12	Toekomstige ontwikkelingen	248
8.13	Samenvatting	249
8.14	Literatuur	250
9	Geothermische energie	253
9.1	Inleiding	253
9.2	Indeling geothermische energie	256
9.3	Potentieel geothermische energie	258
9.4	Geothermische systemen	263
9.5	Toepassing in Nederland	275
9.6	Milieuverontreiniging	278
9.7	Toekomstige ontwikkelingen	278
9.8	Samenvatting	279
9.9	Literatuur	280
	Deel C: Energieopslag en -conversie	281
10	Opslag van elektriciteit	283
10.1	Inleiding	283
10.2	Karakterisering opslag van elektriciteit	290
10.3	Mechanische opslag	299
10.4	Elektrochemische opslag	304
10.5	Chemische opslag	309
10.6	Elektrofysische opslag	313
10.7	Stationaire toepassingen	315
10.8	Opslag in elektrische voertuigen	321
10.9	Toekomstige ontwikkelingen	329
10.10	Samenvatting	329
10.11	Literatuur	330
11	Waterstoftechnologie	333
11.1	Inleiding	333
11.2	Historisch perspectief	334
11.3	Rol waterstof in duurzaam energiesysteem	336
11.4	Toepassingen	338
11.5	Techniek	344

11.6	Veiligheid	363
11.7	Toekomstige ontwikkelingen	365
11.8	Samenvatting	367
11.9	Literatuur	368
12	Warmteopslagsystemen	371
12.1	Inleiding	371
12.2	Fysische uitgangspunten warmteopslagsystemen	373
12.3	Actieve voelbare warmteopslagsystemen	374
12.4	Latente warmteopslagsystemen	386
12.5	Chemische warmteopslag	393
12.6	Toekomstige ontwikkelingen	398
12.7	Samenvatting	398
12.8	Literatuur	399
13	Warmtepompen	401
13.1	Inleiding	401
13.2	Werking warmtepomp	404
13.3	Warmtefactor warmtepomp	407
13.4	Soorten warmtepompen	410
13.5	Ontwerp warmtepompsysteem	424
13.6	Toekomstige ontwikkelingen	441
13.7	Samenvatting	442
13.8	Literatuur	442
	Deel D: Energietransport en -distributie	443
14	Elektriciteitstransport en -distributie	445
14.1	Inleiding	445
14.2	Achtergrondtheorie	448
14.3	Technologie en techniek	454
14.4	Modelvorming en monitoring	458
14.5	Vermogenselektronica voor transport en distributie	462
14.6	Toekomstige ontwikkelingen	463
14.7	Samenvatting	467
14.8	Literatuur	467
15	Warmtetransport en -distributie	469
15.1	Inleiding	469
15.2	Basisonderdelen warmtenet	471
15.3	Voor- en nadelen warmtenetten	478
15.4	Warmtenetgeneraties en temperatuurniveaus	478
15.5	Gebiedsaspecten	480
15.6	Distributieverliezen	481
15.7	Duurzaamheid warmtenet	482
15.8	Koudenetten	487
15.9	Toekomstige ontwikkelingen	488

15.10	Samenvatting	490
15.11	Literatuur	490
16	Gastransport en -distributie	493
16.1	Inleiding	493
16.2	De Nederlandse aardgasinfrastructuur	494
16.3	Relevantie gas in duurzaam energiesysteem	496
16.4	Duurzame gassen	497
16.5	Waterstof door aardgasleidingen	500
16.6	Toekomstige ontwikkelingen	504
16.7	Samenvatting	507
16.8	Literatuur	507
	Deel E: Energietransitie	509
17	Systeemintegratie van duurzame energiebronnen	511
17.1	Inleiding	511
17.2	Huidige energiebronnen en energiegebruik	512
17.3	Klimaatverandering beperken door CO ₂ -reductie binnen het energiesysteem	513
17.4	Versnelling en dilemma's	513
17.5	Sectorkoppeling: integratie van energienetwerken	517
17.6	Systeemintegratie als oplossing voor de onbalans binnen het energiesysteem	523
17.7	Waarde van flexibiliteit binnen systeemintegratie	524
17.8	De rol van samenwerking binnen systeemintegratie	526
17.9	Toekomstige ontwikkelingen	527
17.10	Samenvatting	528
17.11	Literatuur	529
18	Scenario's voor de energietransitie	531
18.1	Inleiding	531
18.2	Huidige situatie	532
18.3	Relevante ontwikkelingen	533
18.4	Duurzame energieopties	534
18.5	Scenario's voor de energietransitie	537
18.6	Voorbeelden energietransitiescenario's	540
18.7	Modelvorming energietransitiescenario's	544
18.8	Toekomstige ontwikkelingen	548
18.9	Samenvatting	549
18.10	Literatuur	549
19	Integratie van systemen in de gebouwde omgeving	553
19.1	Inleiding	553
19.2	De huidige situatie	554
19.3	Stakeholders	556
19.4	Systeemverandering in de energienetwerkstructuren	557
19.5	Systeemintegratie binnen de gebouwde omgeving	558

19.6	Energiehub	566
19.7	Praktisch voorbeeld: de wijk	568
19.8	Toekomstige ontwikkelingen	572
19.9	Samenvatting	572
19.10	Literatuur	573

Index		574
--------------	--	------------

Voorwoord



Duurzame energie is de energie van de toekomst. Dat komt doordat er grote risico's kleven aan onze huidige energievoorziening, die hoofdzakelijk geproduceerd wordt met fossiele brandstoffen, zoals aardolie, aardgas en steenkool.

Duurzame energiebronnen zijn energiebronnen die er altijd zullen zijn, zoals waterkracht, bio-energie, windenergie en zonne-energie. In tegenstelling tot fossiele energiebronnen dragen duurzame energiebronnen niet tot nauwelijks bij aan de emissie van broeikasgassen. De mogelijkheden om duurzame energiebronnen te gebruiken, zijn over de hele wereld ongeveer in gelijke mate aanwezig. Het beleid in veel landen, en zeker ook het Europees beleid, is erop gericht het benutten van duurzame energiebronnen de komende decennia sterk uit te breiden. Veel bedrijven zien in de toepassing van duurzame energie kansen voor nieuwe producten en diensten.

In dit boek komen alle duurzame energiebronnen aan bod. Iedere module behandelt de basisprincipes, maar ook de praktische toepassingsmogelijkheden in allerlei situaties. Er zijn rekenvoorbeelden en praktijkvoorbeelden opgenomen die toepassing van duurzame energie verduidelijken. Aan het eind van het boek, in deel E, wordt de samenhang duidelijk van alle duurzame energieopties en -maatregelen, de toekomstverwachtingen en ontwikkeling van scenario's. Een volledig duurzaam energiesysteem kent namelijk niet één oplossing maar een samenhangende integratie van oplossingen waarin veel meer dan we gewend zijn, energie wordt omgezet in verschillende energiedragers.

Duurzame energietechniek is in eerste instantie bedoeld voor studenten in het hoger onderwijs. Daarnaast is het geschikt voor tal van andere geïnteresseerden, bijvoorbeeld als zij in hun beroepspraktijk met duurzame energie te maken krijgen. Voor begrip van de meeste behandelde stof is een algemene, natuurwetenschappelijke achtergrond op havo- of vwo-niveau genoeg. Voor sommige onderdelen – dat geldt met name voor de behandeling van de principes van zonnewarmtesystemen en warmtepompen – is de stof alleen volledig te begrijpen met aanvullende basiskennis op het gebied van warmte- en stromingsleer en thermodynamica.

Dit boek sluit goed aan op *Toegepaste Energietechniek*, dat de belangrijkste soorten energietechnische toepassingen, apparaten en systemen behandelt en dat ook wordt gebruikt in het hoger onderwijs. Maar het beheersen van de stof in *Toegepaste Energietechniek* is niet nodig voor dit boek. Wel geven beide boeken samen een compleet beeld van de belangrijkste technologieën voor onze huidige energievoorziening.

Duurzame energie is wereldwijd in ontwikkeling. Dit boek beschouwt de perspectieven dan ook mondiaal. Wel is het geschreven voor het Nederlandse taalgebied; voorbeelden zijn vaak afkomstig uit Nederland of België. Ook veel statistische gegevens en beschouwingen over energiebeleid richten zich op de Europese Unie, of meer specifiek op Nederland of België.

Dit boek is in de Nederlandse taal geschreven. Daarom hebben we ook in figuren anderstalige termen zo veel mogelijk vermeden, behalve als de betreffende termen zeer gangbaar zijn. Dit boek bevat om deze reden toch een flink aantal figuren met Engelstalige terminologie.

De inhoud van deze 6^e druk is geactualiseerd. In het boek is één module toegevoegd, namelijk module 19 over de integratie van systemen in de gebouwde omgeving.

Vanaf deze 6^e druk is *Duurzame energietechniek* ook via het online platform Boom Academie te raadplegen. In deze online omgeving zijn opdrachten en video- en weblinks opgenomen. Daarnaast biedt de online omgeving twee extra modules, namelijk een nieuwe module over kernenergie, en een module met achtergrondinformatie over zonne-energie die ook al in eerdere edities te raadplegen was. De module over zonne-energie biedt achtergrondkennis en verdieping bij module 6 (Elektriciteit uit zonne-energie) en module 7 (Thermische benutting van zonne-energie). In de modules 6 en 7 zijn de grondbeginselen van zonne-energie slechts summier beschreven; deze grondbeginselen kunnen in de online module over zonne-energie bestudeerd worden.

Nog altijd voelen wij ons schatplichtig aan Wim Gilijamse, die in 2012 overleed. Wim heeft veel betekend voor de ontwikkeling van duurzame energie in Nederland. Hij heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de eerste drukken van dit boek. Ook danken wij Joop Ouweland, die bij dit boek betrokken was vanaf het allereerste begin tot en met de vorige druk.

Redactie *Duurzame energietechniek*, 6^e editie

Trynke Papa, Bram Entrop, Jan de Geus, Richard van Leeuwen, John Bernard
Voorjaar 2025

Deel A: Energiebeginselen



1 Energiegebruik

2 Energievoorziening

3 Energiebeleid

In dit inleidende deel bespreken we het begrip energie en leggen we de eigenschappen van energie uit.

Ons huidige energiegebruik laten we zien aan de hand van (inter)nationale gebruiksgegevens. Ook geven we handreikingen voor het beperken van het energiegebruik.

De energiesector voorziet in onze energiebehoefte, waarbij momenteel vooral fossiele brandstoffen de belangrijkste bron zijn. We bespreken de beginselen van energieconversie, fossiele energiebronnen, kernenergie, duurzame energiebronnen en een efficiënte en effectieve energievoorziening.

Tot slot staan we in dit deel stil bij internationale en nationale initiatieven om ambities te tonen en om energiebeleid vast te leggen. Behalve de top-downbenadering komen hier bottom-up-initiatieven langs vanuit individuele bedrijven en personen of bescheiden collectieven. Demonstratie en voorlichting moeten ervoor zorgen dat innovaties het grote publiek kunnen bereiken.



Energiegebruik

1

1.1 Inleiding

Leerdoelen

- Je kent op hoofdlijnen de historische ontwikkeling van energiegebruik door de mens.
- Je bent op de hoogte van de verschillende vormen van energie, zoals elektrische, thermische en chemische energie.
- Je weet wat fossiele brandstoffen zijn en welke risico's ze met zich meebrengen.
- Je kent de basisbegrippen uit de energieleer, zoals energie, vermogen en de hoofdwetten van de thermodynamica.
- Je kent het verschil tussen primaire en secundaire energiedragers.
- Je weet wat energieconversie is en kunt voorbeelden noemen van energieomzettingen.
- Je weet hoe het mondiale en Europese energiegebruik eruitziet en welke landen hier een bijzondere rol in vervullen.
- Je bent op de hoogte van het nationale energiegebruik en hoe dit verschilt per sector.
- Je kent de Trias Energetica en weet hoe in drie stappen te komen tot een duurzaam energiesysteem.



Zonder energie staat alles stil. Dit geldt om te beginnen voor het leven zelf. Al het plantaardig en dierlijk leven is afhankelijk van het invangen van zonne-energie. Dit invangen gaat in het geval van planten door middel van fotosynthese direct, of in het geval van dieren – die planten of andere dieren eten – indirect. In dit biologische opzicht functioneert de mens niet anders dan andere dierlijke levensvormen. Wel anders is dat de mens er door technologieontwikkeling in is geslaagd, steeds grotere hoeveelheden energie voor zich te laten werken om in steeds meer en complexere behoeften te voorzien.

De ontdekking van het vuur kan als eerste stap worden gezien. Plantaardig materiaal bleek niet alleen als voedsel te kunnen dienen, maar kan ook worden verbrand. Door het verbranden van met name hout, kon men zich warmen en voedsel beter verteerbaar maken. Tot ongeveer 150 jaar geleden, was het verbranden van hout de belangrijkste vorm van energieconversie. De volgende grote stap in energietechnologie hangt samen met de industriële revolutie. De mechanisatie van productieprocessen kon alleen tot stand komen, dankzij een bron van arbeid die de spierkracht van mens en dier ver te boven ging. Deze bron was de omzetting van warmte in mechanische arbeid. De eerste technologie die dit kon verwezenlijken, was de stoommachine. De behoefte aan brandstof verveelvoudigde echter en er moest worden gezocht naar een nieuwe energiebron.

Na de stoommachine heeft de energietechnologie zich stormachtig ontwikkeld. Om transport en aandrijving van machines mogelijk te maken, werden diesel- en benzinemotoren ontwikkeld. De generator zorgde voor omzetting van mechanische arbeid in elektriciteit, waardoor een heel nieuwe reeks van processen van energie kon worden voorzien. Kachels en verwarmingsketels bleken meer comfort te kunnen bieden dan het houtvuur. Ze waren ook gewenst, gezien de milieuschadelijke gevolgen van houtvuren in dichtbevolkte gebieden. Verbranding was de enige manier om energie vrij te maken uit brandstoffen. De behoefte aan brandstoffen nam dus steeds verder toe. Naast steenkool werden in toenemende mate ook aardolie en aardgas ingezet.

Steenkool, aardolie en aardgas zijn zogeheten fossiele energiebronnen: zonne-energie die honderden miljoenen jaren geleden werd vastgelegd in de vorm van koolwaterstoffen in plantaardig en dierlijk materiaal. Een grote verzameling van technologische ontwikkelingen hebben ertoe geleid, dat onze maatschappij voor een groot deel afhankelijk is van deze **fossiele brandstoffen**. Energie is niet zomaar een product; het is een levensvoorwaarde voor al onze maatschappelijke processen. We hebben warmte, koude en licht nodig om onze leefomgeving het hele jaar door aangenaam te maken. Voedsel moeten worden bewaard en bereid. Producten moeten worden geproduceerd en getransporteerd. Overal wordt energie gebruikt. Onze afhankelijkheid van energie maakt het dan ook een groot probleem dat onze huidige energievoorziening, die bijna geheel gebaseerd is op het verbranden van fossiele brandstoffen, niet duurzaam is. Aan het gebruik van fossiele brandstoffen zijn grote risico's verbonden, namelijk:

- dat bij de verbranding van fossiele brandstoffen voor het milieu schadelijke afvalproducten vrij komen;
- dat voorraden fossiele brandstoffen eindig zijn;
- dat voorraden fossiele brandstoffen regionaal geconcentreerd zijn.

In deze methode worden technologieën aangereikt en toegelicht om onze energievoorziening duurzaam te maken, zodat deze risico's in de toekomst niet meer van toepassing zijn (zie figuur 1.1). Voordat we die duurzame technologieën behandelen, bespreken we in de volgende paragraaf eerst algemene begrippen uit de energieleer, om de eigenschappen van energie te leren begrijpen. Om ook de omvang en aard van het huidige energiegebruik te bevatten, zal hier in de derde en vierde paragraaf bij stil worden gestaan. Tot slot wordt beschreven hoe het energiegebruik kan worden gereduceerd. Want wanneer de behoefte aan energie daalt of in ieder geval enigszins kan worden gestuurd, hoeven energieomzettingen in de voorliggende keten, die we energievoorziening noemen, niet plaats te vinden.



Figuur 1.1 Technologieën voor een duurzame energievoorziening (shutterstock.com)

Maak nu de opdracht:

Traditionele brandstoffen



1.2 Begrippen uit de energieleer

Ondanks dat energie overal aanwezig is, is het niet gemakkelijk om uit te leggen wat energie is. De filosoof Aristoteles (384-322 v. Chr.) vormde ooit het woord *ἐνέργεια* (energeia) uit het Griekse voorzetsel 'en', dat 'in' betekent en het zelfstandig naamwoord 'ergon', dat 'werk' betekent. Het woord kan dus worden vertaald als 'in werking zijn' (Van Dongen, 2003). Tegenwoordig weten we dat energie vele verschijningsvormen kent. Hierbij valt te denken aan elektrische energie, mechanische energie, chemische energie, nucleaire energie, thermische energie en elektromagnetische energie. Het *Système International d'unités*, oftewel het SI-stelsel, heeft voor energie in al deze verschijningsvormen de joule (J) gereserveerd.

Eén joule is een zeer kleine hoeveelheid energie, waar een ledlamp van 5 watt bijvoorbeeld maar 0,2 seconde lang op kan branden. Het is daarom belangrijk bekend te zijn met de verschillende voorvoegsels, zoals bijvoorbeeld kilo, dat staat voor 1.000 en mega dat staat voor een factor 1.000.000.

Ga voor een completer overzicht naar de bijlage:
Eenheden en conversiefactoren



De eigenschap van een apparaat om een bepaalde hoeveelheid elektrische energie per seconde om te zetten in het geval van de lamp in licht en warmte, noemen we **vermogen**. Het begrip vermogen drukt namelijk uit hoeveel (in dit geval elektrische) energie per eenheid van tijd wordt omgezet naar een andere vorm van energie. De eenheid van vermogen is joule per seconde (J/s) oftewel watt (W).

Wanneer je een energierekening bekijkt, dan zie je daar vaak kilowatturen (kWh) of kubieke meters aardgas (m³) op terug. Dit zijn andere afwijkende eenheden om een bepaalde hoeveelheid energie uit te drukken. Op verpakkingen van etenswaar wordt het begrip calorieën (cal) gebruikt om de hoeveelheid energie aan te duiden. Het omrekenen van kWh naar J is vrij eenvoudig, want er zitten zestig minuten in één uur en zestig seconden in één minuut.

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 1000 \text{ J/s} \cdot 60 \text{ min/uur} \cdot 60 \text{ s/min} = 3.600.000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Onder atmosferische druk is de temperatuurstijging van 1 gram water met 1 graad Celsius of Kelvin naar de oorspronkelijke definitie 1 cal, wat gelijk staat aan 4,186 J. Hiermee moet je je niet vergissen in het noteren van de eenheden, want 1 Cal met een hoofdletter is notabene 1 kcal oftewel 1.000 cal. De hoeveelheid energie die wordt vertegenwoordigd door één kubieke meter aardgas, wil in de praktijk nog weleens variëren, omdat aardgas een mengsel is van verschillende gassen. De **calorische waarde** of verbrandingswaarde van een stof is de (thermische) energie die bij de verbranding van die stof vrijkomt. In het geval van vaste en vloeibare stoffen wordt deze waarde meestal in megajoule per kilogram (MJ/kg) uitgedrukt. In het geval van gassen is dat meestal megajoule per kubieke meter (MJ/m³). De hoeveelheid energie per volume gas is echter afhankelijk van de omgevingscondities temperatuur en luchtdruk, daarom is de term **normaal kubieke meter** (m³) geïntroduceerd. Onder normaal kuub wordt verstaan een hoeveelheid gas, die het volume van 1 m³ inneemt bij een temperatuur van 273 K en een luchtdruk van 101,3 kPa. Er is een onderscheid tussen de calorische onder- en bovenwaarde. In het Engels spreekt men van respectievelijk Lower Heating Value (LHV) en Higher Heating Value (HHV). In het laatste geval wordt ook de energie die vrijkomt bij condensatie van de bij verbranding ontstane waterdamp meegenomen. Voor standaard Nederlands aardgas is de calorische onderwaarde 31,65 MJ/m_n³ en de bovenwaarde 35,17 MJ/m_n³. De calorische onderwaarde wordt ook wel stookwaarde genoemd.

Aardgas is een voorbeeld van een **primaire energiedrager**. Primaire energiedragers zijn vormen van energie, zoals we die in de natuur aantreffen en die nog geen bewerking hebben ondergaan (behalve dan de bewerking die het kenmerkende geurtje aan aardgas toevoegt). Aardolie en steenkool zijn voorbeelden van primaire energiedragers; het zijn, net als aardgas, fossiele energiedragers. Uit deze brandstoffen is de chemische energie te benutten door ze te verbranden. Ook in het geval van duurzame energiebronnen is er sprake van primaire energie. Voorbeelden zijn de potentiaalenergie van water in een stuwmeer, de elektromagnetische energie in zonnestraling, de kinetische energie van de wind en de chemische energie in organische verbindingen van biologische aard. Mede vanuit praktisch oogpunt wordt bij hernieuwbare energiebronnen ook over primaire energie gesproken voor de direct hieruit voortkomende elektrische of thermische energiestroom.

Eindgebruikers van energie hebben in het algemeen behoefte aan energie in meer hanteerbare vorm dan bruinkool, steenkool of aardolie, zoals elektriciteit, warmte of transportbrandstoffen. Dit noemen we **secundaire energiedragers**. Om deze secundaire energiedragers uit primaire energiedragers te maken, is energieomzetting of energieconversie nodig. De hele keten van energieconversie, energieopslag en energietransport noemen we een energiesysteem.

Er zijn een paar spelregels waar energieprocessen zich per definitie aan houden; de hoofdwetten van de **thermodynamica**. De eerste hoofdwet van de thermodynamica is de wet van behoud van energie. In een gesloten systeem blijft de hoeveelheid energie gelijk. Dit houdt in dat energie in feite niet kan worden gemaakt of vernietigd. Wanneer een warme kop koffie van 50 °C afkoelt tot de omgevingstemperatuur van 20 °C, zal de thermische energie vanuit de koffie, deels via de wand van de mok, de omringende lucht opwarmen. Wanneer we de temperatuur van de koffie willen terugbrengen naar de oorspronkelijke 50 °C, moeten we opnieuw de hoeveelheid energie toevoeren, die zojuist is onttrokken aan de koffie. Dit laatste proces is in hoeveelheid energie weliswaar gelijk aan het eerste proces, maar toch is het in de praktijk zo dat dit nooit vanzelf zal gebeuren.

Hier komt de tweede hoofdwet van de thermodynamica om de hoek kijken, die aangeeft dat thermische processen altijd een zekere mate van onomkeerbaarheid kennen. Er moet dan energie in de vorm van arbeid, mechanische energie, aan het proces worden toegevoerd om de thermische energie vanuit de omgeving weer in de koffie in de mok te kunnen krijgen. Deze omzettingsprocessen, energieconversies genaamd, zullen in de volgende module worden behandeld.

Het uiteindelijke doel van een energiesysteem is het vervullen van zogeheten energiefuncties bij de eindgebruikers. In woningen bijvoorbeeld zijn de belangrijkste energiefuncties: ruimteverwarming, warmwaterproductie, verlichting, ventilatie, voedselkoeling, reiniging en communicatie. In de dienstensector vinden we gelijksoortige energiefuncties, maar in kantoorgebouwen is het aandeel van koeling door de aanwezigheid van elektrische apparatuur groter, omdat een aanzienlijk deel van de elektrische energie die wordt gebruikt, wordt omgezet in warmte. In de transportsector is de energiefunctie het verplaatsen van mensen of goederen. Deze functie wordt uitgedrukt in personenkilometers of tonkilometers. In de industrie zijn energiefuncties gerelateerd aan het productieproces, waarbij functies als verhitten, drogen, vermalen of verspanende bewerkingen veel energie kunnen vragen. Om een beter beeld te krijgen van hoe groot het energiegebruik eigenlijk is, wordt daar in de volgende twee paragrafen bij stil gestaan.

Maak nu de opdrachten:

- Omrekenen energiegebruik kantoor
- Omrekenen energiegebruik woning
- Berekenen energiegebruik kachel
- Rendement gasketel



1.3 Internationaal energiegebruik

In deze paragraaf wordt eerst stilgestaan bij het energiegebruik in de wereld, daarna gaan we in op het energiegebruik in Europa.

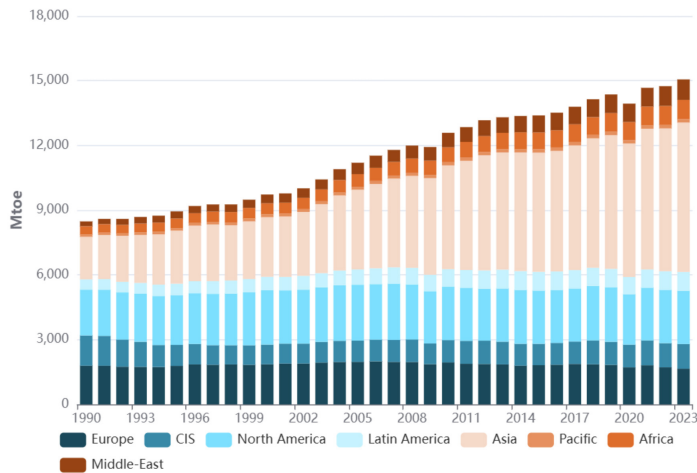
1.3.1 Mondiaal energiegebruik

Het energiegebruik in de wereld is uiteraard niet gemakkelijk te achterhalen en er zijn dan ook verschillende waarden beschikbaar. Enerdata (2024) spreekt van een mondiaal energiegebruik van 14.899 Mtoe. De aanduiding Mtoe staat voor **Megaton olie-equivalent**; 1 ton olie-equivalent is 11,63 MWh of 41,868 GJ. Het totale mondiale energiegebruik is daarmee ongeveer gelijk aan 624 EJ of $173.275,37 \cdot 10^9$ MWh. Dit is een onvoorstelbaar grote waarde, die in de buurt komt van een hoeveelheid energie opgeslagen in 102 miljard vaten olie (zie figuur 1.2). Het Internationale Energie Agentschap (International Energy Agency IEA) stelt in haar jaarlijkse rapportage *World Energy Outlook*, dat het aandeel elektrisch energiegebruik in 2040 het grootste huidige aandeel energiegebruik, olie, zal gaan overnemen (IEA, 2019). Ondanks dat het nu nog heel gebruikelijk is om energiehoeveelheden in olie-equivalenten uit te drukken, zonder altijd rekening te houden met de diversiteit in kwaliteit van olie en dus energie-inhoud, zal in veel landen een bonte mix van energiedragers worden ingezet om aan de energiebehoefte te voldoen.

In figuur 1.3 is te zien dat met name in Azië veel energie wordt gebruikt, namelijk ruim 46% van het totale energiegebruik in de wereld. Bedenk hierbij echter wel dat in Azië meer dan de helft van de wereldbevolking woont. China gebruikte in 2023 de grootste hoeveelheid energie in de wereld, maar (rekening houdend met bevolkingsaantallen in 2023) per inwoner gemeten gebruikte men in de Verenigde Staten ruim twee keer zoveel. China kent een jaargemiddelde van 33,2 MWh/inwoner en de Verenigde Staten 73,5 MWh/inwoner. India is naar inwoneraantal het op een na grootste land in de wereld en kent een energiegebruik op jaarbasis van slechts 9,2 MWh/inwoner. Rusland is naar grondgebied het grootste land ter wereld en komt met jaarlijks 67,0 MWh/inwoner behoorlijk in de buurt van de Verenigde Staten. Nederland en België doen het met respectievelijk 39,2 en 46,8 MWh/inwoner ook niet heel rustig aan.



Figuur 1.2 *Het jaarlijkse energiegebruik in de wereld is ongeveer gelijk aan de hoeveelheid energie opgeslagen in 102 miljard vaten olie (shutterstock.com)*



Figuur 1.3 Het energiegebruik in de wereld uitgedrukt per regio in Mtoe over de periode 1990 tot en met 2023 (Enerdata, 2024)

1.3.2 Europees energiegebruik

Eurostat (2024) geeft aan dat het energiegebruik in Europa in 2022 1.257 Mtoe was. Dit was het totale energiegebruik van 27 Europese landen, met op 1 januari 2022 circa 447 miljoen inwoners. In vergelijking met 1990, toen er 475 miljoen Europeanen waren (met het Verenigd Koninkrijk erbij), is het energiegebruik redelijk constant gebleven. Een gegeven dat betrekking heeft op energievoorziening en niet zozeer energiegebruik, is dat in de periode 2007–2022 het aandeel van energie uit hernieuwbare bronnen is gestegen, van 10,6 naar 23%. Ierland, Malta, België, Luxemburg en Nederland bungelden in 2022 met een aandeel van 13 tot en met 15% uit hernieuwbare bronnen onderaan.

In de sector industrie werd in 2022 25% van het Europese energiegebruik gebruikt, oftewel 13.157 PJ (zie figuur 1.4). De winning van steen- en bruinkool nam in Europa in de afgelopen 20 jaar sterk af, terwijl alle landen (met uitzondering van Malta) wel steenkool gebruiken: in totaal toch nog circa 125 miljoen ton in 2023, terwijl er maar 50 miljoen ton in Europa werd gewonnen. De productie en het gebruik van bruinkool in Europa werd in 2023 geschat op 223 miljoen ton (Eurostat, 2024).