

Warmte in de woonomgeving

Bronnen en systemen

Warmte in de woonomgeving

Bronnen en systemen

Dit boek is samengesteld onder redactie van Business Development Holland b.v. te Harderwijk. BDH is een expertorganisatie op het gebied van strategieontwikkeling en marketingcommunicatie voor de utiliteits- en woningbouw en voor de energiesector.

Auteurs: Paul Friedel (Energy Matters), Peter Oostendorp (HR Advies), Peter Wagener (Business Development Holland).

Redactie Gasterra: Anton Buijs, Henk Ensing, Hans Overdiep.

Reviews: Ernst-Jan Bakker (TNO Gebouwde Omgeving), Heinz Freese (KIWA Gastechology).

Eindredactie: Benne Holwerda

Figuren en illustraties: ABF Research, Agentschap NL Energie & Klimaat, G. van Beek Kolen & Olie, BP Energy Review, Business Development Holland, CBS, Daikin, Ecofys, De Energiezaak, EHPA, Energy Matters, Essent, EurObserver, Benne Holwerda, HR Advies, IEA, Inventum, Itho Daalderop, Milieu Centraal, Ministerie van BZK/WWI, Nationaal Archief/Spaarnestad Photo, Nederlands Openluchtmuseum Arnhem, Nefit, Oretro Hengelo(O), Peter van Overbeeke, Rotterdam Engineering, Science Center NEMO Amsterdam, Stadtwerke München, E.J. Wagenaar, Remeha, Sepemo.eu, Shutterstock, Techneco, TK Houten Vloeren, TNO Gebouwde Omgeving, Vaillant, Vasco, Verwarming & Ventilatie, VHK-Delft, WM Grondboorbedrijf, WoON 2009, www.microwkk.nl, www.panopictures.nl

Concept en realisatie: Castel International Publishers

Vormgeving: Eldad Groenman, Wim de Vries, Antoon van Son en Sylvia Sopamena (Castel Communicatie)

© 2012 GasTerra / Castel International Publishers

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelelvoudigd, 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 toestemming van de uitgever.

ISBN 978 90 79147 15 1
NUR 600

www.bdho.nl
www.energymatters.nl
www.castel.nl
www.gasterra.nl

Voorwoord	8		
Hoofdstuk 1 Verwarming in Nederland	11		
1.1 Verduurzaming in gebouwde omgeving	11		
1.2 Energietransitie	12		
1.3 Energie in de gebouwde omgeving	14		
1.4 Technologische ontwikkelingen	14		
1.5 Leeswijzer	15		
Hoofdstuk 2 Verwarmen in de twintigste eeuw	17		
2.1 Hout, kolen en lichtgas	17		
2.2 Olie en aardgas	21		
2.3 Ontwikkeling in comfort en energiegebruik	22		
2.4 Energiebesparing	23		
Hoofdstuk 3 Energie in de woningbouw	27		
3.1 Woningvoorraad, ontwikkeling en prognose	27		
3.1.1 De huidige woningvoorraad	27		
3.1.2 Ontwikkeling van de woningvoorraad	32		
3.1.3 Ontwikkelingen in de samenstelling van huishoudens	32		
3.2 Ontwikkeling van het energiegebruik	34		
3.2.1 Ruimteverwarming	35		
3.2.2 Warm water	35		
3.2.3 Ventilatie	36		
3.2.4 Koeling	37		
3.2.5 Elektriciteitsverbruik	37		
3.3 Energielabels	38		
3.3.1 Systematiek van energielabels	38		
3.3.2 Het label als instrument	40		
Hoofdstuk 4 Aardgas en energietransitie	43		
4.1 Aardgas in Nederland	43		
4.1.1 Huishoudelijk gasverbruik	44		
4.1.2 Nederland binnen Europa	44		
4.2 De beschikbaarheid van energiedragers	45		
4.2.1 De beschikbaarheid van aardgas	45		
4.2.2 Schaliegas	46		
4.2.3 Vloeibaar aardgas	46		
4.3 Aardgas in de gebouwde omgeving	47		
4.4 Naar een duurzame energievoorziening	49		
4.4.1 De energietransitie	49		
4.4.2 Groen gas en de energietransitie	50		
4.4.3 Plaats van aardgas in de toekomstige energievoorziening	51		
4.4.4 Verduurzaming van de elektriciteitsproductie	51		
4.5 De kosten van energie	52		
Hoofdstuk 5 Onderdelen van het verwarmingssysteem	55		
5.1 Bouwstenen van het verwarmingssysteem	55		
5.1.1 Bouwstenen in de praktijk	56		
5.2 Distributie- en afgiftesystemen	57		
5.2.1 Centrale verwarming of lokale warmteproductie?	57		
5.2.2 Afgiftesystemen voor hoge en lage temperatuur	58		
5.2.3 Warmtetransport over grote afstanden	60		
5.3 Energieopslag voor woningen	60		
5.3.1 Water: de klassieke opslagmethode	60		
5.3.2 Bodemopslag: zomerwarmte 's winters gebruiken	61		
5.3.3 Phase change materials	62		
5.3.4 Thermochemische opslag	62		
5.4 Regelingen	63		
5.5 Het kloppend hart: het conversiesysteem	65		
5.5.1 Ontwikkelingen in de twintigste eeuw	65		
5.5.2 Bivalente verwarmingssystemen	66		
5.6 Vergelijken van verwarmingssystemen	66		
Hoofdstuk 6 De huidige standaard: de HR-ketel	71		
6.1 De verbrandingswaarde van aardgas	71		
6.2 De ontwikkeling van de HR-ketel	73		
6.2.1 Conventionele cv-ketels	73		
6.2.2 VR-ketels	73		
6.2.3 HR-ketels	73		
6.3 Rendementen van moderne HR-ketels	75		
6.4 Overige kenmerken van moderne HR-ketels	76		
6.5 Verwachte verbeteringen	78		

Hoofdstuk 7 Micro-wkk	81	Hoofdstuk 10 Gebouwgebonden collectieve systemen	129
7.1 Warmte én elektriciteit tegelijk produceren	81	10.1 Collectieve systemen	129
7.2 Technische principes van micro-wkk	83	10.2 Collectieve systemen met ketels	130
7.2.1 Externe verbranding	83	10.3 Collectieve systemen met warmtepompen	130
7.2.2 Interne verbranding	85	10.4 Collectieve systemen met warmtekrachtkoppeling	132
7.2.3 Brandstofcellen	86	10.5 Prestaties van collectieve systemen	134
7.3 Kenmerken van kleinschalige wkk-technieken	88	Hoofdstuk 11 Warmtenetten	137
7.3.1 De Stirlingmotor	88	11.1 Het principe	137
7.3.2 De brandstofcel	91	11.2 Grootschalige versus kleinschalige warmtenetten	140
7.4 Combinaties met andere concepten	92	11.3 Aanleg van warmtenetten	141
7.5 Verwachte ontwikkelingen	93	11.4 Technische prestaties	142
Hoofdstuk 8 Warmtepompen	97	11.5 Economie en beleid	142
8.1 Het principe van de warmtepomp	97	11.6 Verwachte ontwikkelingen	144
8.2 De elektrische warmtepomp	98	Hoofdstuk 12 Voorbeeldprojecten	147
8.3 Andere typen warmtepompen	100	12.1 Warmtepompen: Bomenwijk, Elzenlaan Delft	148
8.3.1 De gasmotorwarmtepomp	100	12.2 Warmtepompen en zon-thermisch: Schalkwijk, Haarlem	152
8.3.2 De gasabsorptiewarmtepomp	101	12.3 Micro-wkk: Smart Power City Apeldoorn	154
8.4 Besparing op primaire energie	101	12.4 Zonnewarmte: Froukemaheerd	156
8.5 Combinaties met andere concepten	105	Hoofdstuk 13 Thermodynamica in vogelvlucht	161
8.6 Warmtebronnen voor warmtepompen	106	13.1 Energie, arbeid, warmte en efficiency	161
8.7 Uitvoeringsvormen	108	13.1.1 De efficiency van een warmtemachine	163
8.7.1 Lucht/water-warmtepomp in split-uitvoering	108	13.1.2 De efficiency van een warmtepomp	163
8.7.2 Lucht+ventilatielucht/water-warmtepomp	108	13.2 De gaswet en de warmtecyclus	164
8.7.3 Bodem/water-warmtepomp	108	13.2.1 Theorie van de warmtewet	164
8.7.4 Water/water-warmtepomp	108	13.2.2 Het Carnotproces	165
8.8 De kwaliteit van de installatie	109	13.2.3 Een rondreis door het PV-diagram	165
8.9 Prestaties van warmtepompen	111	13.2.4 De praktijk	167
8.9.1 Elektrische warmtepompen	111	13.3. Temperatuurverschil	169
8.9.2 Gaswarmtepompen	111	Noten	170
8.9.3 Tapwaterbereiding met warmtepompen	111	Conversietabellen	172
8.9.4 Rendementsgetallen bij warmtepompsystemen	113	Bronverwijzing en literatuur	175
8.10 Huidige implementatie van warmtepompen	114	Register	177
Hoofdstuk 9 Zon-thermisch	117		
9.1 Het principe	117		
9.1.1 Passieve zonnewarmte	117		
9.1.2 Lowtech oplossingen	117		
9.1.3 Zonnecollectoren	118		
9.1.4 Zonneboiler voor warm water of ruimteverwarming?	119		
9.2 Kenmerken	120		
9.3 Combinaties met andere concepten	124		
9.4 Marktpositie	125		
9.5 Verwachte ontwikkelingen	125		

Voorwoord



De schoonste vorm van energiegebruik is géén energiegebruik. In de energiediscussie wordt dat nog wel eens vergeten. Het streven naar een duurzame energievoorziening begint met het reduceren van onze energiebehoefte. Daarna pas komt het streven om zo veel mogelijk in die energiebehoefte te voorzien met hernieuwbare energiebronnen als wind, zon en biomassa. Het is een feit dat de fossiele brandstoffen aardolie, aardgas en steenkool momenteel voor 90% of meer in onze primaire energiebehoefte voorzien. Zolang hernieuwbare energiebronnen dat aandeel nog niet overnemen, is verbetering van de energie-efficiency van het allergrootste belang.

Aardgastoeepassingen met hoge rendementen kunnen hier de helpende hand bieden. Van alle fossiele brandstoffen heeft aardgas relatief de beste eigenschappen en de laagste milieubelasting. Aardgas is bovendien flexibel inzetbaar en leent het zich goed voor innovatieve en efficiënte oplossingen. Toepassing van aardgas leidt in veel situaties tot een directe verlaging van de CO₂-uitstoot.

In het transitietijdperk winnen hernieuwbare of duurzame energiebronnen geleidelijk aan betekenis. De verwachting is dat duurzame bronnen halverwege deze eeuw een significante bijdrage zullen leveren aan de totale energievoorziening. Zelfs als het verduurzamingsproces versnelt, zal aardgas dus nog tientallen jaren een belangrijke rol blijven spelen. De gasvoorraden zijn daarvoor gelukkig groot genoeg; die strekken tot ver in deze en zeer waarschijnlijk ook de volgende eeuw.

Dit legt een dubbele verantwoordelijkheid op onze schouders. Aan de ene kant proberen we de transitie naar een echt duurzame energie-economie zo veel mogelijk te versnellen. Aan de andere kant, als fossiele energiebronnen moeten worden ingezet, is aardgas vaak de beste keuze. Het is immers de meest efficiënte fossiele brandstof, die zich goed laat combineren met duurzame bronnen.

GasTerra zet zich in voor een betrouwbare energievoorziening én voor de beperking van het primaire energiegebruik in Nederland. Binnen onze organisatie is een schat aan kennis aanwezig op het gebied van aardgas en aardgastehnologie, maar we kijken ook naar technieken die niet gebaseerd zijn op aardgas, vooropgesteld dat ze een bijdrage leveren aan de energietransitie. We zien het als onze plicht om onze kennis te delen en het maatschappelijk debat over de energievoorziening te bevorderen. Mede om die reden geeft GasTerra een serie boeken uit over aardgasgerelateerde onderwerpen.

Dit boek over woningverwarming is het vijfde in deze serie. Het biedt een overzicht van de technieken die momenteel beschikbaar zijn voor het efficiënt verwarmen van woonhuizen. De focus ligt daarbij op die technieken die meer dan gemiddeld efficiënt zijn. Ook geeft het boek een beeld van de enorme veranderingen die zich de laatste vijftig jaar in Nederland hebben voltrokken op het gebied van woningverwarming. Zo is, mede door de komst van de HR-ketel ruim 30 jaar geleden, het gemiddelde gasverbruik in een Nederlandse woning inmiddels gehalveerd; een fantastisch resultaat om op voort te bouwen. Wij hopen dan ook dat dit boek concreet bijdraagt aan de verdere verduurzaming van de energievoorziening in de gebouwde omgeving.

Gertjan Lankhorst
CEO GasTerra

Hoofdstuk 1

Verwarming in Nederland

De manier waarop in Nederland woningen worden verwarmd, is de afgelopen vijftig jaar ingrijpend veranderd. De woningbouw heeft zich sterk ontwikkeld, bewoners zijn gewend geraakt aan een hoog comfortniveau en ook de verwarmingstechniek zelf heeft een ongekende ontwikkeling doorgemaakt. Dit boek laat zien waar dit alles toe heeft geleid. Het geeft een overzicht van de huidige stand van zaken, van de beschikbare technieken en van de belangrijkste ontwikkelingen die zich voordoen. Die ontwikkelingen zijn de opmaat naar een toekomst waarin de energievoorziening in de gebouwde omgeving in hoge mate duurzaam zal zijn.

1.1 Verduurzaming in de gebouwde omgeving

Te midden van andere sectoren is de gebouwde omgeving een belangrijke energiegebruiker in Nederland. Energie wordt er vooral gebruikt voor verwarming, warm water en koeling. In nieuwbouwwoningen is het energiegebruik voor verwarming relatief gering. Een substantieel deel van het totale energiegebruik in de gebouwde omgeving komt dan ook voor rekening van de bestaande woningbouw.

Geopolitieke ontwikkelingen, de eindigheid van fossiele energiebronnen en zeker ook de relatief snelle verandering van het klimaat stellen alle energiegebruikers in de wereld voor de opgave hun energiegebruik ingrijpend te verduurzamen. Deze opgave geldt vooral voor de welvarende economieën en treft alle sectoren: industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving.

In figuur 1 op pagina 12 is zichtbaar hoe de EU-landen erin slagen om over te stappen op duurzame energie. De figuur geeft zowel de doelstellingen voor het jaar 2020 als de stand van zaken in 2009 (beide als percentage van het totale primaire energiegebruik). De doelstellingen in deze figuur zijn afgeleid van het beleid op Europees niveau. Europa heeft nieuwe regelgeving ontwikkeld voor het energiegebruik in de gebouwde omgeving. Deze regels zijn vastgelegd in de Energy Performance of Buildings Directive (EPBD).

Uit figuur 1 valt op te maken dat juist in Nederland een duidelijke omslag nodig is in de energievoorziening. Dit geldt ook voor de woningsector. Die omslag kan niet anders dan geleidelijk plaatsvinden, maar moet wel met gevoel voor urgentie worden ingezet. Dit veranderingsproces, dat verderop in dit boek aan bod komt, wordt inmiddels overal aangeduid als 'energietransitie'.

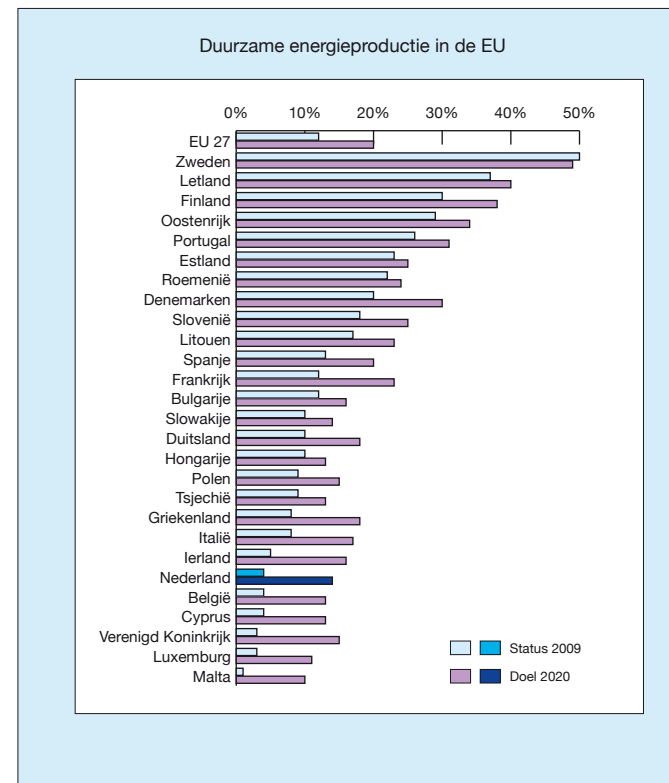
Er zijn veel technieken beschikbaar die kunnen worden ingezet om energiebesparing te bewerkstelligen en het milieu te ontlasten. Nog steeds worden nieuwe toestellen en systemen ontwikkeld. Dit boek geeft een overzicht van de ontwikkelingen die op korte termijn inzetbaar zijn.

1.2 Energietransitie

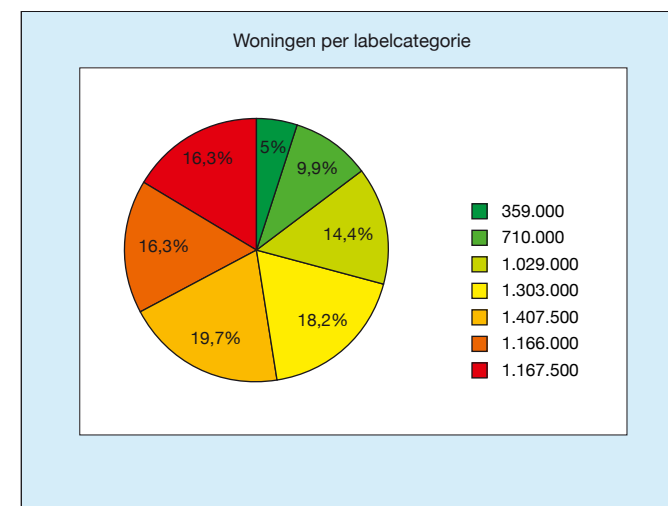
In allerlei publicaties over de energietransitie wordt duidelijk dat deze overgang van volledig fossiele energiebronnen naar (bijna) volledig duurzame energiebronnen niet een kwestie is van jaren maar van decennia. In de meeste studies en plannen ligt de horizon voor de energietransitie bij het jaar 2050.

Twee aspecten zijn van invloed op de snelheid waarmee nieuwe technologie door de markt wordt geabsorbeerd. Het eerste is de technische levensduur van bestaande verwarmingsapparaten. Verwarmingstoestellen gaan in de regel vijftien tot twintig jaar mee en de bijbehorende distributiesystemen (radiatoren en dergelijke) nog langer. Dit betekent dat apparatuur voor verwarming en warm water, bij een gemiddelde technische levensduur van achttien jaar, gemiddeld nog twee keer vervangen zal worden tot het jaar 2050. Daarna moeten de apparaten in principe geschikt zijn voor een grotendeels duurzame energievoorziening. Een versnelling is hier nauwelijks mogelijk. Maatschappelijk en economisch gezien is het niet haalbaar apparatuur halverwege de technische levensduur al te vervangen. Bestaande apparatuur upgraden kan wel, bijvoorbeeld door een warmtepomp te combineren met een bestaande cv-ketel tot een hybride configuratie. Dergelijke oplossingen worden in dit boek ook behandeld.

In de meest ideale situatie vormt de technologie die vandaag wordt ingezet geen belemmering voor technologie die in de toekomst beschikbaar komt en die mogelijk nóg efficiënter is. De technieken die in dit boek worden behandeld, zoals hybride warmtepompen, micro-wkk en gaswarmtepompen, laten zo veel



Figuur 1 Doel en status duurzame energie als percentage van het primair energiegebruik. Bron: EurObserver



Figuur 2 Energielabels voor bestaande woningen; aantallen en percentages. Bron: Agentschap NL

mogelijk opties open om in de toekomst alsnog efficiencyverbeteringen aan te brengen of te kiezen voor efficiëntere opwekkers.

Een tweede aspect dat vertragend werkt op de verduurzaming van de energievoorziening in de gebouwde omgeving is de onzichtbare opstelling van verwarmingsapparaten en -systemen in Nederland. Daardoor is er weinig aandacht voor innovatieve technieken. Verwarmingstechniek is niet 'hot'. De gebruiker in de eenentwintigste eeuw is gewend geraakt aan comfort dat altijd en overal en met grote betrouwbaarheid beschikbaar is. Verwarming in een woning is een vanzelfsprekendheid geworden. Niemand wil terug naar de periode van de kolenkachel (nog maar veertig of vijftig jaar geleden), maar het is een feit dat verwarming toen bewuster gewaardeerd werd dan nu.

Op www.energietransitiemodel.nl is veel informatie over de energietransitie te vinden en kunnen bezoekers zelf transitie scenario's maken.

De realiteit is dat we, juist om het huidige comfortniveau te kunnen handhaven, een verduurzaming van de energievoorziening hard nodig hebben. Alle betrokken partijen in de gebouwde omgeving zullen dan ook een bijdrage moeten leveren: architecten, installatiebedrijven, leveranciers van toestellen en materialen, woningcorporaties, beleidsmakers en gebruikers.

Bouwperiode	Type woning							Totaal
	Vrijstaand	2/1-kap- of hoekwoning	Tussenwoning	Maisonnette	Galerij	Portiek	Fiat	
t/m 1964	Meergezins							
label	G	F	F/G	G	D	E/F	E	
aantal woningen	441.000	285.000	1.001.000	226.000	69.000	523.000	99.000	2.644.000
energiegebruik (GJ)	201	148	98-142	114	42	52-69	52	
t/m 1974	label	F	E	E	D	E	D	E
aantal woningen	119.000	142.000	606.000	22.000	174.000	112.000	125.000	1.300.000
energiegebruik (GJ)	178	133	91	68	59	46	59	
t/m 1991	label	D	C	D	C	C	C	
aantal woningen	221.000	224.000	879.000	94.000	109.000	142.000	125.000	1.794.000
energiegebruik (GJ)	119	88	71	50	36	40	37	
t/m 2005	label	B	B	C	B	B	B	
aantal woningen	178.000	173.000	335.000	40.000	113.000	70.000	136.000	1.045.000
energiegebruik (GJ)	96	76	59	43	33	40	37	
t/m 2010	label	A	A	A	A	A	A	
aantal woningen	48.000	28.000	165.000	15.000	34.000	37.000	32.000	359.000
energiegebruik (GJ)								
Totaal	1.007.000	852.000	2.986.000	397.000	499.000	884.000	517.000	7.142.000

Tabel 1 Energielabels per woningtype en bouwperiode. Bron: Agentschap NL

1.3 Energie in de gebouwde omgeving

In de voorraad van bestaande woningen is de afgelopen 25 jaar al veel gedaan aan energiebesparende maatregelen. Medio jaren tachtig was het aantal geïsoleerde woningen zeer beperkt. Daar kwam in de loop van de jaren negentig verandering in, toen een groot aantal huiseigenaren het nut van energiebesparing begon in te zien.

Desondanks is er met name in de categorie woningen van vóór 1974, ongeacht het woningtype, ook nu nog een fors potentieel voor energiebesparende maatregelen aanwezig. Dit is onder meer te zien in figuur 2 en tabel 1 op de vorige pagina's. Beide figuren geven een overzicht van de bestaande woningen en de bijbehorende energieprestatie, gerelateerd aan de energielabels die aan deze woningen toegekend zouden worden. De aantallen zijn geëxtrapoleerd op basis van een steekproef.

Uit het overzicht van figuur 2 en tabel 1 wordt duidelijk dat in de woningen van vóór 1974 (dit zijn bijna vier miljoen woningen, oftewel 53% van het totaal) in de meeste gevallen een energie-label D, E, F of G hebben. Dit betekent dat hier nog aanzienlijke verbeteringen in de energieprestatie mogelijk zijn, hetzij door isolatie, hetzij door het toepassen van efficiëntere verwarmingsapparatuur.

Investeren in warmtevraagbeperkende maatregelen heeft effect gedurende de resterende levensduur van de woning. Daarom is het reduceren van de warmtevraag altijd de eerste stap op het pad van energiebesparing. Nadat vraagreducerende maatregelen genomen zijn, is het zinvol om te kijken naar de systemen voor verwarming en warm water. Verderop in dit boek komen technieken aan de orde die zeer efficiënt omgaan met energie en toch voldoen aan de huidige comforteisen. Ook worden systemen behandeld die geheel of gedeeltelijk gebruikmaken van hernieuwbare energie (wind- en zonne-energie, groen gas en omgevingswarmte).

De verwarmingsconsument wordt in Nederland bediend door een industrie die zeer efficiënte en betaalbare cv-ketels produceert. Jarenlang zijn de Nederlandse ketelfabrikanten toonaangevend geweest in efficiënte verwarmingstechnologie. De voorhoede is inmiddels overgenomen door met name Duitse fabrikanten. Dit is onder meer te danken aan het energiebeleid in Duitsland, dat eenduidig en consequent inzet op het stimuleren van energiebesparing en duurzame opties. Desondanks hoort de Nederlandse

ketelindustrie kwalitatief nog altijd tot de top van de wereld. Dankzij geavanceerde cv-toestellen en de fijnmazige gasinfrastructuur kon de ontwikkeling van betrouwbare en zuinige HR-ketels in Nederland een hoge vlucht nemen. Nu de HR-keteltechnologie grotendeels is uitontwikkeld komen andere technologieën in beeld, zoals micro-wkk, warmtepompen en thermische zonne-energie. De ijersterke positie van de HR-ketel op de Nederlandse markt werkt hierbij enigszins remmend; gebruikers voelen weinig noodzaak om over te stappen op zuiniger technieken. Die noodzaak is wel voelbaar in de landelijke doelstellingen ten aanzien van energiebesparing, CO₂-reductie en verduurzaming. Hogere energietarieven zullen op termijn leiden tot een toenemende belangstelling voor innovatieve verwarmingstechnologie.

1.4 Technologische ontwikkelingen

De huidige stand van de techniek biedt in feite al uitstekende mogelijkheden voor energiebesparing en emissiereductie in de gebouwde omgeving. Micro-wkk en warmtepompen worden bijvoorbeeld al met succes in woningen toegepast. De huidige opwekkers voor ruimteverwarming laten zich bovendien prima combineren met de beschikbare afgiftesystemen en regelingen. Wand- en vloerverwarming worden na hun aanvankelijke introductie in de nieuwbouw nu ook steeds meer toegepast in bestaande woningen. Micro-elektronica en sensortechnologie maken geavanceerde regelingen voor verwarming, koeling en ventilatie mogelijk, met onder meer aanwezigheidsdetectie.

Werd tot voor kort uitsluitend aardgas ingezet als energiebron voor ruimteverwarming, tegenwoordig is ook elektriciteit (voor de voeding van elektrische warmtepompen) een serieuze optie. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de huidige elektriciteitsproductie voor ongeveer 50% gasgestookt is. Het landelijk gemiddelde opwekkingsrendement van de centrale elektriciteitsproductie is relatief laag en de gemiddelde CO₂-emissie per kWh centraal opgewekte elektriciteit is relatief hoog ten opzichte van het buitenland. Dit is een gevolg van het grote aandeel van kolencentrales in de centrale elektriciteitsproductie in Nederland. Moderne warmteopwekkers zullen in de nabije toekomst steeds meer gevoed worden uit hernieuwbare bronnen, zoals groene stroom en in toenemende mate ook groen gas. Groen gas, onder meer uit vergisting van mest en biomassa en vergassing of pyrolyse van afvalhout, is veelbelovend in Nederland. In 2014 wil

de Stichting Groen Gas zo'n 300 miljoen m³ groen gas beschikbaar hebben. Deze productie moet vervolgens opgeschaald worden naar 3 miljard m³ in 2030. Het zal overigens nog decennia duren voordat groene stroom en groen gas in voldoende mate beschikbaar zijn, zodanig dat de back-up van fossiele bronnen niet meer nodig is. Ondanks de ontwikkeling van zogeheten smart grids en de balancerende werking van import en export zal hernieuwbare energie de komende decennia dus nog steeds worden gecombineerd met conventionele, fossiel gestookte elektriciteitsopwekking.

1.5 Leeswijzer

Waar tot voor kort één technologie (de HR-ketel) met succes werd toegepast in verreweg de meeste woningen, zal in de toekomst veel meer diversiteit ontstaan op de verwarmingsmarkt. Steeds vaker zullen combinaties van technieken toegepast worden. Comfort- en klimaattechnieken worden niet alleen efficiënter en duurzamer, maar worden dus ook steeds meer maatwerk.

Dit boek heeft als doel een overzicht te bieden van de technieken die momenteel (2011) en in de nabije toekomst voorhanden zijn voor de verwarming van woningen en voor het verwarmen van tapwater. Het overzicht begint in historisch perspectief (hoofdstuk 2) en vervolgt met een inventarisatie van de woningvoorraad en de belangrijkste trends in de gebouwde omgeving (hoofdstuk 3). Tegen de achtergrond van een geleidelijk proces van energietransitie (hoofdstuk 4) komt vervolgens de techniek aan bod. Hoofdstuk 5 inventariseert de onderdelen van het verwarmingsstelsel. De ontwikkeling van de verwarmingsketel tot de huidige *state of the art* HR-ketel komt in hoofdstuk 6 aan bod. Hoofdstuk 7 behandelt de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit met de micro-wkk. Hoofdstuk 8 gaat over warmtepompen en hoofdstuk 9 over thermische zonne-energie. Collectieve systemen komen aan de orde in hoofdstuk 10 en warmtenetten in hoofdstuk 11. Hoofdstuk 12 bevat een aantal voorbeeldprojecten van de technieken die in de hoofdstukken 6 tot en met 11 zijn behandeld. De hoofdstukken kunnen ook op zichzelfstaand worden gelezen. Achter in het boek zijn de belangrijkste beginselen van de thermodynamica behandeld. Verder vindt de lezer een register, een literatuurlijst en een appendix met conversietabellen. ■

Hoofdstuk 2

Verwarmen in de twintigste eeuw

De comforteisen waaraan woningen tegenwoordig moeten voldoen, zijn in normen vastgesteld. We ontwerpen woningen en installaties bijvoorbeeld op een binnentemperatuur van 20 °C en gaan ervan uit dat die temperatuur met een maximale 'rimpel' van 0,5 °C wordt geregeld. Op meerdere plaatsen in huis is warm tapwater beschikbaar. Onder de douche willen we onder een royale straal staan en het vullen van een warm bad mag niet te lang duren. Om deze en andere vanzelfsprekendheden in hun context te kunnen zien, gaat dit hoofdstuk in op de ontwikkeling van het verwarmingscomfort in de vorige eeuw.

2.1 Hout, kolen en lichtgas

Centrale verwarming in woningen is tegenwoordig een vanzelfsprekendheid. In de vorige eeuw was dat niet het geval. Er was meestal sprake van lokale verwarming op basis van kachels en de mensen gingen warmer gekleed dan tegenwoordig. In de woning was een streef temperatuur van rond de 17 °C normaal. En dat gold dan alleen voor de woonkamer; de andere ruimten waren in principe onverwarmd. Soms stond in de keuken een kolenfornuis dat, als het gestookt werd, ook de keuken verwarmde. Temperatuurregeling via de kachel zelf (het 'temperen') was in beperkte mate mogelijk. De 'fijnregeling' bestond hierin dat men meer of minder ver van de kachel af ging zitten.



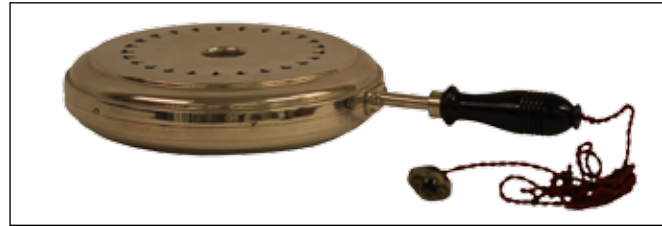
Figuur 1 Bruinkoolbriketten. Bron: G. Van Beek, *Kolen en Olie*



Figuur 2 Oppoken van de kachel 's ochtends. Rechts de kolenkit.
Foto: Nationaal Archief/Spaarnestad Photo/Henk Hilterman



Figuur 3 Kachel met mogelijkheid om te koken. Links een wafelijzer. Foto: HR Advies, Openluchtmuseum Arnhem



Figuur 4 Beddenpan. Foto: Collectie NEMO Erfgoed



Figuur 5 Vaak waren kachels geschikt om pannen warm te houden of om water te koken, wat soms tot in het extreme werd doorgevoerd. Foto: Nationaal Archief/Spaarnestad Photo/ANEFO

In het begin van de twintigste eeuw werden kachels overwegend gestookt met hout, bruinkoolbriketten en steenkool. Onder steenkool vallen cokes (dat ontstond bij de productie van stadsgas of lichtgas) en het duurere antraciet, dat meer stabiel brandde en minder stof verspreidde.

De stook met hout, briketten en kolen was bewerkelijk voor de bewoners. De kolenboer kwam een paar keer per jaar langs met kolen die hij in juten zakken naar het kolenhok moest dragen, vaak door het huis heen. Het kolenstof kwam vrijelijk door het jute heen. Dagelijks moest de kolenkit gevuld worden met kolen uit het kolenhok. Het was bovendien een hele kunst, voor wie geen antraciet stookte, om de kachel 's nachts op een laag pitje aan te houden. Veel kachels moesten elke ochtend opnieuw worden aangemaakt.

Een beddenpan werd gebruikt om in steenkoude winters het bed een beetje op te warmen. De pan werd gevuld met gloeiende kooltjes of houtskool. Een elektrische versie bestond ook (figuur 4).

Stadsgas, uit steenkool geproduceerd door middel van vergassing, werd primair ingezet voor verlichting. Vandaar dat het ook lichtgas werd genoemd. In Nederland deed het stadsgas zijn intrede rond 1840. Aanvankelijk waren alleen gemeenten (straatverlichting) en bedrijven klant. Later in de negentiende eeuw vond gas ook toepassing in woningen van welgestelden. Men probeerde het ook toe te passen voor koken en ruimteverwarming, maar daarvoor was het aanvankelijk te duur [Overbeeke 2001].

Tabel 1 laat zien hoe het aantal aansluitingen op stadsgas toenam van 1900 tot 1960.

Jaar	Aantal huishoudens totaal	Aantal huishoudens met gasaansluiting	Procentueel
1900	1.000.000	150.000	15%
1920	1.600.000	700.000	45%
1950	2.800.000	1.900.000	69%
1960	3.200.000	2.300.000	73%

Tabel 1 Toename aantal gasaansluitingen in Nederlandse huishoudens. Bron: Overbeeke 2001



Figuur 6 Muntgasmeter. Foto: Collectie NEMO Erfgoed



Figuur 7 Gasmuntjes. Foto: Collectie NEMO Erfgoed



Figuur 8 Petroleumkachel (AGA). Foto: Collectie NEMO Erfgoed



Figuur 9 Petroleumkachel (Aladin). Foto: Oretro Hengelo (O)



Figuur 10 Negen drijvende bokken moesten eraan te pas komen, om in augustus 1964 de aardgasleiding in de omgeving van de Velsertunnel aan te leggen. Foto: Nationaal Archief/Spaarnestad Photo/ANP/A. vanden Heuvel

Het gasverbruik werd gemeten en betaald via een muntgasmeter, een prepaid systeem waarmee men per muntje één kubieke meter gas kon afnemen. Aan dit laatste is te zien dat het verbruik niet heel hoog geweest zal zijn.

Toen de geisers op de markt kwamen die functioneerden met een waakvlam (en die dus een continue gaslevering nodig hadden), werden de muntmeters afgeschaft.

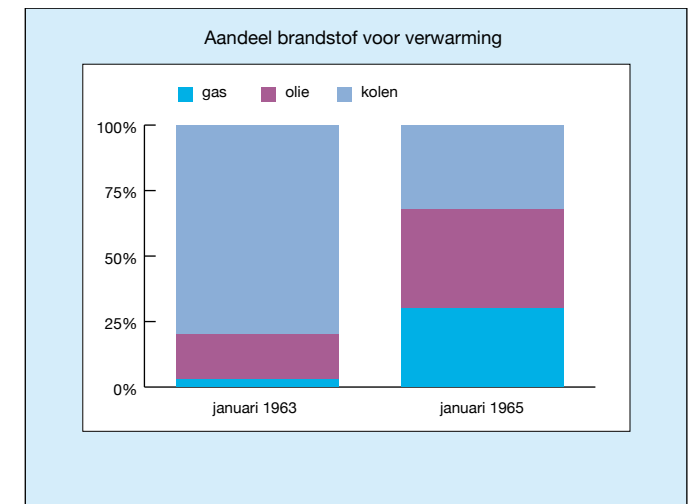
Om vertrekken (zoals studeerkamers) tijdelijk te verwarmen, werden wel flessengas- of petroleumkachels gebruikt. Deze hadden geen rookgasafvoer en onttrokken hun verbrandingslucht aan de ruimte waarin zij stonden. Dat laatste kon alleen dankzij het feit dat tochtwering nog niet systematisch werd aangepakt. Tegenwoordig, onder invloed van de beschikbaarheid van aardgas in bijna alle woningen en de toegenomen welvaart, zien we dit soort toestellen alleen nog her en der in tuinhuisjes of vakantiewoningen.

2.2 Olie en aardgas

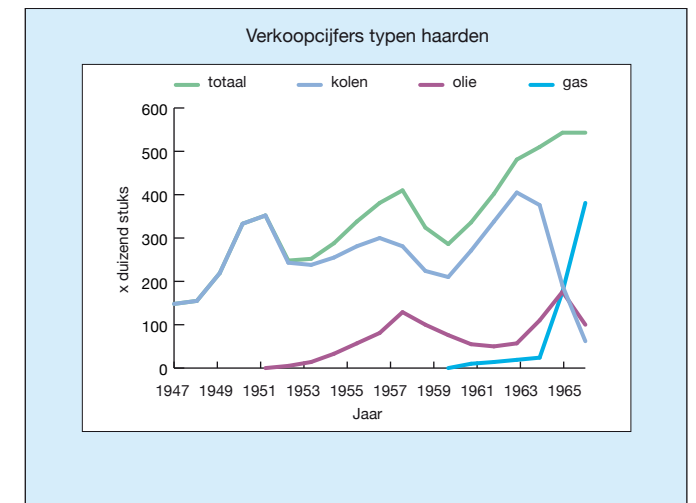
Vanaf 1950 deden oliekachels hun intrede. In woningen werden zij gestookt met lichte olie (petroleum). De bediening was veel eenvoudiger dan van een hout- of kolenkachel. Dit leidde ertoe dat er kachels geplaatst werden in meer vertrekken dan alleen de woonkamer. Echt massaal zijn oliekachels niet toegepast, omdat in 1959 het aardgasveld bij Slochteren werd ontdekt. Aanvankelijk zag de overheid als grootste probleem dat de 'gasbel' opgestookt moest worden voordat hij door de komst van goedkope kernenergie weinig of geen waarde meer zou hebben.

In Nederland werd vanaf 1963 razendsnel een aardgasnet aangelegd. In de eerste twee jaar werd 1200 kilometer hoofdleiding voltooid en werd een regionaal net aangelegd om de stadsgas-systemen op aardgas aan te sluiten. Parallel hieraan werden in een campagne van een paar jaar in het grootste deel van Nederland de huishoudelijke toestellen gratis omgebouwd van stadsgas naar aardgas.

In vergelijking met recente infrastructurele projecten (Noord-Zuidlijn in Amsterdam, Betuwelijn, Hogesnelheidslijn) is de ontwikkeling van de Nederlandse aardgasinfrastructuur verbijsterend snel geweest. Alleen de vergunningaanvraag voor een windpark of elektriciteitscentrale duurt tegenwoordig al langer dan twee jaar!

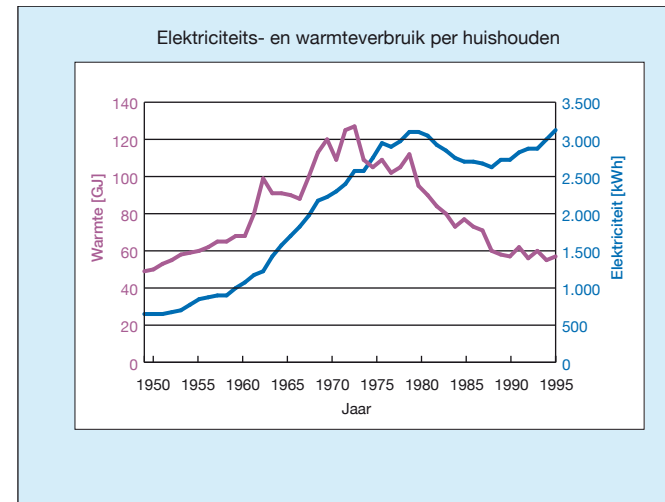


Figuur 11 Verschuiving in gebruik brandstoffen voor verwarming. Bron: Overbeek 2001



Figuur 12 Verkoopcijfers van kolen-, olie- en gashaarden. Bron: Overbeek 2001

Figuur 11 geeft weer hoe in de beginperiode van het aardgas het gebruik van brandstoffen zeer snel en ingrijpend veranderde. In figuur 12 is over een veel langere periode de ontwikkeling te zien, uitgedrukt in aantallen verkochte verwarmingstoestellen. De trend-



Figuur 13 Energiegebruik in woningen (jaarverbruik elektriciteit en verbruik van kolen, olie en aardgas voor verwarmen, koken en warm water per woning). Bron: Overbeeke 2001



Figuur 14 In bad voor de kachel anno 1951. 30 liter per teiltje, waarin soms meerdere kinderen achter elkaar plaatsnamen. Foto: Nationaal Archief/Spaarnestad Photo/Henk Hilterman

breuk rond 1963 is onmiskenbaar. In 1965 kondigde de Nederlandse regering aan dat de steenkoolmijnen in Limburg gesloten zouden worden.

2.3 Ontwikkeling in comfort en energiegebruik

Met de introductie van aardgas voor ruimteverwarming werd de weg geopend voor lokale verwarming in meerdere vertrekken van de woning. Vooral gevelkachels werden populair, omdat zij geen schoorsteen-aansluiting nodig hadden. Het waren gesloten kachels, die de verbrandingslucht van buiten aanvoerden en de rookgassen naar buiten afvoerden, via een concentrische aansluiting door de gevel.

Doordat een steeds groter deel van de woning verwarmd werd, steeg het comfortniveau behoorlijk. Figuur 13 laat het verloop van het energiegebruik in woningen te zien. De paarse lijn geeft het totale verbruik aan kolen, olie en gas, omgerekend in GJ voor verwarmen, koken en warmwater. Dit piekte in 1973 op een gemiddelde van 125 GJ per woning per jaar; dit komt overeen met ongeveer 4000 m³ aardgas per jaar.



Figuur 15 Massagedouche anno 2011. Circa 300 liter per douchebeurt. Foto: Shutterstock

De sterke groei in de periode 1963 - 1973 heeft vier hoofdoorzaken, die deels al zijn genoemd:

1. Een hogere ruimtetemperatuur in huis; mensen gaan binnenshuis lichter gekleed.
2. Steeds meer vertrekken in de woning worden verwarmd.
3. Een toename in het gebruik van warm tapwater.
4. Hogere comforteisen. Ijsbloemen op de ramen worden niet meer geaccepteerd.

Ter illustratie bij het eerste punt: als de gewenste ruimtetemperatuur bij een gemiddelde buitentemperatuur van 5 °C stijgt van 17 °C naar 20 °C, dan is de relatieve toename van de warmtevraag (onder de aanname dat die evenredig is met het temperatuurverschil tussen binnen en buiten):

$$\frac{(20-5) - (17-5)}{(17-5)} = 0,25 \text{ oftewel } 25\%$$

Terwijl in de eerste helft van de 20e eeuw nog maar weinig woningen van een douche of bad waren voorzien, werden badkamers met douche of bad geleidelijk aan steeds meer de standaard. Omstreeks 2000 komen steeds meer douchevoorzieningen in zwang die extreem veel warm water gebruiken, zoals de massagedouche in figuur 15.

2.4 Energiebesparing

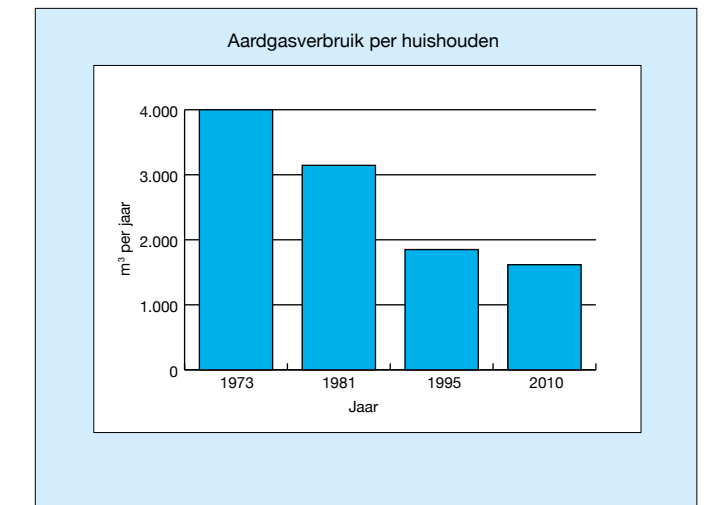
In 1973 wordt Nederland geconfronteerd met de eerste energiecrisis. De Nederlandse regering reageert met stevige maatregelen, zoals het tijdelijk verbieden van autoverkeer op zondag (de 'auto-loze zondagen') en de invoering van een bonnensysteem voor benzine.

In de periode na 1973 daalt het gasverbruik in woningen spectaculair. Deze ontwikkeling is in feite nog steeds gaande. Figuur 16 is een samenvatting van gegevens uit verschillende bronnen.

Het gasverbruik in woningen daalt onder invloed van stijgende energieprijzen vooral doordat woningen thermisch aanzienlijk worden verbeterd. Dit gebeurt onder meer via het nationaal isolatieprogramma (NIP) en de 'nationale kierenjacht', een actie waarbij woningen kierdicht worden gemaakt. Daarnaast speelt

ook de ontwikkeling en inzet van efficiëntere gasapparatuur (eerst de VR-ketel en later de HR-ketel, zie hoofdstuk 6) een belangrijke rol. Meer recent zorgt de ontwikkeling van geavanceerde gebouw- en installatieconcepten voor een verdere daling van de energievraag. Denk daarbij aan gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning, warmtepompen, warmtekrachtkoppeling, enzovoort.

Deze ontwikkeling wordt sterk gestimuleerd door de eisen die via de energieprestatienorm aan woningen worden gesteld. Sinds 1995 is er in het Bouwbesluit een zogenaamde EPC-berekening opgenomen. Deze houdt in dat via een genormeerde methode (de energieprestatienorm, aanvankelijk de NEN 5128, sinds 2011 de NEN 7120) de energetische prestatie van een woning wordt berekend. Deze wordt uitgedrukt in een energieprestatiecoëfficiënt EPC (voor de nieuwbouw) of een energielabel (voor de bestaande bouw). De energieprestatie van de woning heeft te maken met zowel de bouwfysische kwaliteit als de toegepaste installatie. Vanaf 1 januari 2011 geldt voor de nieuwbouw de waarde 0,6 als bovengrens voor de EPC.

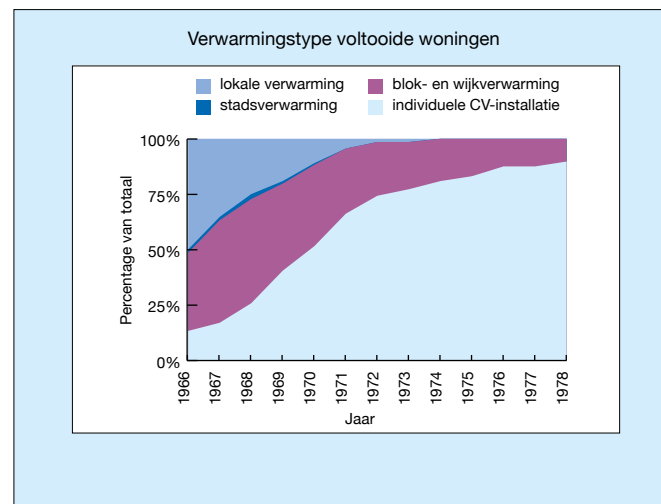


Figuur 16 Daling huishoudelijk gasverbruik voor verwarming en warm tapwater na eerste energiecrisis. Bron: Overbeeke 2001 en De Energiezaak 2011

In figuur 17 is te zien dat juist ten tijde van de energiecrisis de lokale verwarming ongeveer verdwenen was. De daling van het aantal woningen met blok- of wijkverwarming, een trend die al enige tijd gaande is, zet door ten gunste van individuele cv-installaties. Waarschijnlijk heeft dit te maken met een gebrek aan vertrouwen in de manier waarop de kosten voor verwarming worden verdeeld over de individuele gebruikers. Met name bij stijgende energiekosten worden individuele systemen, waar men direct de baten ervaart van zuinig en verstandig gedrag, populair.

Het is interessant om vast te stellen dat de drijfveer om energie te besparen (en om besparingsonderzoek te doen) in de loop der tijd verandert [Claus 1979]. Rond 1937 was kostenbesparing het eerste en enige motief. Rond 1952 kwam daarbij de wens om de afhankelijkheid van het buitenland terug te dringen. Rond 1977 werd dat laatste extra urgent, omdat de olieproducerende landen zich bewust werden van hun macht. Naast kostenbesparing, nog altijd van belang, werden ook de eindigheid van energievoorraden, de stijgende energievraag in ontwikkelingslanden, de kans op internationale conflicten en de toenemende aantasting van het milieu gevoeld als drijfveer om het energiegebruik terug te dringen.

Opmerkelijk is dat de drijfveren om tot energiebesparing te komen tussen 1959 (de ontdekking van het aardgas) en 1973 (de eerste energiecrisis) vrijwel afwezig waren. Zoals al eerder vermeld zat Nederland, zeker toen de reserves verrassend hoog bleken, min of meer in zijn maag met het aardgas. Die situatie veranderde drastisch als gevolg van de energiecrisis. Energiebesparing werd een belangrijk thema in de gebouwde omgeving. ■



Figuur 17 Voltooide woningen met verschillende soorten verwarming.
Bron: Overbeeke 2001

Hoofdstuk 3

Energie in de woningbouw

Dit boek over ruimteverwarming richt zich met name op de bestaande woningbouw. Voordat we in de hoofdstukken 5 tot en met 10 de techniek gedetailleerd beschrijven, willen we in dit hoofdstuk ingaan op de bestaande woningvoorraad in Nederland. Als uitgangspunt zijn hier de publicaties van Agentschap NL (voorheen SenterNovem) gebruikt, met name de publicatie 'Voorbeeldwoningen 2011'. Woningvoorraad, demografie en energetische aspecten van de woningvoorraad (zoals isolatiegraad) komen in dit hoofdstuk aan bod.

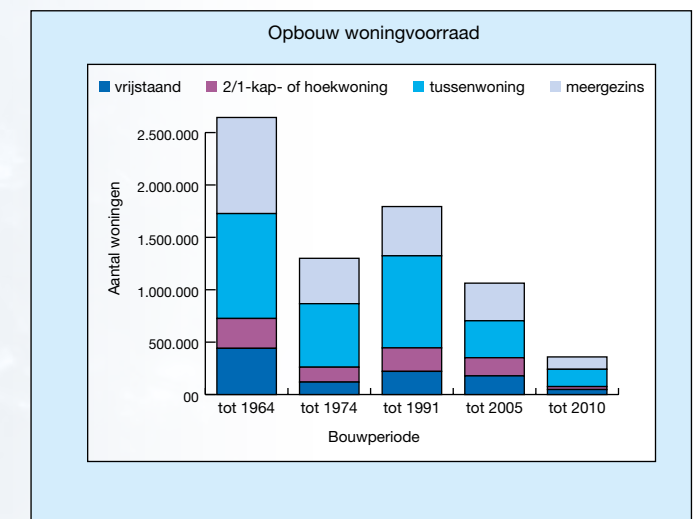
3.1 Woningvoorraad, ontwikkeling en prognose

De woningvoorraad in Nederland bestond in 1950 uit 2,2 miljoen woningen, waarin een bevolking was gehuisvest van destijds ongeveer 10 miljoen inwoners. Na een daling in de periode na de Tweede Wereldoorlog is het woningareaal vooral in de jaren zeventig, tachtig en negentig van de vorige eeuw hard toegenomen. In 2010 telde Nederland zo'n 7,2 miljoen woningen voor 16,5 miljoen inwoners. In zestig jaar tijd is het gemiddelde aantal bewoners per woning gedaald van 4,5 (1950) naar 2,3 (2010).

3.1.1 De huidige woningvoorraad

De huidige woningvoorraad is op te delen in vier hoofdtypes:

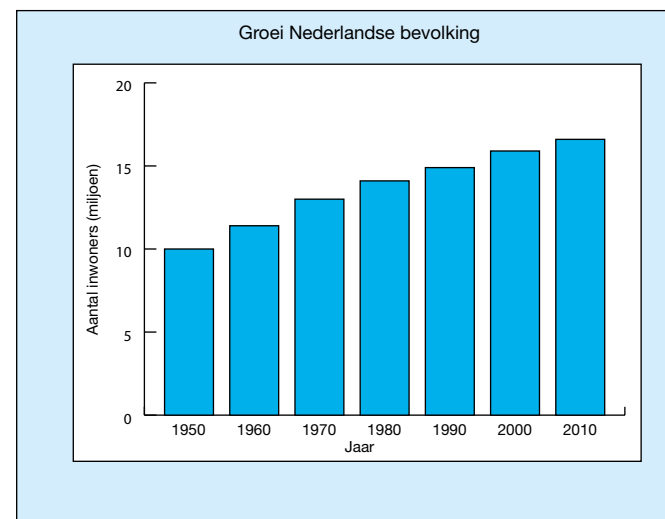
- vrijstaande woningen
- twee-onder-een-kapwoningen en hoekwoningen
- tussenwoningen
- meergezinswoningen



Figuur 1 Ontwikkeling woningvoorraad in Nederland tussen 1964 en 2010. Bron: Agentschap NL

De meeste hoekwoningen zijn praktisch gezien vergelijkbaar met (de helft van een) twee-onder-een-kapwoning; ze worden in alle figuren en tabellen in dit boek dan ook als zodanig behandeld. De meergezinswoningen verdienen een verdere specificatie. Deze categorie bestaat uit vier subcategorieën: maisonnettes, galerij-, portiek- en flatwoningen. De subcategorieën hebben duidelijk verschillende bouwkundige, energetische en gebruikseigenschappen. In de diverse tabellen en figuren in dit hoofdstuk is dit onderscheid per subcategorie zichtbaar gemaakt. De categorieën vrijstaande woningen en twee-onder-een-kapwoningen (c.q. hoekwoningen) zijn tussen 1964 en 2010 relatief het hardst gegroeid, respectievelijk met een factor vier en een factor zeven. De welvaartsontwikkeling van de afgelopen vijftig jaar heeft zich in Nederland duidelijk vertaald in de wijze waarop mensen leven en wonen.

De toename van het aantal woningen is toe te schrijven aan een groeiende bevolking en aan de trend van een meer individuele inrichting van de Nederlandse samenleving. Ook neemt het aantal alleenstaanden in Nederland steeds verder toe. Deze demografische ontwikkelingen hebben duidelijk consequenties gehad voor de ruimtelijke ordening in Nederland en ook voor het energiegebruik in de woningbouw. Naar verwachting zal het aantal individuele woningen de komende jaren in Nederland nog verder groeien,



Figuur 2 Ontwikkeling van de bevolking in Nederland tussen 1964 en 2010. Bron: Agenschap NL

naar uiteindelijk 7,8 tot 8 miljoen. Hieronder volgt een toelichting op de diverse woningtypes met hun kenmerken, kengetallen en energetische kwaliteit.

Vrijstaande woningen

Vrijstaande woningen vormen ongeveer 15% van het woningbestand in Nederland. Van deze woningen is ongeveer 40% van vóór 1964. Deze oudere woningen hebben van oorsprong houten vloeren, geen isolatie en vaak ook geen spouwmuren. De woningen van vóór 1964 zouden in de meeste gevallen in aanmerking komen voor een energielabel F of G. Vrijstaande huizen



Figuur 3 Vrijstaande woning van vóór 1964.



Figuur 4 Vrijstaande woning na 2000.

van recentere bouwjaren zijn doorgaans steeds beter geïsoleerd en geconstrueerd.

Vrijstaande woningen van na 2000 zijn gemiddeld 15% groter (gemeten in vloeroppervlak) dan de woningen van vóór 1964. Vrijstaande woningen zijn bijna altijd particulier eigendom.

Twee-onder-een-kapwoningen en hoekwoningen

Dit woningtype vormt met 1,7 miljoen stuks ongeveer 23% van het totale woningbestand in Nederland. Zo'n 285.000 woningen zijn van vóór 1964 en deze zijn vaak matig geïsoleerd. Sommige



Figuur 5 Twee-onder-een-kapwoning van vóór 1964.



Figuur 6 Twee-onder-een-kapwoning van na 2000.

huizen zijn nog voorzien van lokale verwarming. Energetisch gezien valt in deze woningen vaak nog veel te verbeteren. De meeste zouden in aanmerking komen voor een energielabel F.

Het vloeroppervlak van een woning uit 2010 is gemiddeld 20% groter dan dat van een woning uit 1964. In deze categorie wordt 10 tot 12% van het areaal verhuurd. Verhuurde woningen zijn vaker hoekwoningen (van een blok rijtjeshuizen) dan twee-onder-een-kapwoningen. Woningen vanaf het midden van de jaren negentig zijn in deze categorie nagenoeg allemaal in particulier eigendom.



Figuur 7 Tussenwoning van vóór 1964.



Figuur 8 Tussenwoning van na 2000.

Tussenwoningen

Een aanzienlijk deel van het woningbestand, namelijk zo'n 30%, bestaat uit rijtjeshuizen of tussenwoningen. Ongeveer 40% van deze woningen is van vóór 1964. Deze woningen zijn energetisch gezien een belangrijk aandachtsgebied. De meeste oudere woningen hebben een energieprestatie op labelniveau F of G. Daar komt bij dat ongeveer een derde van deze woningen in de sociale huursector valt.

Van alle tussenwoningen in Nederland valt ruim 40% in de sociale huursector. Zo'n 7% van alle tussenwoningen wordt particulier verhuurd. Tussenwoningen vanaf het midden van de jaren negentig zijn gemiddeld ongeveer 25% groter (gemeten in vloeroppervlak) dan de woningen uit de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw.

Meergezinswoningen

Bijna 30% van alle woningen in Nederland valt in de categorieën maisonnette, galerij-, portiek- of flatwoning. Samen vormen zij een groep van circa 2,1 miljoen woningen. Hiervan zijn ongeveer 700.000 stuks van vóór 1964. Deze woningen hebben doorgaans een energetisch profiel dat overeenkomt met energielabel E of F. Vanaf de jaren tachtig en negentig zijn hier substantiële isolatiemaatregelen getroffen.

Gemiddeld over de vier subcategorieën zijn alle wooneenheden in meergezinswoningen tussen 1964 en 2005 groter geworden;



Figuur 9 Meergezinswoningen van vóór 1964.

het vloeroppervlak nam in deze periode gemiddeld met 15% toe. Meer dan 60% van de meergezinswoningen valt in de sociale huursector en is eigendom van een woningbouwcorporatie. Ongeveer 18% wordt particulier verhuurd.

In meergezinswoningen wonen verhoudingsgewijs veel ouderen en alleenstaanden. Op basis van statistieken geldt dat hoe ouder een woning is, des te meer alleenstaanden en gezinnen zonder kinderen erin wonen. Mogelijk zijn dit de bewoners van huizen waar de kinderen inmiddels het huis uit zijn, of senioren van wie de partner is overleden.

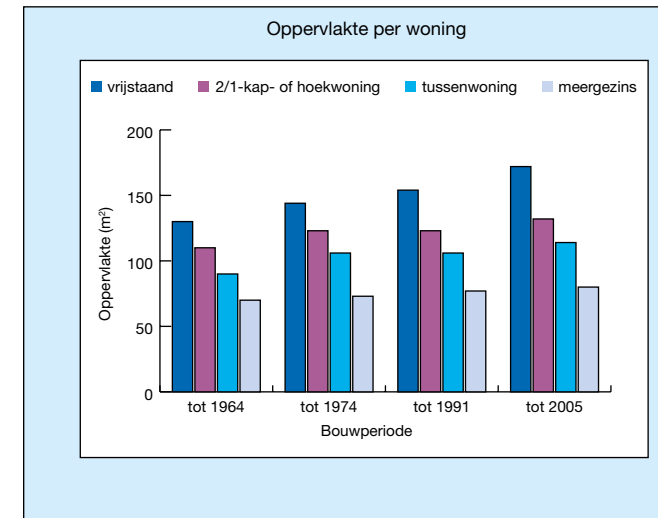
Woonoppervlak

In de jaren na de Tweede Wereldoorlog steeg het aantal woningen in Nederland van 2,2 miljoen in 1950 tot ongeveer 7,2 miljoen in 2010. In diezelfde periode werden woningen gemiddeld ook aanzienlijk groter. De welvaartsgroei in Nederland komt onder meer tot uitdrukking in de groei van het gemiddelde oppervlak per woning.

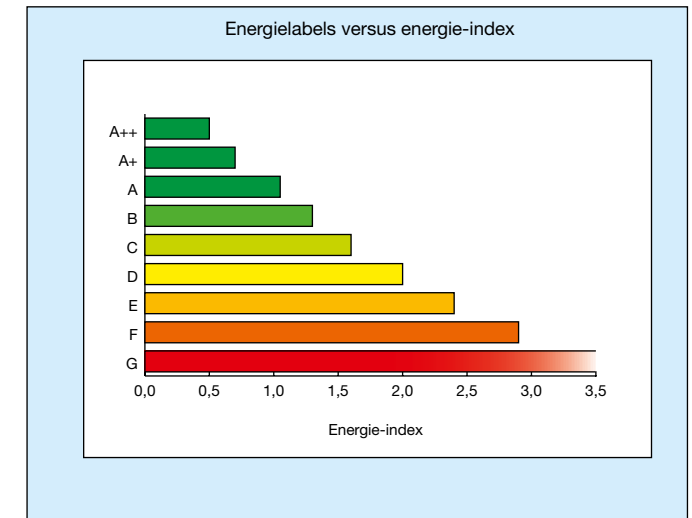
Het aantal woningen nam in vijf decennia toe met meer dan een factor drie, terwijl het vloeroppervlak over alle types woningen gemiddeld ook nog met 15% toenam. Daar komt bij dat de categorieën vrijstaand, twee-onder-een-kap- en hoekwoningen relatief het hardst zijn gegroeid en de categorie meergezinswoningen het minst.



Figuur 10 Meergezinswoningen van na 2000.



Figuur 11 Ontwikkeling van het vloeroppervlak per woningtype tussen 1964 en 2010. Bron: Agentschap NL



Figuur 12 Energie-index en energielabels. Bron: Energy Matters/ISSO

Energielabel

De energetische kenmerken van een woning kunnen door middel van een genormeerde berekening worden omgezet in een zogenaamde 'energie-index'. Deze energie-index correspondeert met een stap in de reeks van energielabels, zoals getoond in figuur 12 (zie ook paragraaf 3.3).

Medio 2010 waren er voor de woningbouw ongeveer 2 miljoen energielabels afgegeven. Het gemiddelde van al deze labels ligt op niveau D. Dit betekent dat gemiddeld genomen de Nederlandse woningen nog een aanzienlijk besparingspotentieel hebben. Agentschap NL heeft medio 2010 een inventarisatie gemaakt van de gemiddelde energie-index per woningtype en per bouwperiode (tabel 1).

Bouwperiode	Type woning						
	Vrijstaand	2/1-kap- of hoekwoning	Tussenwoning	Meergezins			
				Maisonnette	Galerij	Portiek	Flat
t/m 1964	G	F	F/G	G	D	E/F	E
t/m 1974	F	E	E	D	E	D	E
t/m 1991	D	C	D	C	C	C	C
t/m 2005	B	B	C	B	B	B	B
t/m 2010	A	A	A	A	A	A	A

Tabel 1 Gemiddeld energielabel per woningtype en per bouwperiode, status 2010. Bron: Agentschap NL

Ongeacht het type woning ligt er in de woningen van vóór 1964 een aanzienlijk potentieel voor energiebesparing, hoewel dit potentieel bij de oudere objecten niet altijd even eenvoudig realiseerbaar is. Labelstappen zijn mogelijk door middel van isolatie of door moderne installatietechniek (bijvoorbeeld als verder isoleren niet economisch verantwoord is).

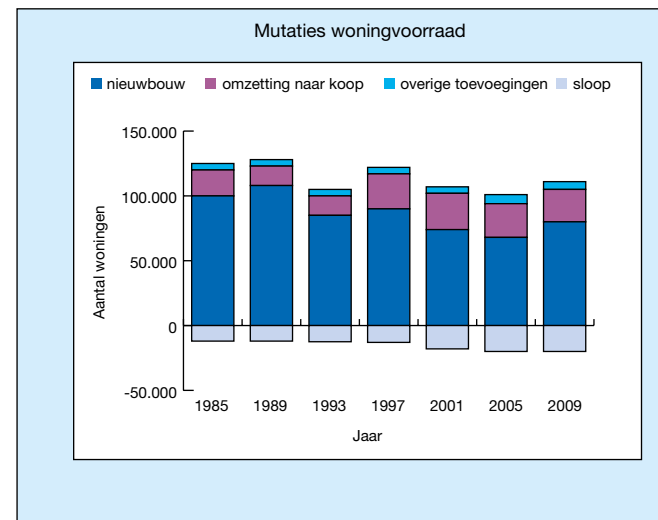
Naarmate woningen van meer recente datum zijn, wordt de invloed zichtbaar van de wet- en regelgeving op het gebied van energiebesparing en energie-efficiëntie. Deze wetten en regels zijn in de jaren tachtig en negentig stap voor stap ingevoerd. Daarnaast neemt het besef toe dat energiebesparing noodzakelijk is. Al met al worden bestaande woningen langzamerhand beter geïsoleerd en van efficiëntere verwarming voorzien, wat een duidelijke invloed heeft op de gemiddelde energie-index [WoON 2009].

3.1.2 Ontwikkeling woningvoorraad

Door de economische ontwikkelingen in 2009, 2010 en 2011 heeft de woningbouw een heel andere dynamiek gekregen. Lag het aantal nieuw gebouwde woningen in 2009 nog rond de 80.000, in de jaren 2010 en 2011 daalde dit aantal drastisch naar 50.000 tot 60.000 woningen per jaar. De verwachting is dat ook in de periode tussen 2012 en 2017 maximaal 50.000 tot 60.000 woningen per jaar worden opgeleverd. Na aftrek van de gemiddelde sloop van 10.000 tot 15.000 woningen per jaar blijft er een netto toename over van ongeveer 35.000 tot 50.000 woningen op jaarbasis. Naar verwachting zullen er daardoor in Nederland in 2020 ongeveer 7,5 miljoen woningen zijn en in 2030 7,8 tot 8 miljoen woningen. Gezien de beschikbare ruimte en de hoge grondkosten zal een aanzienlijk deel van de nieuwe woningen waarschijnlijk worden gerealiseerd in de categorie meergezinswoningen.

3.1.3 Ontwikkelingen samenstelling huishoudens

Op 1 januari 2009 woonden er bijna 16,5 miljoen mensen in Nederland. Zij vormden meer dan 7,2 miljoen huishoudens (Bron: CBS). De overgrote meerderheid van de huishoudens (96%) bewoont een zelfstandige woning. Een klein deel van de huishoudens woont als zelfstandig huishouden bij een ander huishouden in (0,6%, ongeveer 45.000 huishoudens). Ook is er nog een kleine groep die wel hoofdbewoner is, maar niet beschikt over een zelfstandige woning. Hieronder vallen bijvoor-



Figuur 13 Mutaties van de woningvoorraad naar aard, periode 1985 tot 2008. Bron: WoON 2009

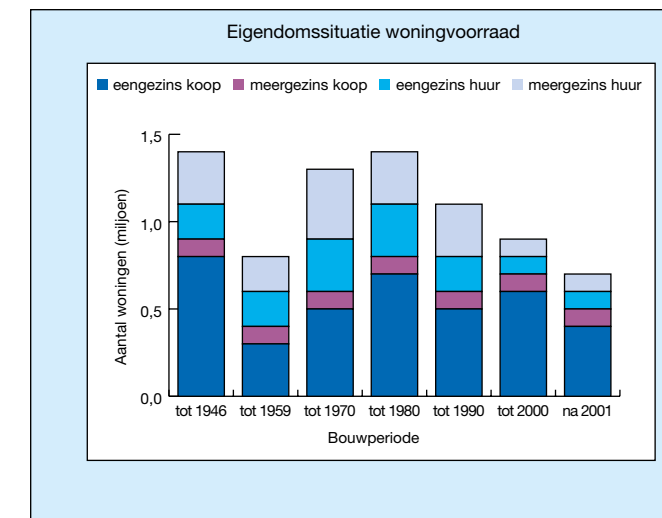
beeld studentenhuizen en andere huishoudens die voorzieningen als badkamer en keuken met elkaar delen.

Een huishouden in Nederland heeft anno 2010 een gemiddelde grootte van 2,3 personen. Zoals eerder aangegeven, daalt het gemiddelde aantal bewoners per huishouden nog steeds licht. Een van de oorzaken is de groei van het aantal alleenstaanden. Niet alleen jongeren en senioren gaan als alleenstaande door het leven. In vergelijking met pakweg 25 jaar geleden is er een duidelijke verschuiving opgetreden. Meer dan de helft van alle alleenstaanden is nu tussen de 35 en 70 jaar oud. Deze ontwikkeling heeft belangrijke gevolgen voor de woningmarkt.

Een andere oorzaak van het afnemen van de gemiddelde gezinsgrootte is de daling van het aantal kinderen per gezin. Momenteel heeft ongeveer de helft van de stellen tussen 25 en 34 jaar kinderen. Een kwart eeuw geleden lag dit aandeel nog aanmerkelijk hoger. Bovendien is de gemiddelde leeftijd waarop vrouwen hun eerste kind krijgen aanzienlijk gestegen. Een logisch gevolg is dat ouders op steeds latere leeftijd hun kinderen het huis zien verlaten. Dit wordt bevestigd door de forse toename van het aantal 45- tot 55-jarigen dat nog één of meer thuiswonende kinderen heeft.

Eigendomssituatie

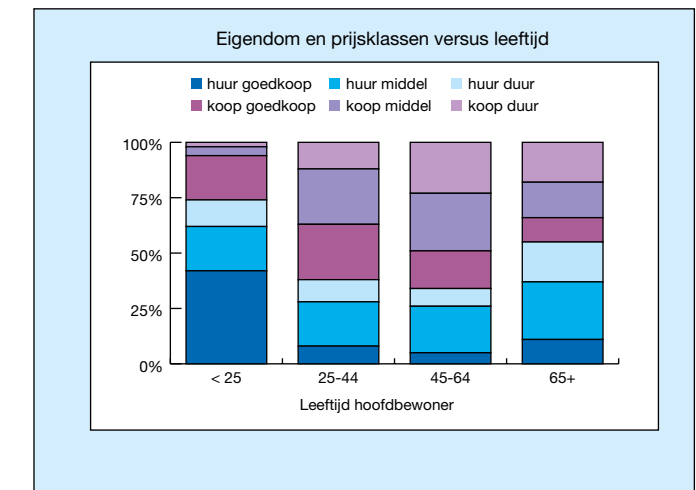
Er is een sterk verband tussen woningtype aan de ene kant en prijs en eigendomsvorm aan de andere. Bijna driekwart van de eengezinswoningen wordt bewoond door een eigenaar-bewoner, terwijl driekwart van de meergezinswoningen gehuurd wordt. Het is dus begrijpelijk dat huishoudens waarvan bekend is dat ze veelal in eengezinswoningen wonen (paren en gezinnen), oververtegenwoordigd zijn in de koopsector. Van alle koopwoningen behoort bijna de helft van het dure segment (met een prijs vanaf € 350.000, prijspeil 2010) toe aan gezinnen met kinderen. Zij beschikken blijkbaar over de financiële middelen om deze huizen te kopen en zijn bereid - of genoodzaakt - om te betalen voor extra ruimte. Van de huishoudens die hoofdzakelijk in meergezinswoningen wonen, zoeken de jongeren voornamelijk hun heil in het laaggeprijsde huursegment. De figuren 14 en 15 geven een beeld van de verdeling over huur- en koopsector, met daarin een verdeling over het prijsniveau.



Figuur 14 Samenstelling van de woningvoorraad naar eigendom. Bron: WoON

Woonduur

De woonduur is de tijd dat mensen op één adres wonen. Grote gebeurtenissen in een mensenleven zijn in hoge mate bepalend voor iemands wooncarrière. Denk hierbij aan het volgen van



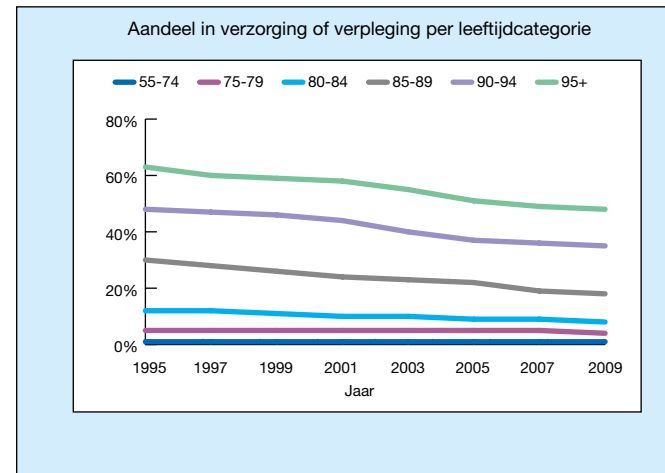
Figuur 15 Eigendom en prijsklasse (2009) per woning en per leeftijd van de hoofdbewoner. Bron: WoON

een opleiding, een eerste baan, samenwonen, promotie, ouderschap, het uit huis gaan van kinderen, scheiding en pensionering. Veel van deze gebeurtenissen vinden plaats vóór het 35ste levensjaar. Dit verklaart waarom jonge mensen gemiddeld korter in een huis wonen dan ouderen. In de betrekkelijk rustige levensperiode (tussen ongeveer 35 en 60 jaar) neemt de gemiddelde woonduur snel toe. Bij het bereiken van de pensioengerechtigde leeftijd (vanaf 60 tot 65 jaar) neemt de woonduur nog wel toe, maar minder snel. Hier speelt mee dat mensen op latere leeftijd vaker verhuizen, om gezondheidsredenen of om kleiner of goedkoper te gaan wonen.

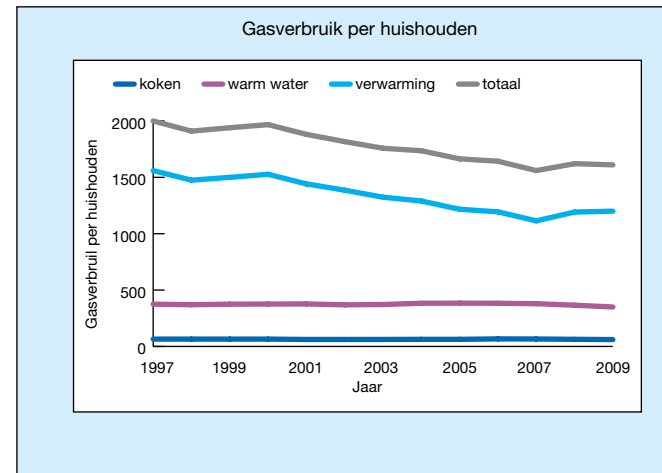
Ouderen blijven gemiddeld steeds langer in hun huidige woning wonen. Dit kan erop duiden dat het beleid om ouderen langer zelfstandig te laten wonen (onder meer door financiële steun bij bouwkundige aanpassingen aan de woning en bij zorg aan huis) vruchten afwerpt. De doorstroming op de woningmarkt wordt door deze ontwikkeling niet bevorderd.

Verzorgd wonen

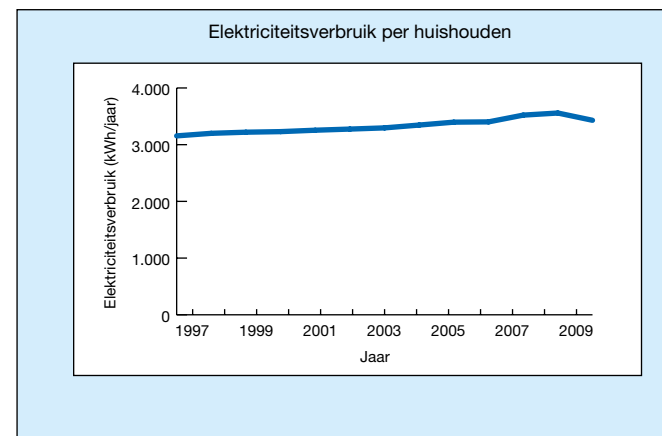
Het is niet meer vanzelfsprekend dat senioren de laatste jaren van hun leven doorbrengen in een verzorgings- of verpleeghuis. Dit blijkt uit het overzicht van het aantal ouderen dat in zo'n instelling verblijft, zie figuur 16.



Figuur 16 Personen in verzorgings- of verpleeghuis, naar leeftijd. Bron: CBS, ABF research



Figuur 17 Gemiddeld gasverbruik (in m³ per jaar) per huishouden voor verwarming, warm water en koken, in de periode 1997 tot en met 2008. Bron: CBS



Figuur 18 Gemiddeld elektriciteitsverbruik (in kWh per jaar) per huishouden in de periode 1997 tot en met 2008. Bron: CBS

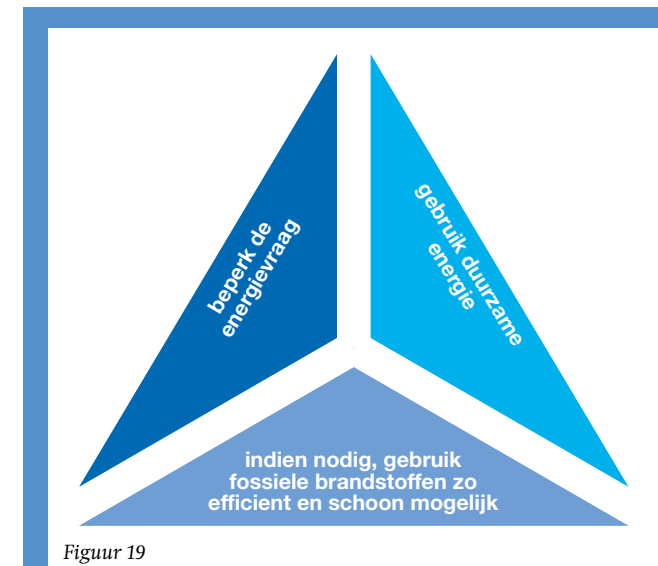
Woonde in 1995 nog één op de drie personen tussen de 85 en 90 jaar in een tehuis, in 2009 was dat nog maar één op de zes. Deze afname is deels te verklaren uit de betere gezondheid van ouderen. Daarnaast speelt het brede aanbod van woonvormen een rol. Ook zijn er de laatste jaren meer mogelijkheden om de eigen woning aan te passen. De verruiming van het aanbod is mede tot stand gekomen door het overheidsbeleid, dat erop gericht is ouderen tot op hoge leeftijd zo veel mogelijk zelfstandig te laten wonen.

3.2 Ontwikkeling van het energiegebruik

In figuur 17 is zichtbaar hoe het gemiddelde gasverbruik per huishouden sinds 1997 is gedaald. Isolatie (met name gevel- en dakisolatie), zuinige HR-ketels en andere besparingsmaatregelen hebben duidelijk invloed gehad op het verbruik. In de grafiek van het gemiddelde elektriciteitsverbruik (figuur 18) is duidelijk een stijgende trend waarneembaar.

Het reduceren van de warmtevraag is de eerste stap in de Trias Energetica. In de bestaande woningbouw gaat het dan om goed isoleren en kierdicht maken. Dit kan in de meeste woningen tot een aanzienlijke vraagbeperking leiden.

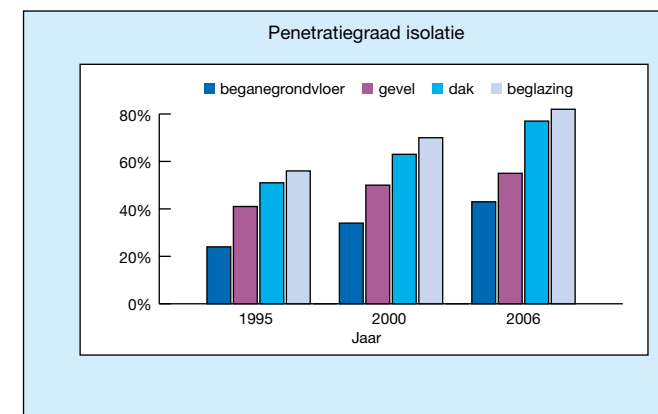
Figuur 20 geeft een beeld van de ontwikkeling van de penetratiegraden van de verschillende isolatietypes (glas-, dak-, muur- en vloerisolatie) in de afgelopen tien jaar. Alle vormen van isolatie kennen een stijgende trend, hoewel de absolute penetratiegraad duidelijk uiteenloopt. Glasisolatie kent de hoogste penetratie, vloerisolatie de laagste. Bij 43% van de woningen was in 2006 de beganegrondvloer (voor meer dan de helft van het vloeroppervlak) geïsoleerd.



Figuur 19

Trias Energetica

De Trias Energetica is een driestappenmodel voor energiebesparing in de gebouwde omgeving, met als doel het gebruik van fossiele energiebronnen te reduceren. De eerste stap houdt in dat de energievraag zo veel mogelijk en blijvend wordt beperkt. De tweede stap gaat uit van de inzet van zo veel mogelijk duurzame energie: zon, windenergie, biomassa en bodemwarmte (of geothermie). Door de eerste twee stappen wordt de vraag naar fossiele energie aanzienlijk gereduceerd. In de derde stap wordt, als dat nog nodig is, fossiele energie zo schoon en zuinig mogelijk ingezet.

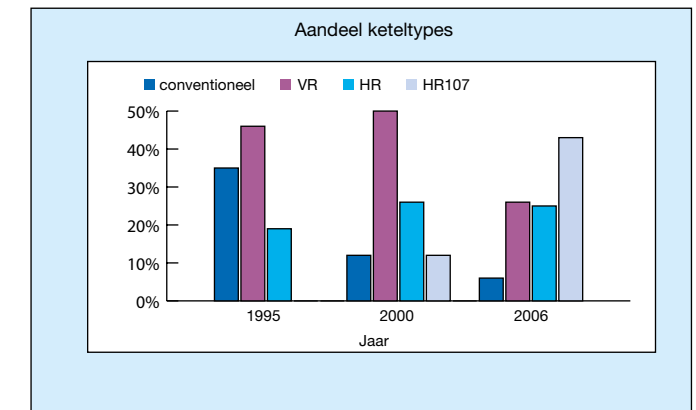


Figuur 20 Penetratie van isolatiemaatregelen in het totale bestand van de woningbouw. Bron: WoON

3.2.1 Ruimteverwarming

Voor ruimteverwarming kennen we vier installatietypes: lokale verwarming, cv-installaties, stadsverwarming en blok- of wijkverwarming. Lokale verwarming en cv-systemen zijn voorbeelden van individuele verwarming. Stadsverwarming, blok- en wijkverwarming vallen onder de collectieve systemen. Het aandeel van de collectieve systemen is redelijk constant.

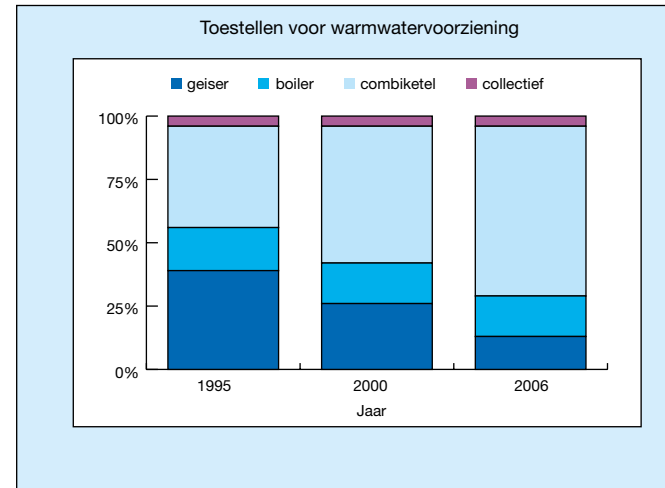
De standaard voor ruimteverwarming in Nederland is de cv-ketel. Het aandeel van cv-installaties neemt nog steeds toe. De individuele centrale verwarming kent verschillende soorten ketels, onderscheiden aan de hand van hun rendement. Globaal gesproken worden twee keteltypen toegepast: verbeterd rendement (VR), met een rendement van circa 80% (op bovenwaarde), en hoog rendement (HR100 of HR107), met een rendement van 85 tot 93%. Het marktaandeel van HR-ketels bedroeg in 2006 zo'n 67%. De resterende 33% bestond voor één vijfde uit conventionele ketels en voor vier vijfde uit VR-ketels.



Figuur 21 Relatieve aandelen van de verschillende types cv-ketel in alle woningen met een cv-ketel. NB: in de periode 2006 tot het samenstellen van dit boek is naar verwachting nog de helft van de VR-toestellen vervangen door HR107-toestellen. Bron: WoON

3.2.2 Warm water

Vroeger werden voor het verwarmen van tapwater vaak geisers en elektrische boilers gebruikt. Deze toestellen zijn duidelijk op hun retour. De standaard is tegenwoordig de HR-combiketel, die inmiddels ongeveer 70% van alle woningen van warm water voorziet. De keukenboiler fungeert daarbij nadrukkelijk als extra warmwatervoorziening in de keuken.



Figuur 22 Relatieve aandelen van de verschillende types warmwatervoorziening. De aandelen van zonne- en warmtepompboilers zijn nog te klein om in deze grafiek zichtbaar gemaakt te worden. Bron: WWI

De eisen ten aanzien van warmwatercomfort zijn de afgelopen jaren steeds hoger geworden. De gemiddelde badkamer in Nederland beschikt over een douche en/of bad. Dertig jaar geleden was dit voorbehouden aan de badkamers van bovenmodale woningen.

3.2.3 Ventilatie

Ventilatie in een woonhuis is van cruciaal belang. Bewoners, huisdieren en planten produceren binnen een woning elke dag vele liters vocht. Daarnaast raakt de lucht vervuild als gevolg van koken, rook en stoffen die allergieën kunnen veroorzaken. Ventilatie zorgt voor frisse lucht en voorkomt dat vocht en schadelijke stoffen zich ophopen. Naarmate we woningen beter isoleren (om energie te besparen) en meer kierdicht maken, worden ventilatievoorzieningen belangrijker.



Figuur 23 Systeem voor mechanische (afzuig)ventilatie. Bron: Itho

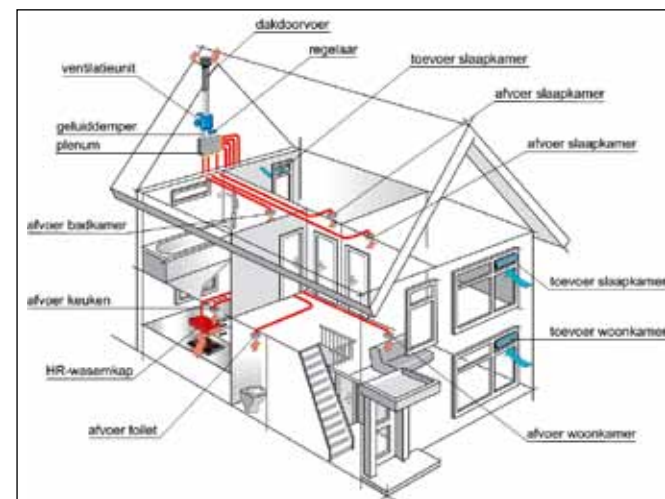
Mechanische afzuiging

Voor een goede ventilatie is bij aanwezigheid van bewoners een constante luchtstroom nodig. Bij mechanische afzuigventilatie voert een ventilatiesysteem de binnenlucht continu naar buiten af. Buitenlucht komt dan via klepramen of roosters op natuurlijke wijze de woning binnen. Als het goed is ontworpen, geïnstalleerd, afgesteld en onderhouden, zal een ventilatiesysteem niet leiden tot tocht. Ook moet een ventilatiesysteem regelmatig worden schoongemaakt.

Oudere woningen zijn meestal niet voorzien van mechanische afzuigventilatie. Van alle woningen van vóór 1991 heeft ongeveer 20% een ventilatiesysteem; meestal zijn dit de meergezinswoningen. Met name de aanscherping van de EPC heeft toepassing van mechanische ventilatie een sterke impuls gegeven. Tegenwoordig is iedere nieuwbouwwoning voorzien van mechanische ventilatie.

Gebalanceerde ventilatie

Nieuwe woningen zijn vaak voorzien van gebalanceerde ventilatie. Zo'n ventilatiesysteem voert verse buitenlucht toe en voert binnenlucht af. De aanvoer en de afvoer zijn daarbij in balans. Meestal wordt bij gebalanceerde ventilatie ook warmteterugwinning toegepast. Daarbij geeft de af te voeren lucht via een warmtewisselaar zijn warmte af aan de koelere buitenlucht die wordt aangezogen. De buitenlucht wordt daardoor voorverwarmd; zo blijft het grootste deel van de warmte binnen de woning.



Figuur 24 Systeem voor gebalanceerde ventilatie. Bron: Itho

Zowel bij gebalanceerde ventilatie als bij mechanische afvoer met natuurlijke toevoer van buitenlucht is het belangrijk dat het systeem 24 uur per dag ventileert. Het ventilatiesysteem mag nooit kunnen worden uitgeschakeld. Omdat bij balansventilatie de toevoerroosters ontbreken, moet hier bij uitval van het ventilatiesysteem geventileerd worden door ramen open te zetten. Het ontwerp van een balansventilatiesysteem moet worden afgestemd op het gebruik van de woning. Bij het ontwerp moet rekening gehouden worden met onder meer de warmtevraag, de isolatiewaarde van de gebouwschil en de kierdichtheid.

Onderhoud van het ventilatiesysteem

Een ventilatiesysteem bestaat uit een ventilatie-unit, eventueel een warmtewisselaar voor warmteterugwinning, ventilatiekanalen en ventilatieroosters. Door het complete systeem passeert een grote hoeveelheid lucht. Daardoor kunnen stofdeeltjes en vuil zich in de loop van de tijd gaan vastzetten in de roosters en kanalen. Na verloop van tijd kan het systeem minder goed gaan werken, geluid gaan maken en stofdeeltjes afgeven. Regelmatig onderhoud conform de voorschriften van de fabrikant is daarom belangrijk voor het goed functioneren van een ventilatiesysteem.

3.2.4 Koeling

Koeling is tegenwoordig in veel bedrijfs- en kantoorpanden voorhanden. In praktisch iedere nieuwe auto is een airconditioning ingebouwd. In het verlengde van deze trends is de toepassing van comfortkoeling ook in woonhuizen in opkomst. Dit heeft ook te maken met de toenemende kierdichtheid en isolatiegraad van nieuwbouwwoningen; uit de vereiste 'oververhittingsberekeningen' blijkt soms dat bij de interne warmtelast in een woning (voornamelijk ontstaan door verlichting en huishoudelijke apparaten) enige koelcapaciteit nodig is voor een houdbaar binnenklimaat.

Comfortkoeling kan de vorm hebben van een zogeheten airconditioning, een koelapparaat dat niet geïntegreerd is met de andere installaties in de woning. Deze apparaten worden vaak geplaatst in slaap- of werkvertrekken. Wanneer de woning voorzien is van een warmtepomp, is het mogelijk om gekoeld water door het (bestaande) watervoerende warmteafgiftesysteem te leiden. Bij een lucht/waterwarmtepomp is energie nodig voor het aandrijven van de compressor (actieve koeling). Bij grondgebonden warmtepomp-

systemen is in koelbedrijf alleen energie nodig voor het rondpompen van koud water uit de bron (vrije koeling).

3.2.5 Elektriciteitsverbruik

Gebouwegebonden

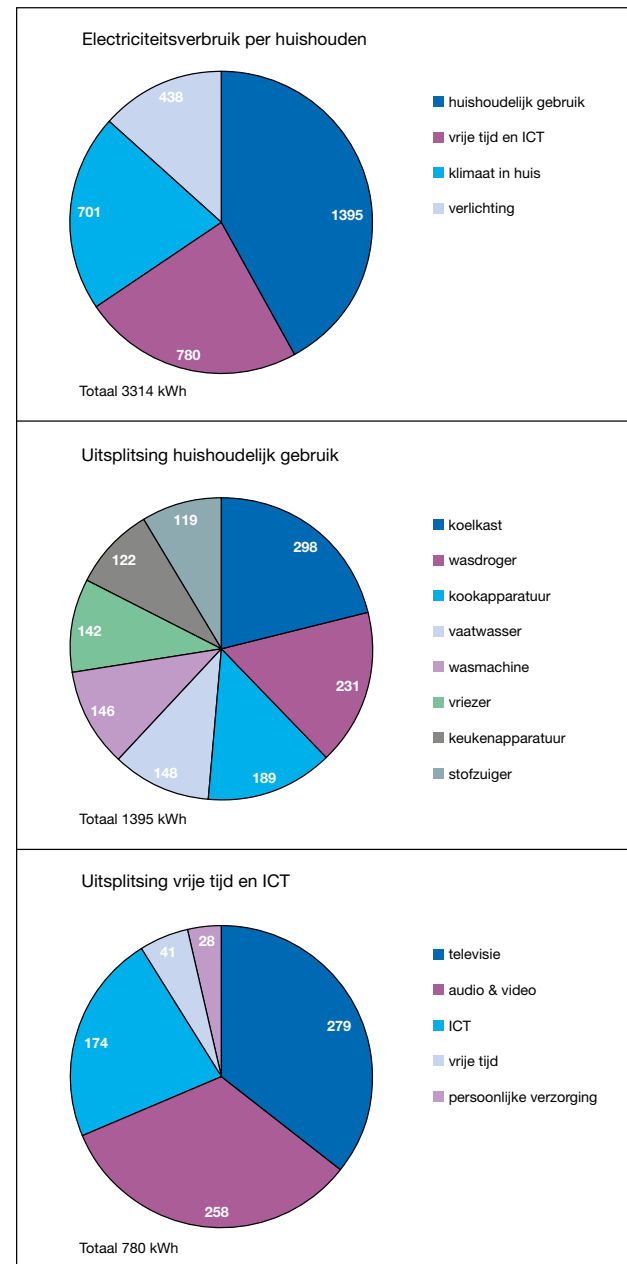
Het gebouwgebonden elektriciteitsverbruik is alle verbruik dat samenhangt met verwarming, koeling, bereiding van warm water, en ventilatie binnen de woning. Dankzij de hoge penetratiegraad van gaswandketels voor ruimteverwarming is aardgas de primaire energiedrager voor verwarming. Het elektriciteitsverbruik van een cv-ketel valt in de orde grootte van zo'n 200 kWh per jaar.

De inzet van elektrische warmtepompen heeft een grote invloed op het gebouwgebonden elektriciteitsverbruik. Er zijn grote verbruiksverschillen tussen de diverse types warmtepompen. Die verschillen zijn vooral toe te schrijven aan het type bijstook dat wordt gekozen voor de pieklast in de warmtevraag (voor ruimteverwarming en warm water). Vaak wordt om kostentechnische redenen gekozen voor elektrische bijstook door middel van weerstandsverwarming. Dergelijke warmtepompen vergen een veel zwaardere aansluiting op het elektriciteitsnetwerk dan warmtepompen met een gasgevoede bijstook.

Niet-gebouwegebonden

Het niet-gebouwegebonden elektriciteitsverbruik is het verbruik dat niet samenhangt met verwarming, koeling, warmwaterbereiding en ventilatie. In de afgelopen veertig jaar is de hoeveelheid elektrische apparaten in een doorsnee huishouden spectaculair gestegen. Vaatwasser, combimagnetron, wasdroger, diverse tv's en meerdere pc's behoren inmiddels standaard tot de inventaris van een gemiddeld huishouden. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik per huishouden is gestegen van ongeveer 2.700 kWh per jaar in 1990 tot ongeveer 3.400 kWh per jaar in 2010 [ECN, 2010]. De trend is nog steeds stijgend. Daarbij is het aantal woningen in dezelfde periode sterk gegroeid en het gemiddelde aantal bewoners per woning gedaald.

De spreiding van het niet-gebouwegebonden elektriciteitsverbruik is groot. Zeer zuinige huishoudens verbruiken minder dan 1.800 kWh per jaar, terwijl grote gebruikers ver boven de 5.000 kWh per jaar kunnen uitkomen. Uit onderzoek [VHK, 2008] [Ecofys, 2007] blijkt dat de ontwikkeling van het energie-



Figuur 25 Verwacht huishoudelijk elektriciteitsverbruik in 2020 in kWh/jaar per apparaat in een woning met een cv-toestel voor ruimteverwarming. Bron: VHK

label voor huishoudelijke apparaten een duidelijke reductie van het energieverbruik per apparaat in gang heeft gezet. Gezien de gemiddelde levensduur van huishoudelijke apparatuur heeft deze reductie een geleidelijk effect op het gemiddelde verbruik per woning.

In de nabije toekomst zal de opkomst van zogeheten *smart grids* van invloed zijn op de manier waarop huishoudens omgaan met elektriciteit. Smart grids stemmen vraag en aanbod van elektriciteit (zowel centraal als decentraal opgewekt) zo soepel mogelijk op elkaar af. Het ligt voor de hand dat grote huishoudelijke apparaten waarvan het moment van inschakelen willekeurig gekozen kan worden, zoals vaatwassers, wasdrogers, wasmachines enzovoort, in de toekomst via smart grids worden aangestuurd. Dit geldt ook voor elektrisch vervoer.

3.3 Energielabels

Een energielabel is een instrument om de energieprestatie van een woning snel in beeld te brengen. Het label vermeldt de energie-index (EI) en het jaarlijkse verbruik van de woning, uitgesplitst in gas, elektriciteit en warmte. Het energielabel geeft een gestandaardiseerd energieverbruik, gebaseerd op gebouw eigenschappen en gemiddeld gebruikersgedrag. Bij een gegeven energielabel kan het daadwerkelijke energieverbruik aanzienlijk afwijken, onder meer als gevolg van het bewonersgedrag of als gevolg van fouten en onnauwkeurigheden bij de bouw en installatie.


3.3.1 Systematiek van energielabels

In de labelsystematiek worden woningen op basis van de energie-index ingedeeld in klassen A tot en met G. In een woning met energielabel G zijn nog veel energiebesparende maatregelen mogelijk. Valt de woning in klasse A, dan zijn de meest rendabele energiebesparende maatregelen getroffen. Een woning met label A++ geldt als zeer zuinig. De energiezuinigheid van woningen van hetzelfde woningtype is aan de hand van de labels dus redelijk te vergelijken. Woningen die verschillen in aard en omvang zijn aan de hand van de labelsystematiek niet direct vergelijkbaar. Zo hebben meergezinswoningen niet altijd een gunstig energielabel, ondanks het gegeven dat het absolute energiegebruik doorgaans lager is dan bij eengezinswoningen. Zie ook tabel 1 op pagina 31.

Weinig besparingsmogelijkheden	
A	A++ <0,50 A+ 0,51-0,70 A 0,71-1,05
B	1,06-1,30
C	1,31-1,60
D	1,61-2,00
E	2,01-2,40
F	2,41 – 2,90
G	> 2,91

Energielabel woning

Afgegeven conform de Regeling energieprestatie gebouwen.
Veel besparingsmogelijkheden




D

(zie toelichting in bijlage)

Uw woning

Labelklasse maakt vergelijking met woning(en) van het volgende type mogelijk

Rijwoning hoek

Gebruiksoppervlakte 154,62 m²	Adviesbedrijf Perfectbouw i.o.v. Vereniging Eigen Huis
Opnamedatum 9 december 2010	Inschrijffnummer IKB2088/09
Energielabel geldig tot 9 december 2020	Handtekening 
Afmeldnummer 668852185	

Energielabel op basis van een ander representatief gebouw of gebouwdeel? Ja Nee


Adres representatief gebouw of gebouwdeel: _____

Straat
Kleine Marktstraat

Nummer/toevoeging
2 -0

Postcode
3841BD

Plaats
HARDERWIJK



Standaard energiegebruik voor uw woning

Energiegebruik maakt vergelijking met andere woning(en) mogelijk

- Het standaard energiegebruik is de hoeveelheid primaire energie die nodig is voor de verwarming van uw woning, de productie van warm water, ventilatie en verlichting.
- De eventuele opbrengst van een zonnepaneel wordt hiervan afgetrokken.
- Het energiegebruik wordt berekend op basis van de bouwkundige eigenschappen en de installaties van uw woning.
- Bij de berekening wordt uitgegaan van het gemiddelde Nederlandse klimaat, een gemiddeld aantal bewoners en gemiddeld bewonersgedrag.
- Het standaard energiegebruik wordt uitgedrukt in de eenheid 'megajoules', dit wordt uitgesplitst naar elektriciteit (kWh), gas (m³) en warmte (GJ).

129.374 MJ

(megajoules)

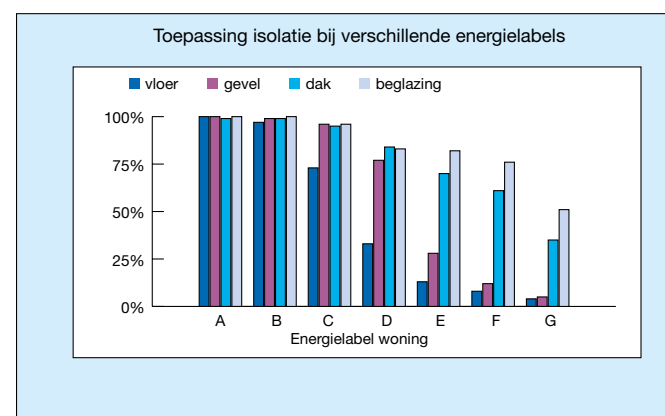
2171 kWh (elektriciteit)
3109 m³ (gas)
0 GJ (warmte)

Figuur 26a en 26b Energielabelsystematiek. Bron: BDH

Het energielabel geeft aan hoe energiezuinig een woning is ten opzichte van vergelijkbare woningen. Huiseigenaren en verhuurders zijn vanaf 1 januari 2008 verplicht om bij verkoop of verandering van huurder een energielabel te overhandigen aan (potentiële) nieuwe bewoners als die hierom vragen. Een gecertificeerd adviseur kan zo'n energielabel opstellen. Woningen jonger dan tien jaar hoeven geen energielabel te hebben omdat deze woningen op basis van een in de bouwvergunning vastgelegde energieprestatie gebouwd zijn.

Het energielabel is bedoeld om huiseigenaren te stimuleren bestaande woningen energiezuiniger te maken. Een lager energiegebruik zorgt namelijk voor daling in de CO₂-uitstoot. Dit maakt het voor geïnteresseerden eenvoudiger om de energiekwaliteit mee te nemen in hun afweging. Ongeveer vier op de vijf verhuisde huishoudens geeft aan op de hoogte te zijn van het energielabel. Toch wordt de mogelijkheid om een energielabel op te vragen bij de aankoop maar incidenteel gebruikt. Bij oudere woningen wordt vaak geen energielabel vastgesteld, ondanks het feit dat dit juist bij deze woningen waardevolle informatie oplevert voor de koper.

Het lijkt erop dat eigenaar-bewoners eerder en vaker energetische verbeteringen aan hun woning aanbrengen dan verhuurders. Het onderhoud aan huurwoningen wordt vaak op initiatief van de eigenaar uitgevoerd en is meestal grootschalig (renovatie op complexniveau), terwijl een eigenaar-bewoner vaker kleine aanpassingen doet.



Figuur 27 Relatie tussen het energielabel en de isolatiegraad van bouwdelen. Bron: WVI

Bij de woningen met een energielabel A of B zijn in bijna alle gevallen de vloer op de begane grond, de gevel, het dak en de beglazing geïsoleerd. Bij de woningen met een F- en G-label ontbreken met name de gevel- en vloerisolatie. Dakisolatie en geïsoleerde beglazing worden bij deze woningen wel regelmatig aangetroffen. Ondanks de aanwezigheid van deze isolatie houden deze woningen door het ontbreken van gevel- en vloerisolatie een laag energielabel.

3.3.2 Het label als instrument

Het energielabel is als beleidsinstrument zeer geschikt om de verduurzaming van de woningbouw te monitoren en te sturen. Zowel kwantitatief als kwalitatief. Met het energielabel is de mogelijkheid gecreëerd om landelijk, provinciaal, regionaal of per gemeente doelstellingen te definiëren als labelstappen in een bepaald tijdvak. Landelijke en regionale overheden kunnen hiermee sturing geven aan het proces van verduurzaming, bijvoorbeeld door een verbetering van de energie-index verplicht te stellen binnen een bepaald tijdvak.

In het wettelijk vastgelegde Woning Waardering Stelsel (WWS) is een kader gecreëerd voor verhuurders waarin labelverbetering van een huurwoning vertaald mag worden naar concrete aanpassingen van de huursom. Hiermee is het probleem van de zogeheten *split incentive* (degene die investeert is niet degene die de financiële voordelen heeft van de investering) onderwerpen. Met vraagreductie is in de meeste gevallen de eerste labelstap te realiseren. In de bestaande bouw gaat het dan voornamelijk om vloer-, wand-, kap- en glasisolatie. Hierna moet men de oplossingen voor een nog beter energielabel zoeken in de toepassing van duurzame energieoplossingen als zonneboilers, zon-PV, HRE-ketels en (hybride)warmtepomptoepassingen. Naar verwachting zal de landelijke overheid haar toekomstige beleid voor verduurzaming van de gebouwde omgeving baseren op de energielabelsystematiek. Daarbij moet worden opgemerkt dat één labelstap in één miljoen vrijstaande woningen een veel grotere energiebesparing en CO₂-reductie oplevert dan één labelstap in één miljoen meergezinswoningen. Maar gezien de eigendomssituatie en de betrokkenheid van woningcorporaties is te verwachten dat de maatregelen in meergezinswoningen eerder genomen worden dan in vrijstaande woningen en dan betrekking hebben op een groter aantal woningen ineens. ■

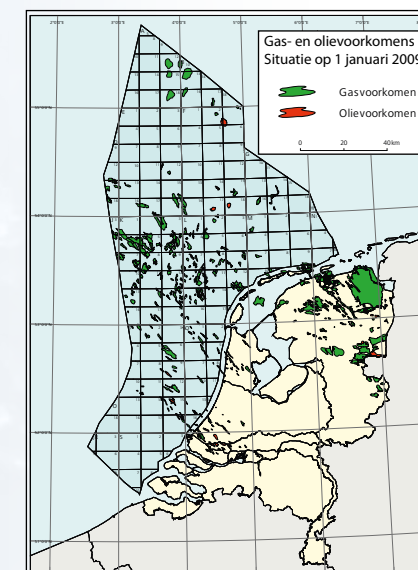
Hoofdstuk 4

Aardgas en energietransitie

Aardgas is voor de Nederlandse economie van groot belang. De winning en verkoop van aardgas is al vele jaren een belangrijke bron van inkomsten. Daarnaast heeft Nederland sinds de vondst van het aardgas het meest fijnmazige aardgasnetwerk van de wereld gebouwd. Die gasinfrastructuur is een kostbaar bezit. Dit hoofdstuk staat stil bij de rol van aardgas in Nederland en in de wereld. Ook laat het zien hoe aardgas een rol speelt bij de noodzakelijke verduurzaming van de energievoorziening in de komende decennia.

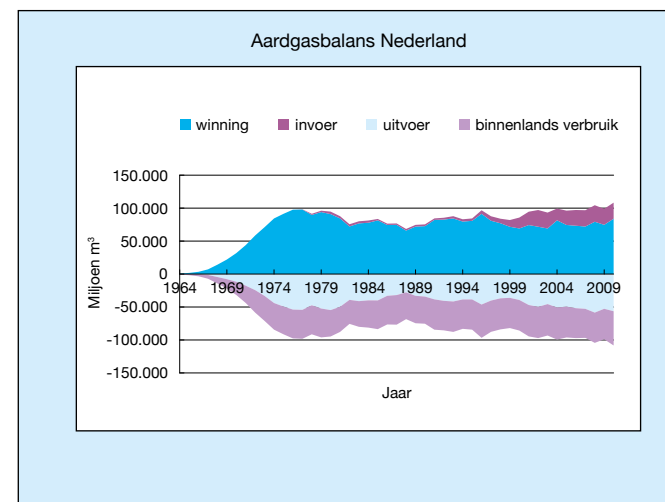
4.1 Aardgas in Nederland

In 1959 vond de Nederlandse Aardolie Maatschappij in Slochteren een groot gasveld, met een inhoud van 2.700 miljard m³ aardgas. Medio 2010 is hiervan nog ongeveer 1.200 miljard m³ beschikbaar. De gasvondst veranderde de Nederlandse energiehouding enorm. In de loop van de jaren zestig en zeventig werd aardgas de belangrijkste energiebron in Nederland. De baten uit de verkoop van aardgas hebben aanwijsbaar bijgedragen aan de welvaartsontwikkeling. De aardgasbaten hebben de afgelopen decennia meer dan €200 miljard bijgedragen aan de staatsbegroting.

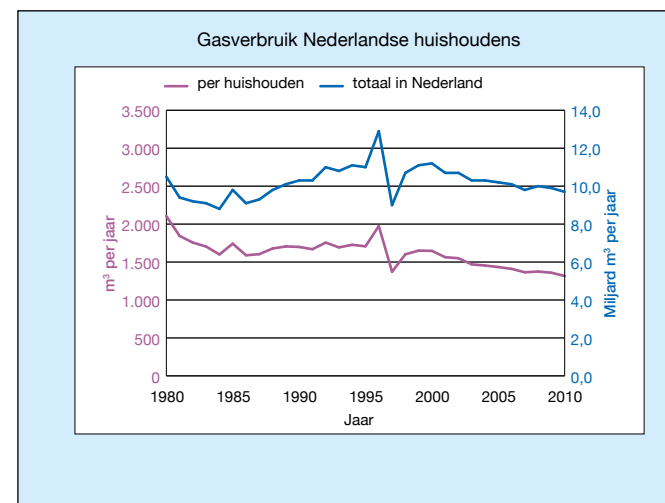


Figuur 1 Aardgasconcessies in Nederland. Bron: NAM

Figuur 1 geeft een beeld van de locaties waarvoor concessies zijn afgegeven voor de winning van aardgas. Naast de winning uit eigen bodem wordt er ook aardgas geïmporteerd. Figuur 2 toont de verhoudingen tussen de hoeveelheden gewonnen, geïmporteerd en geëxporteerd aardgas in de loop der jaren.



Figuur 2 Aardgas in Nederland: winning, gebruik, in- en uitvoer
Bron: CBS



Figuur 3 Ontwikkeling van het gemiddeld aardgasverbruik per huishouden in Nederland. Bron: CBS

4.1.1 Huishoudelijk gasverbruik

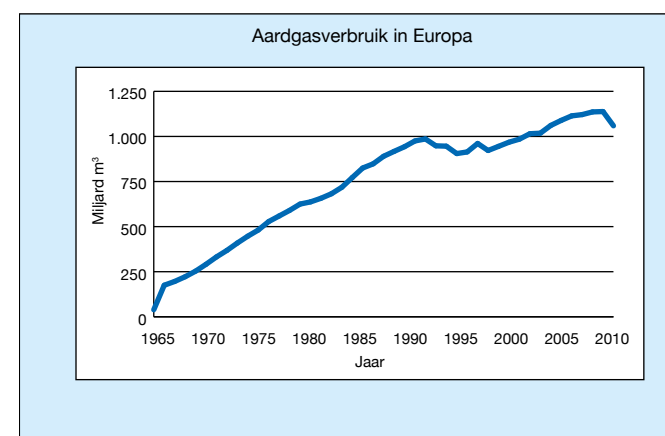
In Nederland beschikt bijna ieder huishouden over een gasaansluiting. In 2010 was de gemiddelde aardgasconsumptie in Nederland per huishouden ongeveer 1.600 m³ [CBS, 2010]. Het verbruik varieert van minder dan 500 m³ per jaar voor een recent gebouwd nieuwbouwhuis tot 6.000 m³ per jaar voor een niet-geïsoleerde vrijstaande woning van vóór de Tweede Wereldoorlog.

Door allerlei maatregelen daalt het gemiddelde verbruik per huishouden al jaren (figuur 3). Dankzij de structurele energiebesparingsprogramma's vanuit diverse organisaties (woningcorporaties, overheden) zal deze licht neerwaartse trend nog enige tijd aanhouden.

4.1.2 Nederland binnen Europa

Naar verwachting zal het verbruik van aardgas in Europa de komende decennia nog aanmerkelijk toenemen, zoals weergegeven in figuur 4.

Aardgas zal steenkool gaan verdringen als een brandstof voor elektriciteitsopwekking, vanwege de lagere emissies van CO₂ en fijnstof. De afbouw van nucleaire stroomproductie in Duitsland zal naar verwachting worden opgevangen door een combinatie van hernieuwbare energie en aardgasgestookte elektriciteits-



Figuur 4 Gasverbruik in Europa, 1990-2030. Bron: BP Energy Review

centrales. De gestage opmars van duurzame energie (zon-, wind- en getijdenenergie) in Europa vraagt bovendien om snel inzetbare conventionele elektriciteitsproductie. Gasgestookte centrales zijn goed in staat op snelle vraagveranderingen in te spelen. Zij zijn dus (naast de ontwikkelingen op het gebied van smart grids) van belang voor het afstemmen van vraag en aanbod op het net, waarbij de voorkeur steeds meer uitgaat naar het lokaal geproduceerde elektriciteit uit duurzame bronnen.

4.2 De beschikbaarheid van energiedragers

In tabel 1 zijn de bewezen reserves wereldwijd en de reserve/productieratio's weergegeven voor de drie belangrijkste fossiele brandstoffen. De reserve/productieratio is het aantal jaren dat men gebaseerd op de huidige productie nog toe kan met de bewezen reserves.

Soort	Bewezen reserves	Eenheid	Reserve/productieratio
Olie	1.333	x 1.000 miljoen vaten (159 liter)	46
Gas	188	x 1.000 miljard m ³	63
Steenkool	826.001	miljoen ton	119

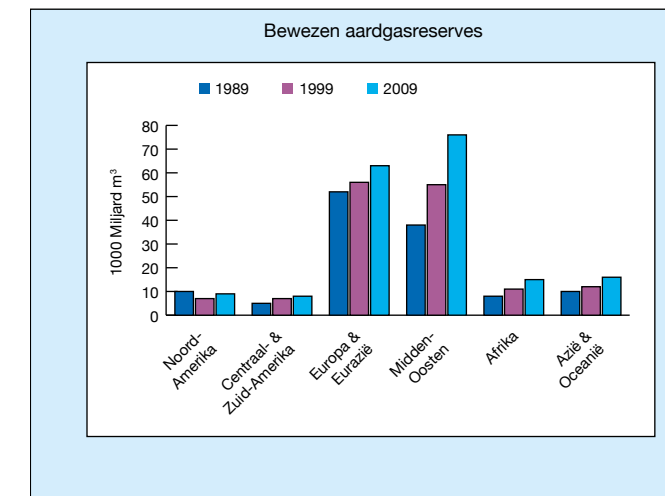
Tabel 1 Reserves en reserve/productieratio's van de belangrijkste energiebronnen. Bron: BP Energy Review

De voorraden van olie en gas zijn voornamelijk geconcentreerd in het Midden-Oosten, de USA en Rusland. Kolen worden in veel meer regio's in grote hoeveelheden aangetroffen. Voor aardgas zijn de voorraden verdeeld zoals aangegeven in figuur 5.

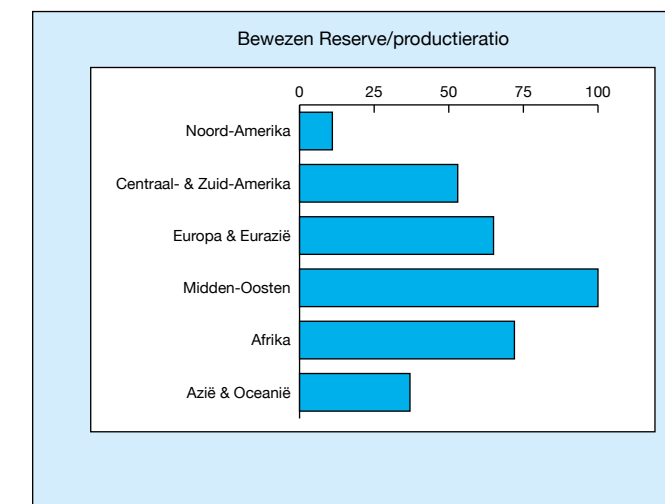
De bewezen voorraden in Noord-Amerika, Afrika en Azië zijn relatief gezien over een periode van twintig jaar vrijwel constant gebleven als gevolg van nieuwe vondsten. De reserves binnen de Europese Unie zijn afgenomen, zoals te zien is in tabel 2.

4.2.1 De beschikbaarheid van aardgas

De mondiale gasreserves, inclusief de reserves die worden toegedicht aan schaliegas (paragraaf 4.2.2), zijn zo groot dat tot ver in de 21ste eeuw gas beschikbaar zal zijn voor de wereldmarkt. Deze reserves kunnen deels ook dienen als alternatief voor ruwe aardolie. Gas-to-liquid technologie (onder meer ontwikkeld door Shell in Qatar) maakt productie van vloeibare brandstoffen uit aardgas mogelijk.



Figuur 5 Bewezen gasreserves in de wereld in 1.000 miljard m³.
Bron: BP Energy Review



Figuur 6 Reserve/productieratio's (bewezen reserves) voor aardgas in verschillende regio's van de wereld. Bron: BP Energy Review

Figuur 6 geeft de reserve/productieratio's weer voor aardgas in de verschillende regio's van de wereld, bij het huidige productie-tempo.

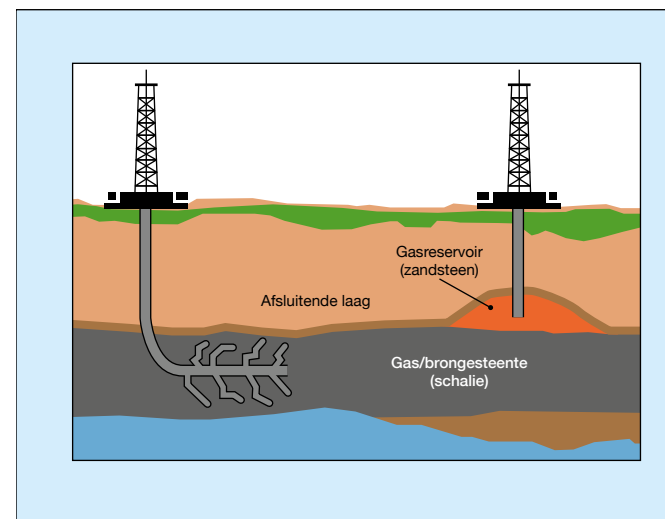
De reserve/productieratio's uitgesplitst voor de regio Eurazië zijn weergegeven in tabel 2.

	1989	1999	2009
Europese Unie	3,36	3,98	2,49
OECD	15,6	14,3	16,4
Voormalige Sovjet-Unie	47,1	50,9	57,5

Tabel 2 Reserve/productieratio's voor aardgas in de regio Eurazië.
Bron: BP Energy Review

Ongeveer 45% van de bewezen aardgasreserves in de Europese Unie behoort tot de Nederlandse reserves (waarbij vermeld moet worden dat Noorwegen geen deel uitmaakt van de Europese Unie). Hieruit valt op te maken dat de andere Europese landen relatief afhankelijk zijn van gasleveranties uit onder meer Rusland en het Midden-Oosten.

De Nederlandse bewezen aardgasreserves bedragen zo'n 1.200 miljard m³ (peildatum 2010). Bij een verbruikstempo van circa 39 miljard m³ per jaar zou dit voldoende moeten zijn voor dertig jaar binnenlands gasverbruik (import uit het buitenland buiten beschouwing gelaten). Ervan uitgaande dat energiebesparingsprogramma's en de toenemende inzet van hernieuwbare energie



Figuur 7 Schematische weergave van de winning van schaliegas.
Bron: Energieraad

het gemiddeld verbruik zullen doen dalen, kan deze periode in de praktijk langer worden. Al met al is de conclusie dat Nederland gedurende een transitieperiode naar een volledig duurzame energievoorziening, die pakweg twintig tot veertig jaar zal duren, zelf kan voorzien in de behoefte aan aardgas.

4.2.2 Schaliegas

Olie en gas komen meestal uit zandachtige bodem. In de VS is in de afgelopen jaren een techniek ontwikkeld waarmee ook gas kan worden gewonnen uit harde (steenachtige) bodemlagen. Het zogeheten *shale gas* of schaliegas kan een aanzienlijke uitbreiding betekenen van de mondiale gasvoorraden.

De winning van schaliegas is niet vrij van problemen. Om het gas uit gesteente te halen, perst het oliebedrijf onder hoge druk vloeistof in een boorput, waardoor het gesteente letterlijk barst. Door deze barsten kan het gas dan ontsnappen. De vloeistof die hiervoor wordt gebruikt, is belastend voor het milieu. De kans op milieuvuiling neemt daardoor toe.

Als de winning van schaliegas kan plaatsvinden zonder nadelige effecten voor het milieu, is het een beter alternatief dan de winning van teerzandolie. Maar nog altijd geen afdoend alternatief; ook de winbare reserves van schaliegas zijn eindig.

Experts verwachten dat in 2020 de helft van de productie van aardgas in de VS schaliegas zal zijn. In Europa is schaliegas naar verwachting te vinden in Oostenrijk, Hongarije, Ierland, Polen, Zweden, Frankrijk, Duitsland, Nederland en het Verenigd Koninkrijk. De productie ervan zal in Europa echter meer weerstand oproepen dan in de VS.

4.2.3 Vloeibaar aardgas

Liquefied natural gas (LNG) is aardgas dat in vloeibare vorm is gebracht om het gemakkelijker transporteerbaar te maken. Aardgas in vloeibare vorm neemt 600 keer minder volume in beslag dan in gasvormige toestand. De LNG-technologie maakt transport van aardgas mogelijk over afstanden die met pijpleidingen niet te overbruggen zijn. Het transport wordt gedaan met speciale geïsoleerde cryogeentankers. Op de plaats van bestemming wordt het LNG weer in gasvormige toestand gebracht en ter plaatse in het hogedruk gastransportnet ingevoerd.

Aardgas wordt vloeibaar gemaakt door het na reiniging te laten condenseren bij een temperatuur van -160 °C, bij een druk van

2,0 tot 2,5 bar. Het soortelijk gewicht van LNG is 0,41 tot 0,5 kg/liter, afhankelijk van temperatuur, samenstelling en druk. De calorische waarde is afhankelijk van de aardgasbron en het gebruikte proces voor het vloeibaar maken. De calorische waarde van LNG is met ongeveer 24 MJ/liter zo'n 2,4 maal zo groot als die van 'gewoon' samengeperst gas (*compressed natural gas* of CNG). De calorische waarde van LNG is ongeveer 60% van die van dieselolie en ongeveer 70% van die van benzine.

De relatief hoge kosten voor LNG-installaties en -schepen hebben de verspreiding van LNG jarenlang beperkt. Technologische ontwikkelingen en flinke kostenreducties voor terminals en schepen hebben er echter voor gezorgd dat er inmiddels een wereldwijde gasmarkt ontstaat, die minder geconcentreerd is rond de bestaande gastransportlijnen. Grote afnemers van LNG zijn Japan, Taiwan en Korea, landen die zelf geen of beperkte energiebronnen hebben.

De grootste producent van LNG is Qatar, met een productiecapaciteit van 7,8 miljoen ton LNG per jaar, wat overeenkomt met 11,4 miljard m³ aardgas in gasvormige toestand.

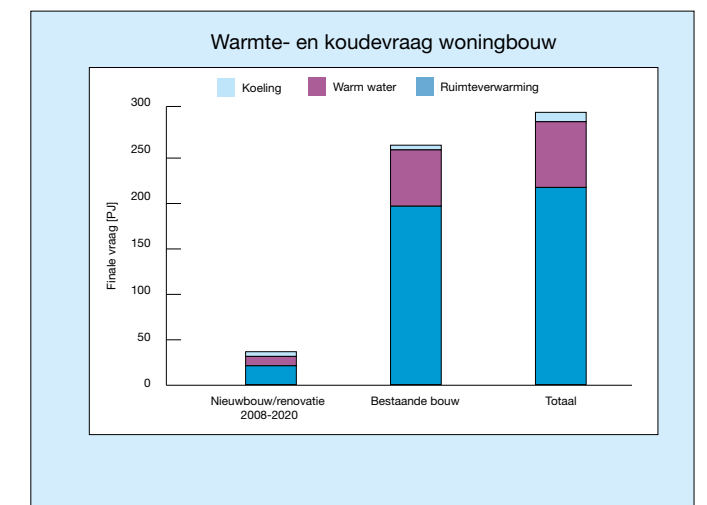
4.3 Aardgas in de gebouwde omgeving

Aan het begin van de 21ste eeuw heeft aardgas in de gebouwde omgeving in Nederland een belangrijke positie. Aardgas wordt hier vooral ingezet voor ruimteverwarming. Toenames van het gasverbruik worden veroorzaakt door volumegroei (meer gebouwen) en door veranderend stookgedrag (meer verwarmde ruimtes en een hogere stooktemperatuur). Door betere isolatie, door klimaatverandering en door steeds betere conversietechnieken zal de gasafzet per gebouw ook licht afnemen. Als er op basis van de huidige zichtbare trends geëxtrapoleerd wordt, zal blijken dat het verbruik van aardgas in de gebouwde omgeving licht afneemt. Desondanks blijft aardgas dominant als energiedrager voor verwarming in de gebouwde omgeving [ECN, 2011].

Hierbij moet wel een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen bestaande bouw en nieuwbouw. Figuur 9 geeft de totale warmte- en koudevraag in 2020 voor de bestaande bouw en de nieuwbouw [Ecofys, 2007]. Duidelijk is dat ongeveer 90% van de warmtevraag voor rekening komt van de bestaande bouw en dat nieuwbouwwoningen (inclusief gerenoveerde woningen die bouwkundig aan dezelfde eisen voldoen) goed zijn voor de resterende 10%.



Figuur 8 LNG-installatie in Egypte. Bron: Shutterstock



Figuur 9 Totale warmte- en koudevraag in 2020 in de woningbouw.
Bron: Ecofys

Voor de gebouwde omgeving zijn diverse technieken voorhanden (of in ontwikkeling) die bijdragen aan een efficiëntere opwekking voor ruimteverwarming. Twee daarvan zijn gebaseerd op de inzet van gas als energiedrager: (micro-)wkk en de gaswarmtepomp. Daarnaast zijn er technieken die gebruikmaken van thermische zonne-energie, omgevingswarmte (in combinatie met elektrische

of gasgedreven warmtepompen), warmte- en koudeopslag, collectieve bio-wkk, biomassakachels en diepe geothermie. Niet al deze technieken zijn even geschikt voor nieuwbouwwoningen en bestaande woningen (zie tabel 3).

	Nieuwbouw/renovatie			Bestaande bouw		
	RV	TW	K	RV	TW	K
Zon-thermisch	x	x			x	
Combiwarmtepomp (indiv. + collectief)	x	x				
HR-ketel/warmtepompcombi				x	x	x
Warmte-/koudeopslag	Warmtepomp		x			
Warmtepompboiler					x	
Collectieve bio-wkk (wijk)	x	x				
Diepe geothermie (wijk)	x	x				

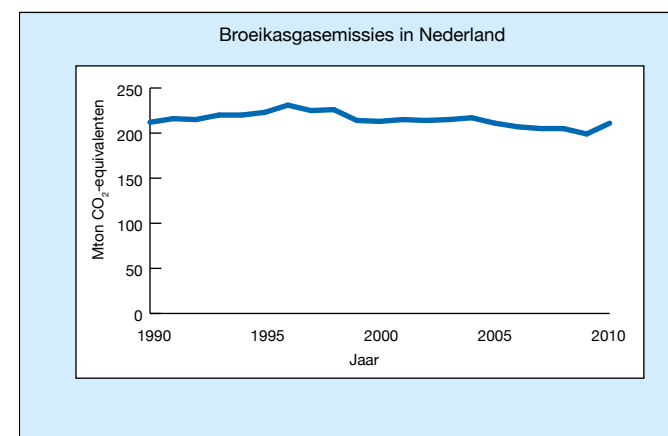
RV = ruimteverwarming, TW = warm tapwater, K = koeling

Tabel 3 Duurzame warmte- en koudeopties in de woningbouw. Een X wil zeggen dat het onderzoeken van de betreffende optie economisch zinvol is. Bron: Ecofys



Figuur 10 Warmtepomp en cv-ketel vormen samen een hybride combinatie. Bron: Itho Daalderop

Omdat aardgas in de toekomst niet meer vanzelfsprekend de enige energiedrager voor ruimteverwarming is, wordt bij de ontwikkeling van nieuwbouwwijken soms de aanleg van een aardgasdistributienet ter discussie gesteld. Op beperkte schaal zijn wijken ontwikkeld waar op wijkniveau alleen een elektriciteitsnet is aangelegd, of waar gekozen is voor de combinatie elektriciteit + restwarmte. Daarmee wordt het aantal opties ingeperkt om energie uit hernieuwbare bronnen (in dit geval groen gas) te gebruiken. In de bestaande bouw is juist grote behoefte aan efficiënte technologie die past binnen de huidige energie-infrastructuur. Een extra reden om bij een daling van het gasverbruik in de nieuwbouw toch een gasnet aan te leggen op wijkniveau is de toekomstige flexibiliteit van de energievoorziening in zogeheten *smart grids*. De essentie hiervan is dat energiegebruikers worden in- en uitgeschakeld op grond van de beschikbaarheid van lokaal opgewekte duurzame elektriciteit. Bovendien is het mogelijk met smart grids om op lokaal niveau te wisselen van energiedrager: van elektriciteit naar gas en omgekeerd. Dit is belangrijk in verband met de belastbaarheid van het lokale net. Micro-wkk (zie hoofdstuk 7) of hybride warmtepompen (hoofdstuk 8) kunnen een cruciale rol spelen bij het lokaal balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit. Dat kan echter alleen als woonhuizen een aansluiting hebben op beide netwerken: zowel gas als elektriciteit. Aardgas, al dan niet verduurzaamd met groen gas, zal daarom de komende decennia een belangrijke rol spelen bij het invullen van de warmtevraag.



Figuur 11 Jaarlijkse CO₂-emissies in Nederland (in miljoenen ton) tussen 1990 en 2010. Bron: CBS

4.4 Naar een duurzame energievoorziening

De inzet van fossiele energie heeft de mensheid de afgelopen decennia veel comfort en welvaart gebracht. Maar de winning en het gebruik van fossiele energie brengen ook grote problemen met zich mee. Een van de grootste effecten van het verbranden van olie, steenkool en aardgas is de aanzienlijke verhoging van de concentratie CO₂ in de atmosfeer. Het is vrijwel zeker dat dit effect leidt tot een relatief snelle verandering van het klimaat, met als gevolg daarvan grote droogte in sommige regio's en wateroverlast en natuurgeweld in andere. Overigens is de specifieke CO₂-uitstoot van aardgas aanmerkelijk lager dan die van olie of steenkool.

Naast de emissie van CO₂ zijn ook de emissies van SO₂, NO_x en fijnstof problematisch. Ook hier steekt aardgas relatief gunstig af bij aardolie en vooral steenkool. Bij de verbranding van aardgas komt doorgaans minder NO_x vrij dan bij de inzet van steenkool en olie, en vrijwel geen SO₂ of fijnstof.

Andere problemen die samenhangen met de grootschalige inzet van fossiele energiedragers zijn de milieueffecten van boringen en mijnbouw, de sociale ontwrichting van grootschalige grondstoffenwinning, de politieke afhankelijkheid van onbetrouwbare oliestaten en de afhankelijkheid van grillige grondstoffeprijzen. Daar komt bij dat aardolie en aardgas niet alleen energiedragers zijn, maar ook grondstoffen voor hoogwaardige producten (kunststoffen, chemicaliën, medicijnen). Het is steeds minder verantwoord om eindige grondstoffen grootschalig te verbranden en daarmee een toekomstige grondstoffenschaarste in de hand te werken. Het verbranden van steenkool, olie of gas is immers onomkeerbaar.

Al met al is er een dringende noodzaak om het gebruik van fossiele energiedragers zo veel mogelijk terug te dringen. Dat betekent dat enerzijds het gebruik van energie gereduceerd wordt (vraagbeperking) en dat anderzijds steeds meer duurzame of hernieuwbare energiebronnen worden ingezet (verduurzaming). In 2050 wil Europa nog maar 20% van het CO₂-emissieniveau van 2005 uitstoten. Van deze Europese doelstelling zijn de Nederlandse beleidsambities afgeleid: in 2020 moet de CO₂-emissie 20% lager zijn dan in 2005 en 14% van het primaire energiegebruik moet gedekt worden door hernieuwbare bronnen.

Het proces van vraagbeperking en verduurzaming is ingrijpend en kan volgens deskundigen alleen langs de weg van geleidelijkheid worden doorgevoerd. De ingrijpende, maar geleidelijke verandering van de energievoorziening wordt energietransitie genoemd.

4.4.1 De energietransitie

Doel van de energietransitie is een energievoorziening die vrijwel volledig is gebaseerd op hernieuwbare bronnen. De huidige energiedragers worden dan uitsluitend nog gebruikt als grondstoffen voor duurzame (recyclebare) producten. Dit vergt een geleidelijke en structurele verandering van de energievoorziening. Het doeljaar voor realisatie van deze transitie is 2050. In dat jaar moet Europa een energievoorziening hebben die, zoals gezegd, nog maar 20% van de huidige CO₂-emissie uitstoot.

Een kenmerk van een transitionele verandering is de geleidelijkheid. Ook bij ingrijpende veranderingen van de energievoorziening is die geleidelijkheid cruciaal. Een omslag ineens is lastig omdat die bij deze omvang leidt tot zeer hoge kosten voor alle betrokkenen en op korte termijn tot grote negatieve effecten op de economie en mogelijk tot maatschappelijke onrust.

Ook al gaan beleidsmakers uit van een geleidelijke verduurzaming, de energietransitie is en blijft een proces met ambitieuze doelen. De omslag naar een houdbare energievoorziening vraagt om flinke aanpassingen op alle gebieden waar energie een rol speelt.

Uit vrijwel alle studies in het kader van de energietransitie blijkt dat overschakelen naar hernieuwbare energie alleen mogelijk is als gedurende dit proces fossiele brandstoffen beschikbaar zijn. Dat Nederland over een aanzienlijke hoeveelheid aardgas beschikt én over een uitstekende gasinfrastructuur, is hierbij dus een voordeel.

Omdat aardgas een relatief koolstofarme brandstof is, is het bij uitstek geschikt om de transitie naar een duurzame energievoorziening te ondersteunen en te versnellen. In de transitieperiode kan aardgas, gecombineerd met vérgaande isolatie en technologische innovatie, goede oplossingen bieden om aan de energiebehoefte in de gebouwde omgeving te voldoen. Intussen kan de inzet van duurzame energie steeds verder toenemen en kan de gasvoorziening zelf worden verduurzaamd door de geleidelijke introductie van groen gas.

4.4.2 Groen gas en de energietransitie

In de transitie naar een houdbare energievoorziening zullen ook andere gassen dan aardgas een rol spelen. Het gaat hierbij om gassen uit hernieuwbare energiebronnen (groen gas) en om schoon gebruik van fossiel aardgas (met name door middel van het afvangen en opslaan van CO₂, ofwel CCS).

De rol van GasTerra

GasTerra is een internationaal opererende handelsonderneming in aardgas. De onderneming is werkzaam op de Europese energiemarkt en heeft een belangrijk aandeel in de Nederlandse gasvoorziening. Daarnaast biedt GasTerra aan de gashandel gerelateerde diensten aan. De onderneming heeft meer dan 45 jaar ervaring in de in- en verkoop van aardgas.

Aardgas speelt een belangrijke rol in de innovatie van de energievoorziening. Moderne aardgastecnologie is de verbindende schakel tussen de huidige energievoorziening en een volledig duurzame energievoorziening in de toekomst. Daarom vindt GasTerra dat aardgas zo efficiënt mogelijk gebruikt moet worden. GasTerra wil zorgvuldig omgaan met de bestaande gasvoorraden en aardgas waar mogelijk combineren met alternatieve energiebronnen.

Fossiele brandstofvoorraden zijn eindig. Binnen veertig tot vijftig jaar moet de wereldeconomie overschakelen van fossiele brandstoffen op duurzame energie: biomassa, zonne-energie en windenergie. De komende decennia staan dan ook nadrukkelijk in het teken van de energietransitie: de geleidelijke overgang van (bijna) volledig fossiel naar (bijna) volledig duurzaam. Aardgas speelt hierin een belangrijke rol als betrouwbare, flexibele, efficiënte en relatief schone energiedrager. Aardgas is daarmee bij uitstek de energiebron om de inzet van duurzame bronnen te ondersteunen. Ook kan aardgas fungeren als drager voor het bijmengen van biogas of waterstof, waardoor de gasvoorziening zelf geleidelijk verduurzaamd wordt. GasTerra investeert daarom voortdurend in de ontwikkeling van innovatieve gastoepassingen met steeds hogere rendementen, zoals micro-wkk, gaswarmtepompen en hybride warmtepompen. Ook investeert GasTerra in onderwijs en onderzoek op het gebied van duurzame energie en energietransitie. Aan de rol van aardgas in het proces van energietransitie is in de boekenserie 'De wereld van aardgas' een apart deel gewijd.

Op dit moment is de aandacht vooral gericht op groen gas. Groen gas is een verzamelbegrip voor brandbaar gas van aardgaskwaliteit. Het wordt onder meer gewonnen uit biomassa en kan worden gemengd met aardgas, om zo het gebruik van aardgas geleidelijk te verduurzamen. Het is daarbij overigens van groot belang dat de biomassa die wordt gebruikt voor gasproductie niet concurreert met de voedselproductie in de wereld. Het zal dus vooral moeten gaan om biomassa die als afvalproduct overblijft bij de voedselproductie. Nederland loopt momenteel (2011) voorop in de bijstook van biobrandstoffen in elektriciteitscentrales. Er zijn twee belangrijke technieken voor de productie van groen gas: vergisting en vergassing.

Vergisting

Bij vergisting worden koolhydraten in de biomassa door micro-organismen omgezet in onder meer methaan. Hoewel de technologie van vergisting commercieel wordt aangeboden, wordt ze nog verder doorontwikkeld.

Een gemiddelde industriële vergistingsinstallatie heeft een capaciteit van 100 tot 150 Kton biomassa per jaar en een biogasproductie van 10 tot 18 miljoen Nm³ per jaar. Hieruit kan netto (na aftrek van het eigen verbruik) 6,5 tot 8,5 miljoen Nm³ per jaar aan groen gas worden geproduceerd.

Onderzoek van het vergistingsproces richt zich met name op het conversierendement. Door de biomassa voor te behandelen met verhoogde druk of verhitting en door toepassing van ultrasoon geluid tijdens de vergisting lijkt een hoger rendement mogelijk. Een verlaging van de proceskosten is mogelijk door het toepassen van nieuwe reactortypen en door niet-vergistbaar materiaal zo vroeg mogelijk af te scheiden.

Vergassing

Vergassing van biomassa is een conversieproces waarbij een vaste brandstof bij hoge temperatuur wordt omgezet in een brandbaar gas. Als oxidator wordt een beperkte hoeveelheid zuurstof, lucht of stoom toegevoerd. Het resultaat is een gas dat bestaat uit onder meer koolmonoxide, kooldioxide, waterstof en methaan. De exacte samenstelling van het gas is afhankelijk van de samenstelling van de brandstof en van de procesomstandigheden. De productie van methaan uit bruinkool is bewezen technologie. Vergassing van biomassa is echter nog in ontwikkeling.

Beleidsambities groen gas

De Nederlandse en Europese ambities voor de invoering van groen gas zijn hoog. In 2003 heeft de Europese Commissie haar lidstaten al verplicht om andere leveranciers op het aardgasnet toe te laten. In Nederland zijn recent onder meer de Stichting Groen Gas en het Platform Nieuw Gas opgericht om de opschaling van groen gas te begeleiden en te stimuleren. Het platform is onderdeel van de Nederlandse Transitie Paden, die ingesteld zijn om de Nederlandse energievoorziening te innoveren en te verduurzamen. Hierbij zijn onder meer Agentschap NL en ECN betrokken. Daarnaast wordt momenteel gewerkt aan de certificering van groen gas, naar analogie van de certificering van groene stroom.

4.4.3 Plaats van aardgas in de toekomstige energievoorziening

Als gevolg van de energietransitie krijgt aardgas een andere rol in de energievoorziening. De mogelijkheden om over te schakelen op een volledig duurzame energievoorziening lopen sterk uiteen voor de verschillende sectoren van de economie. De gebouwde omgeving is een van de sectoren waar verduurzaming relatief snel kan gaan. De technologie is grotendeels voorhanden. In principe kan de gebouwde omgeving na afloop van de transitieperiode grotendeels op hernieuwbare energie functioneren. Nieuwbouwwoningen moeten vanaf medio 2020 al volledig energieneutraal zijn. Tegelijkertijd kan in de bestaande bouw het aardgasverbruik ook drastisch dalen, onder meer door isolatie en door verhoging van de energie-efficiëntie (micro-wkk, warmtepompen, thermische zonne-energie en zon-PV). Aardgas kan bovendien deels worden vervangen door groen gas.

Een volledig duurzame energievoorziening in de gebouwde omgeving vereist dat de sector uiteindelijk overgaat op volledig duurzaam groen gas, op duurzame warmte en op elektriciteit die ook volledig duurzaam is opgewekt. Aardgas kan daarbij dienen als back-up.

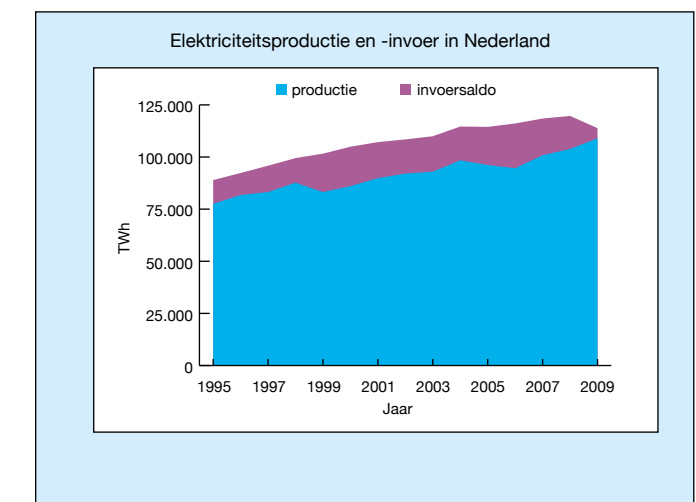
4.4.4 Verduurzaming van de elektriciteitsproductie

Ondanks alle besparingsprogramma's blijft in Nederland de vraag naar elektriciteit toenemen. Ook als we ervan uitgaan dat de komende twintig jaar steeds meer duurzaam geproduceerde elektriciteit beschikbaar komt, zal er een grote vraag overblijven die nog niet gedekt kan worden door duurzame bronnen.

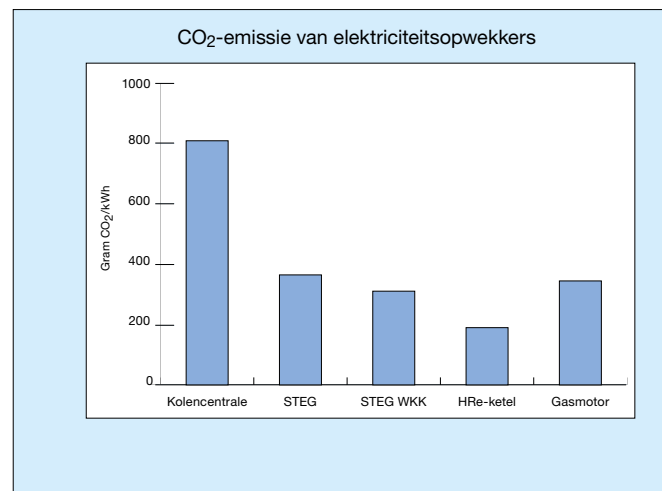
Kolenvergassing

Een mogelijkheid die in Nederland nog weinig aandacht krijgt, is de productie van gas uit steenkool. Van steenkool zijn wereldwijd nog zeer grote voorraden beschikbaar. De productie van gas uit steenkool is echter geen CO₂-vrij proces. Dat is het wel wanneer uit het kolengas waterstof wordt gemaakt én wanneer de vrijkomende CO₂ wordt opgeslagen. In het proces van energietransitie kan deze technologie een zinvolle toevoeging zijn aan het arsenaal van schonere technologieën.

Elektriciteit geproduceerd uit aardgas is relatief schoon, vergeleken met elektriciteit die geproduceerd wordt uit steenkool (zie ook figuur 13 op pagina 52). Gasgestookte STEG-centrales liggen met een rendement van ruim 45 tot 50% (op bovenwaarde, inclusief het transport naar de afnemer) duidelijk boven het landelijk gemiddelde opwekrendement van 39%. Ook dragen gasgestookte centrales door hun flexibele inzetbaarheid bij aan de inpassing van grootschalige windenergie. Het rendement van de huidige kolencentrales ligt onder dit gemiddelde.



Figuur 12 Elektriciteitsproductie en invoersaldo in Nederland.
Bron: IEA



Figuur 13 CO₂-emissie van diverse vormen van elektriciteitsopwekking. Bron: CBS

Ondanks de relatieve voordelen van gasgestookte elektriciteitsproductie moet het aandeel van hernieuwbare bronnen in de elektriciteitsproductie de komende decennia fors toenemen. Centrales kunnen daarvoor geheel of gedeeltelijk overschakelen op biomassa. Daarnaast leveren windparken, solitaire windmolens, fotovoltaïsche zonne-energie (zon-PV) en andere decentrale opwekkers een groot deel van de basislast. Het huidige windmolenpark op land en op zee zal nog aanzienlijk worden uitgebreid.

4.5 De kosten van energie

Energie is in onze samenleving decennialang relatief goedkoop geweest. De transitie naar hernieuwbare energie is economisch gezien dan ook een complexe aangelegenheid. Een duurzame energievoorziening, die volledig onafhankelijk is van fossiele brandstoffen, gaat gepaard met grote investeringen en hogere kosten voor energie. Maar ook zonder energietransitie zouden de kosten voor energie de komende decennia sterk stijgen als gevolg van intredende schaarste.

In Nederland is de aardgasprijs sinds jaar en dag gekoppeld aan de olieprijs. Hoewel deze koppeling de laatste jaren minder sterk is, zal de verwachte structurele stijging van de olieprijs op de wereldmarkt de aardgasprijs in ons land verder omhoog stuwten. Het is niet uitgesloten dat de prijs van aardgas voor Nederlandse

huishoudens daardoor in de periode tussen 2010 en 2020 zal verdubbelen. Dit zal enerzijds leiden tot hogere woonlasten voor burgers. Anderzijds zal een prijsstijging stimulerend zijn voor vraagreductie en toepassing van hernieuwbare bronnen.

Ook de kosten van elektriciteit zullen stijgen als gevolg van hogere grondstoffenprijzen. Hier doet zich het effect voor dat hernieuwbare energie rond 2015 goedkoper aangeboden kan worden dan conventioneel geproduceerde elektriciteit. Al met al is de kostenontwikkeling van energie in Nederland nog zeer onzeker.

Wereldwijd wordt voor de komende tien jaar een ruim aanbod van LNG verwacht. Dit kan de stijging van de aardgasprijs dempen of zelfs ombuigen naar een prijsdaling. Het tempo waarmee landen als China, India en Brazilië steenkool gaan vervullen voor aardgas, is van grote invloed op de prijsontwikkeling van de verschillende energiebronnen. ■

Hoofdstuk 5

Onderdelen van het verwarmingssysteem

In de moderne Nederlandse samenleving is de beschikbaarheid van warmte vanzelfsprekend. De kraan opendraaien volstaat om warm water te krijgen en als de kamerthermostaat goed is ingesteld, blijft het huis in de winter vanzelf behaaglijk warm. Een enkele keer, bij jaarlijks onderhoud of een storing, krijgt de bewoner even te maken met de techniek achter de warmte. De volgende hoofdstukken laten zien hoe verwarmingssystemen werken. Dit hoofdstuk geeft een algemene beschrijving van de componenten waaruit een systeem voor centrale verwarming en warm water is opgebouwd.

5.1 Bouwstenen van het verwarmingssysteem

In veel verwarmingssystemen, hoe verschillend ook van aard, zijn de volgende zes functionele bouwstenen aan te wijzen:

De energiebron

De basis voor verwarming is altijd een energiebron. Vaak wordt aardgas gebruikt, maar ook elektriciteit is een mogelijkheid. Externe warmtebronnen komen ook voor. Denk bijvoorbeeld aan zonne-energie, buitenlucht, restwarmte of warmte die is opgeslagen in de bodem.

Conversie (warmteproductie)

Uit de energiebron moet warmte worden gemaakt en vervolgens worden overgedragen aan een geschikt medium, meestal water. Aardgas wordt verbrand, zonne-energie moet door een collector worden opgevangen en opgeslagen, bodemwarmte

(of warmte in de omgevingslucht) wordt door een warmtepomp van een lage naar een hogere temperatuur 'opgepompt'. In de volgende hoofdstukken staat steeds een bepaalde conversietechniek centraal.

Opslag (de buffer)

Sommige systemen beschikken over een buffer waarin warmte kan worden opgeslagen. Dat is nuttig om drie redenen. Ten eerste helpt een buffer om het tijdsverschil tussen de vraag naar warmte en het aanbod van warmte met elkaar in evenwicht te brengen. Zonnewarmte is bijvoorbeeld rond de middag in grote mate beschikbaar. De vraag naar warm water of ruimteverwarming is echter in het algemeen geconcentreerd in de ochtend en avond. Een boiler vat kan de zonnewarmte gedurende de dag opslaan, zodat die 's avonds of de volgende ochtend beschikbaar is. Gedurende het jaar treden ook variaties op in de vraag

naar ruimteverwarming. In de winter is er vanzelfsprekend een grotere warmtebehoefte dan in de zomer. Om warmte gedurende lange periodes te bufferen kan bodemopslag worden toegepast.

Een tweede reden om een buffer toe te passen is efficiëntie. Een buffer zorgt ervoor dat de warmteproductie gelijkmatig kan plaatsvinden. De warmtepieken worden uitgevlakt waardoor de opwekking kleiner en goedkoper kan worden uitgevoerd. Daarbij werkt bijvoorbeeld een HRe-ketel (zie hoofdstuk 7) het meest efficiënt als hij continu op een laag vermogen verwarmt. Voor de productie van warm tapwater is het daarom het beste om een boiler vat gedurende de dag langzaam met warm water te vullen.

De derde reden om een buffer toe te passen ligt in het verlengde van de tweede reden. Als de piekvraag naar warmte wordt afgevlakt, kan gekozen worden voor een kleiner systeem, wat economisch gunstig is en leidt tot minder grondstofverbruik. Gezamenlijk zorgen deze drie functies ervoor dat een buffer meer comfort levert door een snelle beschikbaarheid van warm water met een hoog debiet.

Transport en distributie

In de meeste verwarmingssystemen¹ is er een afstand tussen de productie van warmte en de plek waar die warmte gewenst is. Die afstand moet overbrugd worden. In het meest eenvoudige geval lopen warmwater- en verwarmingsleidingen van de ketel naar badkamer, keuken en radiatoren. Een complexer transportsysteem is nodig bij stadsverwarmingssystemen. Daar moet warmte getransporteerd worden van de energiecentrale naar een tussenstation op wijkniveau, daarna van het tussenstation naar de aangesloten woningen en vervolgens binnen de woningen van de meterkast naar de radiatoren en kranen.

Afgifte

Afgifte van warmte kan plaatsvinden op verschillende manieren: door middel van radiatoren, vloerverwarming, wandverwarming, luchtverwarming of convectoren. Convectoren worden vaak verzonken geplaatst, bijvoorbeeld verzonken in de vloer vóór een raampartij of schuifpui. Het effect van het afgiftesysteem op de totale efficiency van de verwarmingsinstallatie mag niet onderschat worden. Moderne radiatoren geven hun warmte veel beter af dan oude modellen. Met vloer- of wandverwarming is zeer efficiënte verwarming op een laag temperatuurniveau mogelijk.

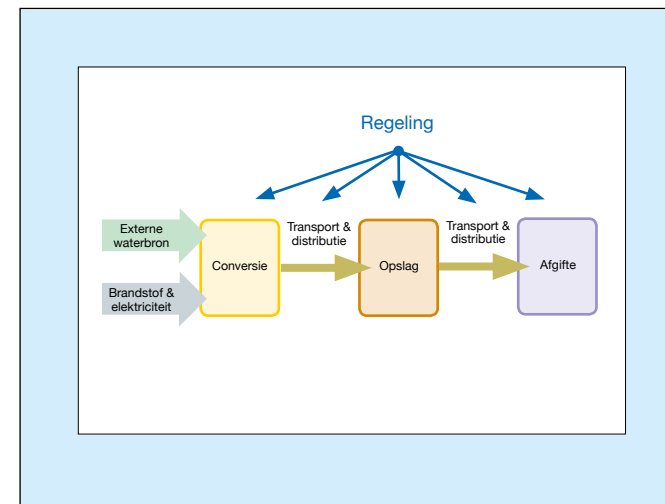
Regeling

Bij moderne systemen kunnen veel verschillende componenten betrokken zijn. Het instellen van de temperatuur is in nieuwe gebouwen bovendien vaak per vertrek mogelijk. De regeling van het verwarmingssysteem wordt dan ook steeds belangrijker. Zeker bij systemen die efficiënt zijn, luistert de regeling nauw; een fout in de afstelling leidt tot kostbaar energieverlies. Daarnaast zijn een goede regeling en aansturing essentieel om het systeem optimaal te laten functioneren in wisselende omstandigheden. Op het vlak van regeling en aansturing van installaties volgen de ontwikkelingen elkaar snel op. De gebruiker stelt bovendien steeds hogere eisen aan prestatie en gebruiksgemak van het totale verwarmingssysteem.

5.1.1 Bouwstenen in de praktijk

De onderstaande figuur geeft een schematisch overzicht van de bouwstenen van een verwarmingssysteem. Overigens komen de bouwstenen niet allemaal in ieder verwarmingssysteem voor. Verschillende systemen hebben hun eigen configuratie, zoals we ook in latere hoofdstukken zullen zien.

In de volgende paragrafen bekijken we de verschillende bouwstenen meer in detail.



Figuur 1 Bouwstenen van een verwarmingssysteem. De hier getoonde bouwstenen zijn niet in alle verwarmingssystemen aanwezig.

5.2 Distributie- en afgiftesystemen

De meest tastbare bouwsteen van een verwarmingssysteem is het afgiftesysteem. In bijna iedere Nederlandse woning zijn radiatoren te vinden. In recent gebouwde of gerenoveerde woningen wordt inmiddels steeds vaker gewerkt met vloer- of wandverwarming op een lage temperatuur. Deze verschillende opties zijn een essentieel onderdeel van het verwarmingssysteem. De keuze van het afgiftesysteem (een centraal of decentraal verwarmingssysteem, hoge- of lagetemperatuurafgifte) hangt nauw samen met de keuze van het conversiesysteem. Bij een warmtepomp bijvoorbeeld kan het rendement sterk verslechteren wanneer op een hogere temperatuur (meer dan ca. 50 °C) verwarmd wordt.

Geschiedenis

Tot aan de industriële revolutie bestond centrale verwarming in de huidige vorm nog niet. De 'oervorm' van verwarming is ook de eenvoudigst denkbare vorm: een vuurplaats waar de warmte direct werd afgegeven. Buiten de directe omgeving van het vuur bleef het koud. Al duizenden jaren geleden werden systemen ontwikkeld die het mogelijk maakten om warmte te transporteren van een centraal 'ketelhuis' naar vertrekken elders in het gebouw. Zo maakten bijvoorbeeld de klassieke Griekse en Romeinse beschavingen al gebruik van vloerverwarming. Een dergelijk hypocaustum² functioneerde relatief eenvoudig. Ieder verwarmd vertrek werd gebouwd op kleine pilaartjes van steen of tegels, zodat er een holle ruimte ontstond onder de vloer. Ook de muren van de vertrekken bevatten vaak holle ruimtes. Via een systeem van tunnels stonden alle vertrekken in verbinding met een stookruimte, van waaruit de hete rookgassen onder de vloeren en door de wanden kon stromen. Door spleten in het dak ontsnapten de hete gassen weer naar buiten. De regeling van een dergelijk systeem was vrij primitief: de ruimtes met de grootste warmtebehoefte lagen simpelweg dicht bij de stookruimte. Door het opstoken of temperen van het vuur kon de warmtetoevoer enigszins gereguleerd worden.

Het aanleggen van een hypocaustum was een dure aangelegenheid. Ook was veel geld nodig om personeel en brandstof voor de stookruimte te bekostigen. Deze vorm van centrale verwarming werd daarom alleen toegepast in villa's en badhuizen.

Na de teloorgang van het Romeinse rijk werd centrale verwarming op basis van warme lucht nauwelijks nog toegepast, al zijn er wel voorbeelden bekend van centrale verwarming in Europese kloosters en in het Arabische rijk.

Vanaf begin achttiende eeuw werden sporadisch centraleverwarmingssystemen op basis van warm water toegepast. Een van de bekendste gebouwen met een watervoerend systeem voor centrale verwarming is het zomerpaleis van tsaar Peter de Grote in Sint-Petersburg. Dit paleis werd gebouwd tussen 1710 en 1714.

5.2.1 Centrale verwarming of lokale warmteproductie?

Centrale verwarming is in veel gevallen zeer efficiënt. Omdat de opwekking van warmte centraal plaatsvindt, is maar één apparaat nodig. Dit spaart kosten en maakt het ook rendabel om te investeren in de efficiëntie van het toestel. Echter, als de transportafstanden in een gebouw te groot worden en de gebruikstijden relatief kort zijn, is centrale verwarming niet altijd de beste oplossing. In kantoorgebouwen wordt bijvoorbeeld meestal gewerkt met kleine elektrische keukenboilers voor warm water. Onder de gootsteen is dan een klein elektrisch apparaat aangebracht dat ter plekke warm water kan bereiden. De warmwaterbereiding is niet erg efficiënt, maar als gebruikgemaakt zou worden van lange leidingen voor de aanvoer



Figuur 2 Een hypocaustum werd in de klassieke beschavingen gebruikt om ruimtes te verwarmen door middel van hete rookgassen onder de vloer. Een open vuur in de ruimte was daardoor niet nodig. Foto: Shutterstock

Tijdens de industriële revolutie nam de toepassing van centrale verwarming een vlucht. Gietijzeren radiatoren en buizen kwamen op grote schaal beschikbaar en werden betaalbaar. Daarnaast werden steeds vaker grote woon- en werkgebouwen gebouwd, waardoor de behoefte aan centraleverwarmingssystemen groeide.

Tegenwoordig wordt in de meeste woningen gewerkt met een watervoerend cv-systeem. In bedrijfsgebouwen wordt vaak gebruikgemaakt van luchtverwarming, waarbij frisse lucht, koeling, verwarming en ontvochtiging allemaal worden geleverd vanuit centraal gestuurde luchtbehandelingssystemen.

van warm water, zou het energieverlies groter zijn. Bovendien kan een dure investering in leidingen worden voorkomen.

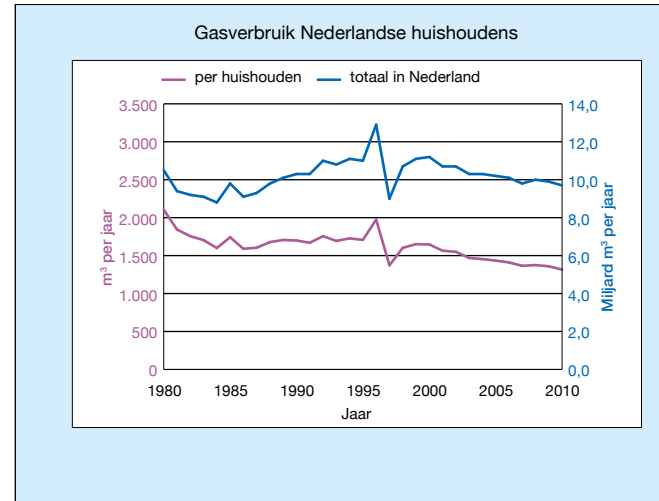
Ook in zeer grote ruimtes is centrale verwarming niet altijd de beste optie. In een fabriekshal of opslagruimte zijn vaak slechts enkele mensen aan het werk. Het verwarmen van de gehele ruimte zou zeer ineffectief zijn. Het is dan beter om kleine lokale systemen op basis van stralingswarmte te installeren, zoals infrarood-heaters. Hierdoor worden kostbare distributieverliezen vermeden.

In woningen is centrale verwarming bijna altijd de meest efficiënte optie om een gegeven warmtevraag in te vullen. Hierbij moet wel worden aangetekend dat de beschikbaarheid van centrale verwarming het gebruik van warmte in het algemeen groter heeft gemaakt, omdat vertrekken worden verwarmd die vroeger geen verwarming hadden. De opkomst van centrale verwarming heeft dus geleid tot een paradoxaal effect. De verwarmingsinstallatie zelf werd efficiënter, maar het gasverbruik per huishouden daalde niet evenredig. Daarbij komt het effect dat huishoudens geleidelijk steeds kleiner worden en er dus steeds meer huishoudens komen. Per huishouden is het gasverbruik vanaf eind jaren zeventig met circa één derde afgenomen, terwijl het aardgasverbruik van alle huishoudens gezamenlijk slechts licht daalde.

5.2.2 Afgiftesystemen voor hoge en lage temperatuur

Klassieke radiatoren zijn nog altijd het meest gebruikte afgiftesysteem in Nederlandse woningen. Door de radiatoren stroomt verwarmd water, dat zijn warmte afgeeft aan het metaal van de radiator. Dit metaal, meestal staal, geeft zijn warmte weer af aan de omgeving door straling. De lucht in de buurt van de radiator wordt warmer en zal via convectie haar warmte door de ruimte verspreiden. Voor maximale circulatie is een relatief hoge watertemperatuur nodig van zo'n 90 °C.

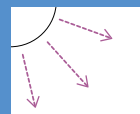
Bij moderne radiatoren is in het ontwerp vaak rekening gehouden met convectie. Slim vormgegeven radiatormodellen zorgen voor een optimale luchtstroming, zonder dat de warmte onder de vensterbank blijft hangen. Naast technische prestaties zijn esthetische overwegingen steeds belangrijker bij het ontwerpen van een radiator. Radiatoren zijn tegenwoordig verkrijgbaar in een grote variëteit aan vormen en kleuren.



Figuur 3 Het gasverbruik van Nederlandse huishoudens (blauwe lijn) is ongeveer gelijk gebleven in de periode 1980-2009. Per huishouden (rode lijn) daalde het verbruik met circa één derde. Bron: CBS, alle waarden gecorrigeerd voor buitentemperatuur

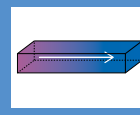
Straling, geleiding en convectie

Warmte kan zich op drie manieren verspreiden:



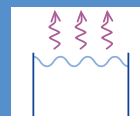
Straling

Door straling wordt warmte net als een lichtstraal verspreid over grote afstanden. De warmte die we voelen als de zon op onze huid schijnt, is hier een voorbeeld van.



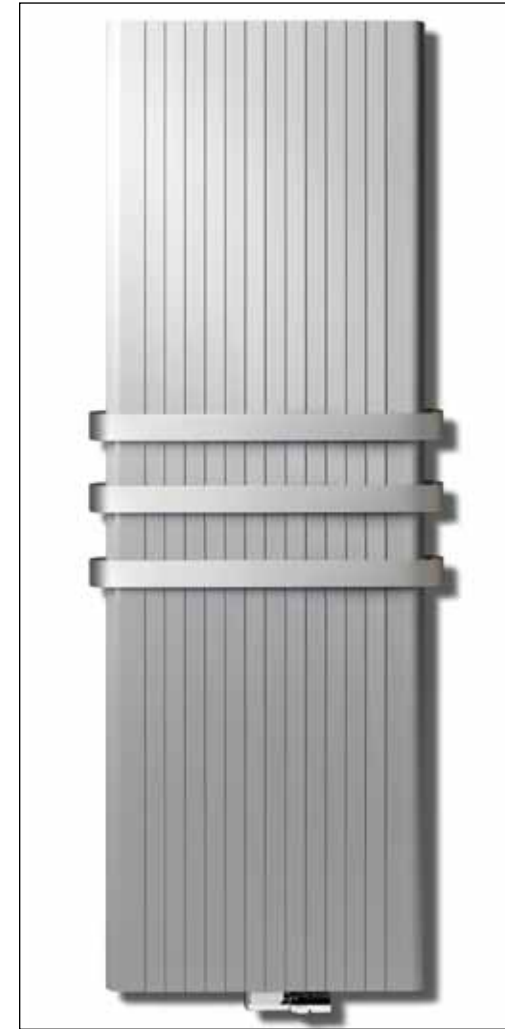
Geleiding

Bij geleiding verspreidt de warmte zich door een materiaal, doordat ieder gebiedje in het materiaal zijn energie doorgeeft aan de gebiedjes die er in de buurt liggen. Een voorbeeld van geleiding is het compleet warm worden van een naald als deze in een vlam wordt gehouden.



Convectie

De derde vorm van warmte transport is convectie. Warme vloeistoffen en gassen zetten uit en zijn daarom lichter dan hun omgeving en stijgen op. Hun warmte nemen ze dan mee. De warmteoverdracht vindt plaats door een combinatie van geleiding en stoftransport. Een voorbeeld hiervan is de opstijgende damp boven een pan kokend water.



Figuur 4 Een modern vormgegeven radiator. Foto: VASCO

Als het belangrijk is om een wand vrij te houden, bijvoorbeeld als een schuifpui aanwezig is, kan gebruikgemaakt worden van een convector. Een convector is een compacte radiator die verdiept in de vloer is aangebracht, in de convectorput. Stralingswarmte speelt geen rol in de verwarming, de opstijgende warme lucht zorgt voor de complete verwarming. De convectorput is herkenbaar aan het rooster dat over de put is aangebracht.



Figuur 5 Convectorput met radiator in een woning. Foto: TK Houten Vloeren

In moderne woningen wordt steeds vaker gewerkt met vloer- of wandverwarming. Deze verwarmingssystemen bevatten in het geheel geen zichtbare afgifteapparaten. De afgifte van warmte gebeurt door middel van watervoerende leidingen die in de vloer of in de wanden zijn verwerkt. De gehele oppervlakte van wand of vloer vormt zo een verwarmingselement.



Figuur 6 Een vloerverwarmingssysteem in aanbouw. Foto: Shutterstock

Naast de hierboven besproken afgiftemethodes kan warmte ook worden verspreid via luchtverwarming. Deze vorm van verwarming wordt in woningen echter nauwelijks meer toegepast en blijft in dit boek daarom buiten beschouwing.

Vergelijking tussen hoge- en lagetemperatuur afgiftesystemen

De warmteoverdracht van een afgiftesysteem hangt af van de temperatuur en van de oppervlakte. Een hoge temperatuur van de verwarming betekent veel warmteafgifte en hoe groter de oppervlakte, hoe

groter de warmteoverdracht. Een voordeel van de toepassing van vloer- of wandverwarming is dat de oppervlakte waardoor warmte wordt afgegeven veel groter is dan bij een radiator. Er kan daarom al met een relatief lage verwarmingstemperatuur voldoende warmte worden overgedragen aan de omgeving. Bij een lage verwarmingstemperatuur is een efficiëntere opwekking van warmte mogelijk. Naast een hogere efficiency zorgt vloerverwarming ook voor meer comfort: koude voeten behoren tot het verleden. Lagetemperatuurverwarmingssystemen worden dan ook steeds vaker toegepast.

Een extra voordeel van lagetemperatuurverwarming via vloer of wanden is dat het ook mogelijk is om te koelen als hier behoefte aan is. Als koud water door de vloer- of wandverwarming wordt gepompt, wordt voldoende koude afgegeven om het binnenklimaat aangenaam koel te houden. Bij compactere radiatoren of convectoren wordt de koude niet voldoende door de woning verspreid. Koeling is bij de traditionele hogetemperatuursystemen dan ook niet mogelijk.

Als laatste voordeel van lagetemperatuursystemen kan het afgifte-rendement worden genoemd. Radiatoren of convectoren zijn vaak aan buitenwanden of bij ramen geplaatst. Daardoor gaat direct bij de afgifte al een deel van de warmte verloren. Bij vloer- en wandverwarming is dit niet het geval en is het afgifte-rendement in het algemeen hoger.

Een nadeel van systemen met een lage afgiftetemperatuur is dat zij relatief traag reageren. Ten eerste moet het afgiftesysteem zelf op temperatuur komen. Dit duurt als gevolg van de grote oppervlakte langer dan bij een compact traditioneel systeem. Daarnaast moet ook de vloer of wand waarin het systeem is geïntegreerd op temperatuur komen. Met andere woorden, de thermische massa van het systeem is groot. Bij een lagetemperatuur afgiftesysteem zal het daarom in het algemeen langer duren voordat een woning op de gewenste temperatuur is.

5.2.3 Warmtetransport over grote afstanden

Bij stadsverwarming is sprake van transport van warmte vanaf het opwekpunt naar de woning. Dit transport vindt plaats door het stadswarmtenet. Vanzelfsprekend moeten de transportleidingen zeer goed geïsoleerd zijn om het warmteverlies te minimaliseren.

Daarnaast moet ook rekening gehouden worden met lektheid, uitzetting van de buizen door het warme water en de aanleg van systemen te midden van bestaande infrastructuur. Al met al zorgen stadsverwarmingssystemen voor enkele specialistische uitdagingen. Hoofdstuk 11 zal hier verder op ingaan.

5.3 Energieopslag voor woningen

Zoals eerder al werd opgemerkt, is opslag van warmte vaak noodzakelijk voor een efficiënte en comfortabele warmtevoorziening. Het is gebruikelijk om warmte op te slaan in water, maar er zijn ook alternatieven.

5.3.1 Water: de klassieke opslagmethode

Water is zeer geschikt voor het opslaan van warmte, omdat de warmtecapaciteit van water groot is. Dat betekent dat een klein volume water relatief veel warmte kan opnemen. Daarnaast is water algemeen beschikbaar, goedkoop, onbrandbaar en niet giftig.

Een boiler vat voor warm water is in vele huishoudens te vinden. Wanneer in een systeem ook duurzame energie gebruikt wordt, zoals zonne-energie, is een boiler zeker noodzakelijk. Duurzame warmte is immers niet altijd voldoende beschikbaar op het moment van de warmtevraag.



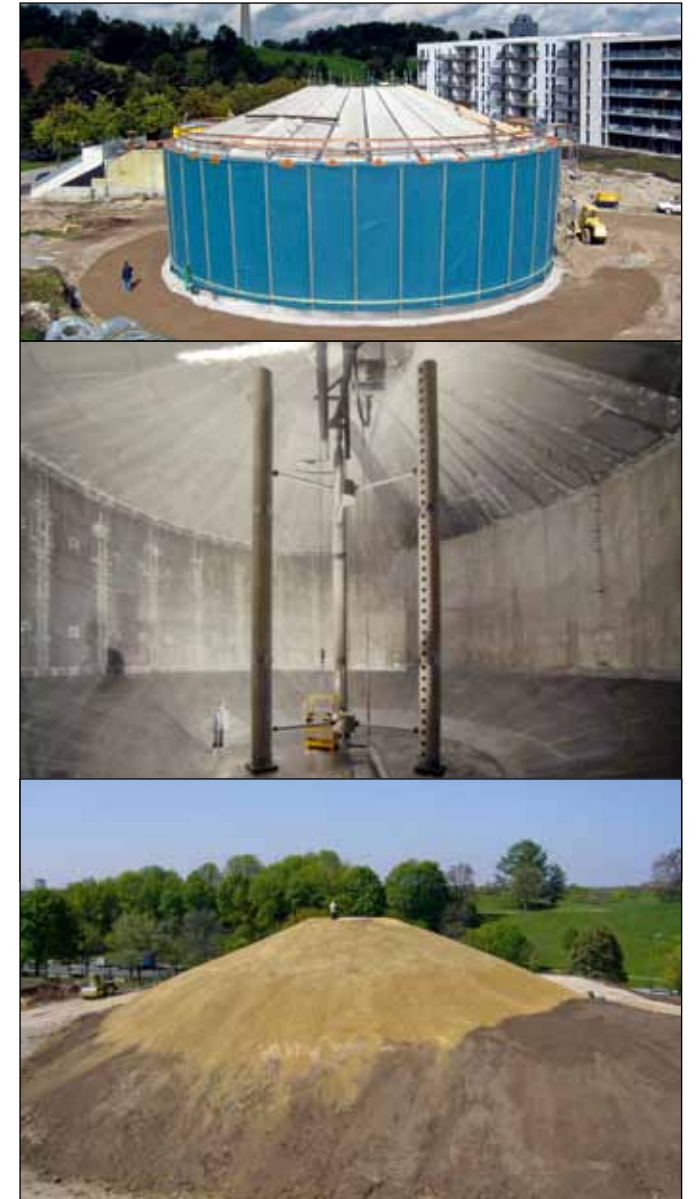
Figuur 7 Boiler vat voor de opslag van warm water. Foto: Shutterstock

Naast het ruimtebeslag van een buffervat, dat door bewoners als nadelig kan worden ervaren, is energieverlies het grootste obstakel bij het gebruik van water als opslagmedium voor energie. Het water en de metalen waarvan het opslagvat is gemaakt, hebben een hoge thermische geleidbaarheid: warmte wordt snel en efficiënt naar de omgeving afgevoerd. Dit is bij opslag zeer ongewenst: de warmte moet juist zo lang mogelijk worden vastgehouden. Om de verliezen beperkt te houden moeten opslagvaten daarom geïsoleerd worden. Een watergevuuld boiler vat is geschikt voor warmteopslag op korte termijn (enkele dagen tot hooguit enkele weken). Als opslag van warmte nodig is gedurende een flink deel van het jaar, is een opslagvat technisch lastig te realiseren. De dikke isolatie die nodig is om de verliezen te beperken, kan een probleem vormen. Een groter probleem is de hoeveelheid water die nodig is. Om voor een gemiddeld huishouden de jaarlijkse warmtebehoefte op te slaan, zijn enkele honderden kubieke meters water nodig! Er moet in geval van seizoensopslag dan ook zeer energiezuinig gebouwd worden, zodat de energievraag beduidend lager is dan gemiddeld. Ook moet er voldoende ruimte zijn om de opslagtank te bouwen. Bij een volledig duurzaam systeem is er bovendien ruimte nodig om bijvoorbeeld zonnewarmte in te vangen.

Ondanks de bovenstaande bezwaren zijn er projecten bekend waarbij water wordt ingezet voor grootschalige opslag van energie. Een geslaagd project werd in 2007 opgeleverd in de wijk Ackermannbogen in München. Een opslagvat met een inhoud van 6.000 m³ slaat gedurende de hele zomer zonnewarmte op. Deze warmte wordt in de winter gebruikt voor ruimteverwarming. Op deze manier dekt zonnewarmte bijna de helft van de totale warmtevraag in de woongebouwen. De opslagtank is in de wijk geïntegreerd door hem in een kunstmatige heuvel te verbergen.³ Een dergelijk grootschalig bufferproject is in Nederland nog niet gerealiseerd.

5.3.2 Bodemopslag: zomerwarmte 's winters gebruiken

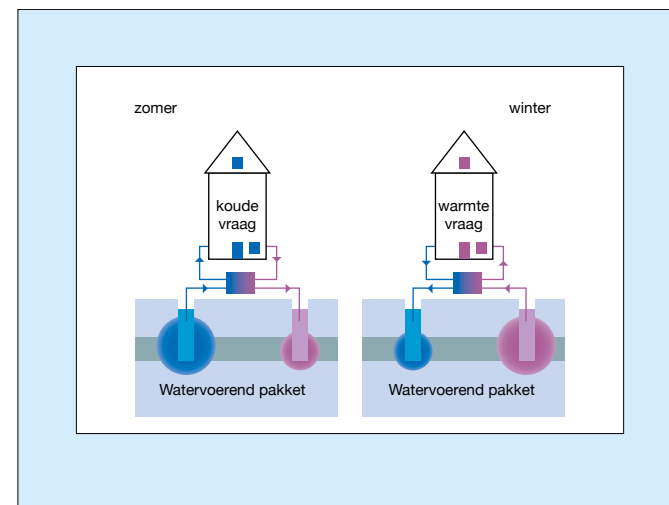
In de vorige paragraaf hebben we gezien dat opslag van warmte in water over langere periodes mogelijk is met voldoende isolatie en als er veel ruimte beschikbaar is. Het is lastig om opslagvoorzieningen te bouwen, maar in de ondergrond zijn zowel opslagruimte (waterdragende lagen, aquifers genoemd) als isolatie (niet-waterdoorlatende kleilagen) aanwezig. Wanneer gebruik wordt gemaakt van waterlagen in de bodem is seizoensopslag van warmte op veel locaties in Nederland mogelijk.



Figuur 8 In Ackermannbogen in het Zuid-Duitse München slaat een enorm watervat in de zomer zonnewarmte op. In de winter worden woonhuizen voor de helft van hun warmtevraag voorzien door de in het vat opgeslagen zonnewarmte. Foto's: Stadtwerke München

Het principe van wko (warmte- en koudeopslag in de bodem) is eenvoudig: in de zomer wordt het relatief koude water uit de bodem gebruikt om een gebouw te koelen. Warm water wordt op hetzelfde moment teruggepompt in de bodem. 's Winters is de situatie precies omgekeerd: warm water in de bodem wordt gebruikt om het gebouw te verwarmen en het afgekoelde water wordt weer teruggepompt de bodem in.

In de regel is de maximumtemperatuur van het water dat in de bodem wordt opgeslagen beperkt, want het water dat 's zomers wordt gebruikt om de woningen te koelen, is slechts beperkt opgewarmd voordat het in de bodem gepompt wordt. Daarnaast is het met het oog op de kwaliteit van het grondwater wettelijk niet zonder meer toegestaan om water op een temperatuur van meer dan 25 °C in de bodem op te slaan.



Figuur 9 Schematische weergaven van een wko-systeem.

5.3.3 Phase change materials

Inmiddels zijn materialen ontwikkeld die een radicaal andere aanpak van warmtebuffering mogelijk maken. In zogenoemde *phase change materials* (PCM's) kan relatief veel energie worden opgeslagen in een klein volume. Het principe van deze materialen is dat energie niet wordt opgeslagen door de temperatuur te verhogen, maar door een vaste stof te laten smelten.⁴ Als de warmte weer wordt afgegeven, stolt het materiaal en komt het terug in vaste toestand. De omgekeerde werking is ook mogelijk: door afkoeling

(bijvoorbeeld door 's nachts gebruik te maken van de afgekoelde buitenlucht) wordt het PCM vast. Overdag geeft het materiaal koeling af aan het gebouw en wordt weer langzaam vloeibaar.

Dit principe heeft twee voordelen. Ten eerste kunnen opname en afgifte van warmte plaatsvinden bij ongeveer dezelfde temperatuur. Het tweede voordeel is de grote opslagcapaciteit. Om een kilogram ijs te laten smelten is bijvoorbeeld net zoveel warmte nodig als voor het verwarmen van dezelfde hoeveelheid water van 0 naar 80 °C! In de fase-overgang van ijs naar water kan dus veel efficiënter energie worden opgeslagen dan in warm water. Water zelf is echter niet geschikt als PCM. De faseovergang tussen vast (ijs) en vloeibaar (water) vindt immers plaats bij 0 °C. Dit is geen geschikte temperatuur voor een verwarmingsinstallatie. Inmiddels zijn er verschillende PCM's ontwikkeld die een faseovergang hebben bij temperaturen die bruikbaar zijn voor verwarming of voor het reguleren van de gebouwtemperatuur.⁵ De ontwikkeling van nieuwe PCM's gaat nog steeds door.

Opslag in de bouwconstructie

Een slimme manier van warmteopslag is opslag in de bouwconstructie zelf. De bouw van speciale dag-nachtbuffers is dan niet meer nodig. Door slim materiaalgebruik (bijvoorbeeld met PCM's) kan de thermische massa van een gebouw worden vergroot. Het gebouw wordt dan minder gevoelig voor temperatuurschommelingen. Op een warme zomerdag loopt de temperatuur maar langzaam op, terwijl de invallende zonne-energie wordt gebufferd in de bouwconstructie. In de nacht, als het buiten kouder is, wordt de warmte weer langzaam afgegeven. Zo verbetert het comfort en wordt het minder vaak te warm. In de winter zorgt de grote thermische massa er juist voor dat het gebouw 's nachts niet te snel afkoelt, zodat 's ochtends minder gestookt hoeft te worden. Met behulp van PCM's is het mogelijk om relatief compacte warmtebuffers te bouwen die bruikbaar zijn voor individuele woningen of gebouwen. Deze compacte PCM-buffers werken goed op een tijdschaal van enkele dagen. Voor langdurige opslag van warmte is de capaciteit van PCM's onvoldoende.

5.3.4 Thermochemische opslag

De laatste opslagmogelijkheid die hier wordt besproken is thermochemische opslag in thermochemische materialen (TCM's). Thermochemische opslag maakt gebruik van het feit dat bij veel

chemische reacties warmte vrijkomt. Als het nu mogelijk is om een reactie te vinden die omkeerbaar is en waarbij veel warmte wordt geproduceerd, kan in principe energie worden opgeslagen.

$A + \text{warmte} \rightarrow B + C$	laden van buffer door A te splitsen met behulp van warmte
B en C gescheiden bewaren	opslag in de vorm van chemische energie
$B + C \rightarrow A + \text{warmte}$	vrijmaken van warmte door B en C te combineren

In de praktijk wordt vaak een reactie gebruikt waar een zout wordt gehydrateerd met waterdamp. Tijdens het laden van de buffer wordt een gehydrateerd zout gescheiden in puur zout en waterdamp. Om deze reactie te laten plaatsvinden is warmte nodig. Als er vraag naar warmte is, wordt waterdamp met het pure zout in aanraking gebracht waardoor het hydrateert. Hierbij komt warmte vrij.

Het grote voordeel van TCM's is dat een energiedichtheid kan worden bereikt die nog hoger is dan bij PCM's. Er is dus een relatief klein volume nodig om een grote hoeveelheid warmte op te slaan. Daarnaast kan de energie in principe zeer lang worden opgeslagen en is seizoensbuffering mogelijk. Deze mogelijkheid wordt momenteel in laboratoria onderzocht, maar is nog niet in de Nederlandse praktijk getest.

5.4 Regelingen

De regeling is een essentieel – en vaak onderbelicht – onderdeel van het warmtesysteem. Bij eenvoudige traditionele systemen kan worden volstaan met een relatief simpele regeling, maar bij moderne systemen wordt steeds meer gevraagd van de aansturing en van de coördinatie tussen de verschillende systeemonderdelen. Een extra uitdaging is het om de regeling voor een gebruiker simpel en bruikbaar te houden.

Kamerthermostaat

In veel woningen is het zichtbare deel van de regeling de kamerthermostaat, die op een centrale plek in de woning gemonteerd is. Meestal is dit de woonkamer. Kamerthermostaten van een ouder

type zijn mechanisch van opbouw: door middel van een bimetaal of een kwikschakelaar wordt de kamertemperatuur vergeleken met de ingestelde waarde. Als de ruimte op temperatuur is, wordt de installatie simpelweg uitgeschakeld. Er is geen modulatie van het verwarmingsvermogen mogelijk, de installatie is aan of uit.

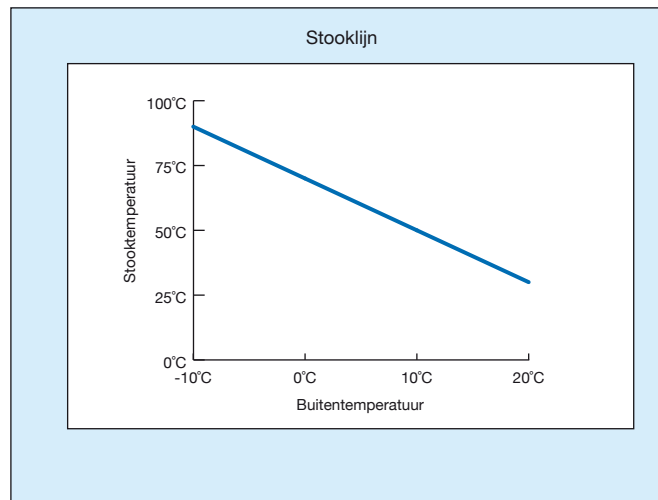
Het nadeel van een dergelijke simpele regeling is het optreden van *overshoot*, ofwel het doorschieten van de ruimtetemperatuur bóven de ingestelde waarde. In het verwarmingssysteem is immers op het moment van uitschakelen veel energie aanwezig in de vorm van warm water. Als de ketel wordt uitgeschakeld, wordt die warmte nog afgegeven aan de woning. Hierdoor loopt de temperatuur verder op dan gewenst.

Een zogeheten 'anticiperende' regeling lost het probleem van overshoot op door het aanbrengen van een minuscuul verwarmingselement in de regelthermostaat. Als de verwarmingsinstallatie ingeschakeld is, zal ook een kleine elektrische stroom door een metalen draadje lopen, waardoor de thermostaat lokaal iets warmer wordt dan de omgeving. Hierdoor schakelt de installatie eerder uit en wordt het overshooteffect minder voelbaar. Deze regeling werkt volledig op basis van de gemeten ruimtetemperatuur. Een dergelijke anticiperende regeling wordt tegenwoordig niet meer elektro-mechanisch gerealiseerd, maar door software in de regeling. Er bestaan ook zelflerende regelsystemen die de overshoot (en ander ongewenste effecten, zoals het te laat bereiken van een ingestelde temperatuur) waarnemen en vervolgens compenseren. Deze systemen regelen zichzelf na verloop van tijd steeds beter in.

Weersafhankelijke regeling en stooklijn

Een weersafhankelijke regeling is een logisch vervolg op de anticiperende regeling. Hierbij wordt niet alleen de binnentemperatuur gebruikt als signaal voor het aan- en uitschakelen, maar speelt ook de buitentemperatuur een rol in de regeling. Dit gebeurt door middel van het instellen van een zogeheten stooklijn. Een stooklijn is het verband tussen de gewenste aanvoertemperatuur van het cv-water en een bepaalde buitentemperatuur.

Als het buiten zeer koud is, is een hogere aanvoertemperatuur noodzakelijk om voldoende vermogen te kunnen leveren voor het warm houden van de woning. Als de buitentemperatuur hoger ligt – bijvoorbeeld in het voor- of naseizoen – volstaat een veel lagere



Figuur 10 Voorbeeld van een stooklijn. Als een stooklijn wordt toegepast, wordt de aanvoertemperatuur van het cv-systeem aangepast aan de buitentemperatuur. Bij hoge buitentemperaturen is het benodigde vermogen lager en kan de aanvoertemperatuur omlaag. De hier weergegeven stooklijn zou kunnen worden toegepast in een oude woning. In nieuwbouwwoningen kan ook bij lage buitentemperaturen volstaan worden met een lagere afgiftetemperatuur dan in de figuur. Bron: Energy Matters

verwarmingstemperatuur. Immers, als de buitentemperatuur niet al te laag is, zijn de warmteverliezen vanuit de woning beperkt en hoeft het cv-systeem ook maar een beperkt vermogen te leveren. Een lage aanvoertemperatuur geeft dan voldoende warmteoverdracht. Ook hier bestaan zelflerende systemen die bijvoorbeeld een ingestelde stooklijn automatisch corrigeren op basis van de gemeten ruimtetemperaturen.

Een lage aanvoertemperatuur heeft verschillende voordelen. Ten eerste is de opwekefficiëntie hierbij maximaal. Dit geldt onder meer bij warmtepompen, waar de efficiëntie omgekeerd evenredig is met het temperatuurverschil tussen de warmte-afgifte en de brontemperatuur. Hoe lager de afgiftetemperatuur is, hoe kleiner dit verschil wordt en hoe hoger de efficiëntie dus kan zijn (zie ook hoofdstuk 8). Ten tweede zorgt een lage aanvoertemperatuur ervoor dat de retourtemperatuur van het cv-water (dus nadat warmte in de woning is afgegeven) laag is. Dit effect is gunstig voor gas-gestookte toepassingen, zoals de HR-ketel. Bij een lage retourtemperatuur kan in condensend bedrijf de maximale hoeveelheid warmte aan het aardgas ont-

trokken worden (zie verder hoofdstuk 6). Een derde voordeel van een lage aanvoertemperatuur is dat de leiding-verliezen beperkt blijven. Hete leidingen verliezen namelijk veel meer warmte dan leidingen met een gematigde temperatuur.

Thermostaatkranen en zone-regeling

De centrale regeling beïnvloedt het vermogen dat de cv-installatie levert en de temperatuur waarbij dit gebeurt. Deze instellingen gelden echter in principe voor alle ruimtes die op het cv-net zijn aangesloten. Iedere radiator beschikt daarom over een afsluitkraan, die het mogelijk maakt om de watertoevoer te reduceren. Zo wordt voorkomen dat ruimtes onnodig worden verwarmd. In veel gevallen beschikken radiatoren over thermostaatkranen. Deze afsluiters kunnen zodanig worden ingesteld dat ze de watertoevoer reduceren als een ingestelde kamertemperatuur wordt bereikt. Zo is per ruimte een individuele regeling mogelijk. Moderne cv-regelingen beschikken vaak zelfs over de mogelijkheid om in iedere kamer via de thermostaat de gewenste temperatuur apart in te stellen. De thermostaatkranen van de radiatoren worden dan door de regeling ingesteld. Ook bij vloer- of wandverwarming kan op deze wijze de temperatuur per ruimte worden geregeld.

Combinaties van technieken

In moderne systemen vormt de regeling een steeds belangrijkere schakel. Een goede regeling kan ervoor zorgen dat het verwarmingssysteem storingsvrij en efficiënt werkt en maximaal comfort levert. Een simpele regeling volstaat in de meeste woningen niet meer. Alleen een geavanceerde aansturing kan het optimaal functioneren van een verwarmingssysteem garanderen. Steeds vaker zijn regelingen in staat om hun gedrag gaandeweg aan te passen aan de wensen van de gebruiker. Deze 'lerende' regelingen kunnen uiteindelijk tot op zekere hoogte de wensen van de bewoners voorspellen en hierop anticiperen.

Combinaties van opwekkers, zoals bijvoorbeeld een zonneboiler gecombineerd met een warmtepomp, vragen een complexe aansturing die rekening houdt met de warmtevraag, de weersomstandigheden, aanvoer en retour van grondwater, de technische eigenschappen van de warmteopwekking en de distributiesystemen, enzovoort. In de nabije toekomst zullen regelingen mogelijk zelfs rekening houden met de actuele energieprijzen, iets dat in zakelijke toepassingen nu al gebeurt.

5.5 Het kloppend hart: het conversiesysteem

5.5.1 Ontwikkelingen in de twintigste eeuw

In de twintigste eeuw zijn verwarmingssystemen ingrijpend veranderd. Tot na de Tweede Wereldoorlog werden veel woningen verwarmd met kolenkachels. Na de ontdekking van het aardgasveld bij Slochteren veranderde dit snel. Verwarming op aardgas werd de norm en de meeste woningen beschikten al snel over een keukengeiser waarmee in een handomdraai warm water kon worden gemaakt. Voor het verwarmen van de woning werden in eerste instantie gaskachels gebruikt, zoals een voorzethaard of een moederhaard.



Figuur 11 De opkomst van de keukengeiser zorgde voor gemak in de Nederlandse keukens. Foto: Archief Energy Matters

Labels voor verwarmingstoestellen

Omdat bijna alle Nederlandse huishoudens zijn aangesloten op het gasnet, beschikt Nederland over een grote en geografisch sterk geconcentreerde markt voor gasgestookte verwarmingsketels. Daarom is Nederland een vruchtbare bodem voor onderzoek naar en ontwikkeling van verwarmingsketels. De Nederlandse verwarmingsmarkt loopt duidelijk vóór op de rest van Europa bij het ontwikkelen van efficiënte fossiel gestookte verwarmingsinstallaties.

Om op de Nederlandse markt de prestaties van ketels goed te communiceren naar de gebruikers, is in 1994 het Gaskeurmerk ingevoerd, dat gebruikmaakt van verschillende labels.

Nagenoeg alle verwarmingsketels die op de Nederlandse markt verkrijgbaar zijn, beschikken over een Gaskeurlabel. Het bekendste is het HR-label, waarbij HR staat voor Hoog Rendement. Binnen het HR-label worden weer drie efficiency-klassen onderscheiden. De onderstaande lijst geeft een beknopt overzicht van de beschikbare Gaskeurlabels, aangevuld met enkele labels voor andere systemen.

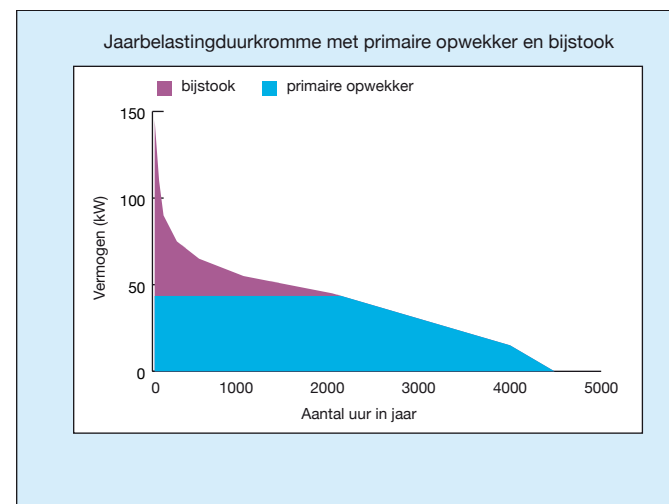
Gaskeur HR100	HR-ketel met ten minste 100% rendement op onderwaarde. ⁵
Gaskeur HR104	HR-ketel met ten minste 104% rendement op onderwaarde.
Gaskeur HR107	HR-ketel met ten minste 107% rendement op onderwaarde.
Gaskeur CW 1 t/m 6	Het Comfort Warmwater label garandeert in zes klassen een minimaal vermogen voor warm water.
Gaskeur HRWW	Hoog rendement bij de productie van warm water.
Gaskeur SV	Schonere verbranding met lage NO _x -uitstoot.
Gaskeur NZ	Toestel geschikt voor naverwarming van een zonneboiler.
Gaskeur HRe	Label voor micro-wk (hoofdstuk 7). Het equivalent rendement (warmte + elektriciteit omgerekend naar primaire brandstofinzet) is minstens 125%.
Zonnekeur	Kwalitatief hoogwaardige zonneboiler.
Ventilatiekeur	Kwalitatief hoogwaardige ventilatie.
Warmtepompkeur	Kwalitatief hoogwaardige warmtepomp.

Snel volgde de ontwikkeling van de cv-ketel. Met dit type ketel was het mogelijk om het hele huis te verwarmen. Deze eerste ketels waren echter nog niet geschikt voor de bereiding van warm water. Hiervoor was een combinatie van cv-ketel en opslagvat (boiler) nodig. Dit concept werd later doorontwikkeld tot de combiketel.

Technische verbeteringen (zie hoofdstuk 6) hebben ervoor gezorgd dat de efficiency van de cv-ketel sterk is toegenomen. Inmiddels wordt door een moderne HR-ketel ruim 90% (op bovenwaarde) van de energie-inhoud van het aardgas omgezet in nuttig bruikbare warmte.

5.5.2 Bivalente verwarmingssystemen

In moderne systemen komt het steeds vaker voor dat verschillende opwekkers samen worden ingezet om de warmtevraag in te vullen. In het algemeen is één systeem preferent (bijvoorbeeld een warmtepomp of micro-wkk) en wordt een ander systeem gebruikt als bijstook. Gezamenlijk vullen de systemen de complete warmtevraag in. Een belangrijk principe bij combinaties van concepten is dat de geavanceerde, energiebesparende component, die vaak duur is, niet te groot moet zijn en veel draaiuren maakt (basislast). Een goedkopere, minder efficiënte component kan dan de pieklast leveren.



Figuur 12 Voorbeeld van een jaarbelastingduurkromme. Bron: Energy Matters

In figuur 12 is een voorbeeld gegeven van een zogeheten jaarbelastingduurkromme (BDK) voor ruimteverwarming. Een groot gedeelte van het jaar is de vraag naar ruimteverwarming zeer klein. Slechts gedurende een korte periode is een groot vermogen nodig, bijvoorbeeld om bij hevige winterkou de woning warm te houden. Uit het onderstaande plaatje blijkt dat in dit voorbeeld een vermogen van 30% van het maximaal benodigde vermogen al 80% van de totale warmtevraag kan dekken.

De verhouding tussen het vermogen van de preferente opwekker en het totaal benodigde vermogen wordt de β -factor genoemd. Voor een gemiddeld huishouden is voor iedere β -factor bekend welk deel van de totale warmtevraag (voor ruimteverwarming) wordt gedekt door de preferentie installatie (de zogeheten dekingsgraad). De rest moet door de secundaire opwekker (de bijstook) worden geleverd. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de dekingsgraad voor verschillende waarden van de β -factor.

5.6 Vergelijken van verwarmingssystemen

Ruim een halve eeuw geleden leidde de ontdekking van het aardgas een vérgaande verandering in van de manier waarop in Nederland

β -factor	Dekingsgraad	
	Woningen met individuele installatie	Overige gebouwen en installaties
0,00	0,00	0,00
0,05	0,15	0,12
0,10	0,30	0,25
0,15	0,43	0,35
0,20	0,55	0,48
0,30	0,75	0,79
0,40	0,85	0,91
0,50	0,95	0,92
0,60	0,98	0,94
0,70	1,00	0,95
0,80	1,00	0,97
0,90	1,00	0,98
1,00	1,00	1,00

Tabel 1 Dekkingsgraad (aandeel van de preferente opwekker in de warmtevraag voor ruimteverwarming) als functie van de β -factor. Bron: EPG-norm (NEN 7120:2011)

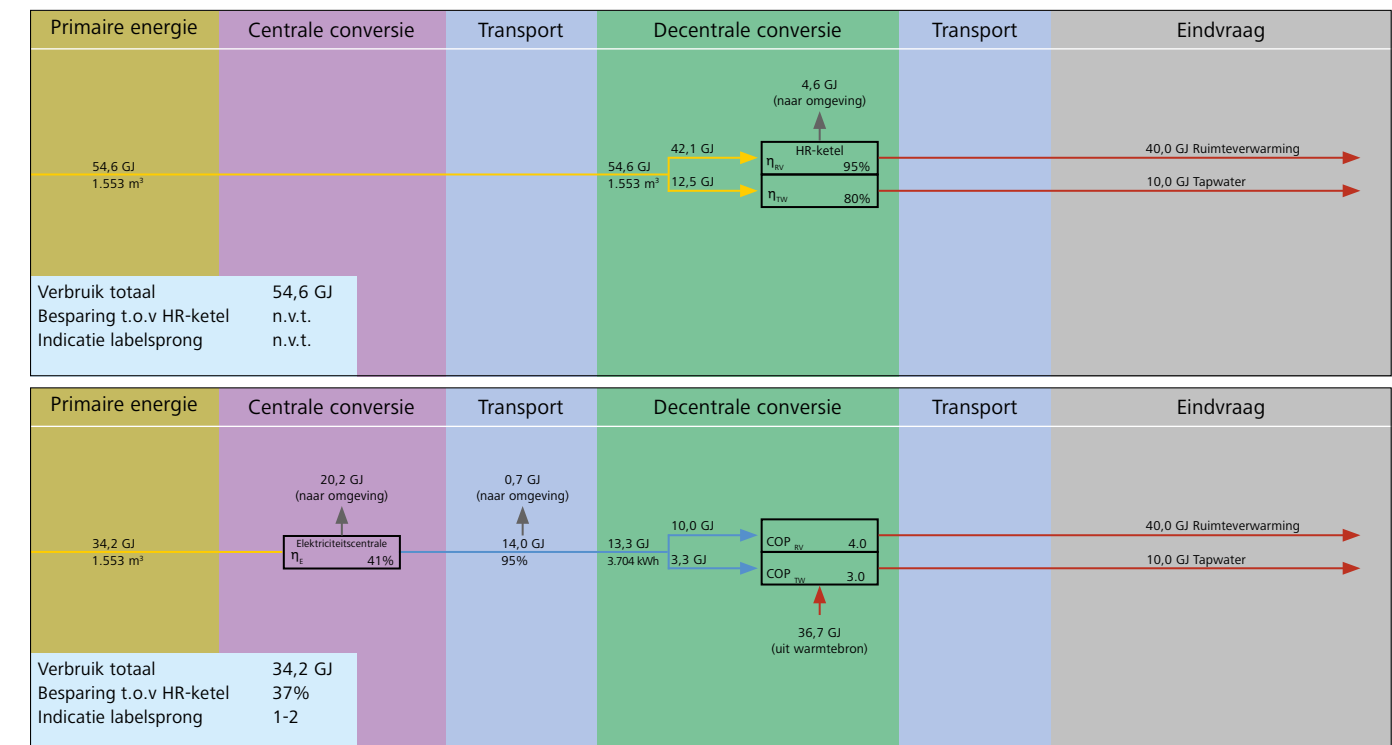
woonhuizen werden verwarmd. In feite speelt zich momenteel weer zo'n ingrijpend veranderingsproces af. Strengere eisen aan duurzaamheid en energiezuinigheid gaan hand in hand met de ontwikkeling van steeds slimmere technieken. De HR-ketel wordt opgevolgd door nieuwe oplossingen: Stirlingmotor, warmtepomp, brandstofcel, zonnewarmte, CO₂-neutrale systemen op wijkniveau...

De lijst met mogelijkheden is lang. De vraag werpt zich op hoe we deze systemen op een zinvolle manier met elkaar kunnen vergelijken. Alle systemen hebben hun eigen voor- en nadelen op het gebied van milieubelasting, efficiency, installatiegemak, betrouwbaarheid, gebruiksvriendelijkheid en kosten.

In de volgende hoofdstukken worden verschillende verwarmingssystemen beschreven. De genoemde voor- en nadelen zullen per

technologie in kaart worden gebracht. Om de efficiency van de technologieën te kunnen vergelijken, wordt in dit boek consequent gebruikgemaakt van energiestroomdiagrammen.

De energiestroomdiagrammen beginnen met de uiteindelijke vraag naar ruimteverwarming en warm water aan de uiterste rechterkant. We nemen in het gehele boek aan dat er een behoefte is van 40 GJ ruimteverwarming en 10 GJ tapwater per jaar. Voor een uitgebreidere discussie, zie hoofdstuk 3. Bij iedere stap wordt bekeken hoe groot de efficiency van de omzetting of het transport is, waarmee uiteindelijk aan de linkerkant de totale behoefte aan primaire energie bepaald wordt. Energie wordt voortdurend omgezet tussen brandstof (geel gekleurd), elektriciteit (blauw) en warmte (rood). Verliezen zijn met grijze pijlen aangegeven.



Figuur 13 Energiesroomdiagram van een HR-ketel (boven) en een warmtepomp (onder). Van links naar rechts zijn de verschillende stappen weer gegeven die van primaire energie uiteindelijk ruimteverwarming en warm water maken.

Alle berekeningen worden uitgevoerd op basis van de bovenste verbrandingswaarde van aardgas (kortweg 'op bovenwaarde'). Bij het bepalen van de efficiency is steeds uitgegaan van getallen die typerend zijn voor de betreffende technologie. Hierbij speelt altijd een zekere mate van willekeur mee. Er zijn immers zoveel verschillende apparaten op de markt dat het nauwelijks mogelijk is om algemeen geaccepteerde waarden te vinden. Voor de meeste waarden zijn daarom ronde getallen gekozen. Voor de efficiency van centrale elektriciteitsproductie zijn de waarden uit de gangbare norm voor de energieprestatie van gebouwen (de EPG-norm, ofwel de NEN 7120) gehanteerd.⁷ Deze norm geeft 39% op bovenwaarde als gemiddelde efficiency voor centrale elektriciteitsproductie, de transportverliezen meegerekend. ■

Hoofdstuk 6

De huidige standaard: de HR-ketel

Voor alle energiebesparende technieken voor woningverwarming fungeert in dit boek (en meestal ook elders) de gasgestookte verwarmingsketel als referentiesysteem. Meer in het bijzonder gaat het hier om de HR107-ketel. De HR107-ketel is vrijwel het beste wat bereikt kan worden op gebied van verwarmingsketels. 'Vrijwel' omdat er bij de productie van warmte uit aardgas een natuurlijke bovengrens is aan het rendement, namelijk 100%. Die grens benadert de HR107-ketel al heel dicht: 96,3% (voor ruimteverwarming). De techniek is in hoge mate uitontwikkeld. Recente innovaties betreffen vooral verbetering van tapwaterrendement en reductie van hulpenergie.

6.1 De verbrandingswaarde van aardgas

Bij de verbranding van gassen en gasmengsels die uit koolwaterstoffen bestaan, waar dus koolstof (C) en waterstof (H) in voorkomen, ontstaan kooldioxide en water. Dit water heeft in dampvorm een veel hogere energie-inhoud dan in gecondenseerde vorm.⁸ In de oudste definitie van verbrandingswaarde [Gasunie, 1980] is het laatste woord dan ook erg belangrijk:

*De calorische onderwaarde H_i is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de volledige verbranding van een gegeven hoeveelheid droog gas met zuurstof, als de verbrandingsgassen weer naar de beginwaarden worden afgekoeld. Het bij de verbranding gevormde water bevindt zich na de afkoeling in de **gasfase**.*

Deze definitie is in de energietechniek lange tijd gehanteerd. Tot de introductie van de HR-ketel werden, om corrosie te voorkomen, ketels zelfs expliciet ontworpen op het niet-condenseren van rookgassen. Bij elektriciteitscentrales is de calorische onderwaarde nog steeds in zwang.

Als we van een ketel een rendement bepalen, rekenen we het quotiënt uit van de geleverde warmte en de energie die in de verbruikte hoeveelheid aardgas aanwezig is. Als we daarbij de calorische onderwaarde H_i nemen, krijgen we het zogenaamde 'rendement op onderwaarde' van de ketel. Dat rendement is 100% als we een warmte-output zouden meten die gelijk is aan de energie-inhoud van het verbruikte aardgas, bepaald op basis van de calorische onderwaarde.

Echter, de verbrandingswarmte van aardgas is geen hard fysisch gegeven, maar een waarde die we eraan toekennen op basis van bovenstaande definitie van H_i . Toen in de jaren zeventig van de vorige eeuw het condenseren van rookgassen als innovatie zijn intrede deed, deed zich een merkwaardig verschijnsel voor. Wanneer de rookgassen in een ketel condenseren en de condensatiewarmte benut kan worden, kan het rendement boven de 100% uitkomen. In de term HR107 is dat nog te zien: 107 verwijst naar een rendement (107% of hoger) dat bepaald is op basis van de calorische onderwaarde van aardgas.

Het rendement is meer dan 100% omdat we bij de verbranding van aardgas in een condenserende ketel meer warmte uit het aardgas kunnen halen dan we erin aanwezig veronderstelden via de definitie van de onderste verbrandingswaarde H_i .

Vooraf in de wetenschappelijke wereld ontstond weerstand tegen een rendement van meer dan 100%. Als reactie werd de 'calorische bovenwaarde H_s ' gedefinieerd, waarbij alleen het laatste woord verschilt van de definitie van H_i [Gasunie, 1980]:

De calorische bovenwaarde H_s is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de volledige verbranding van een gegeven hoeveelheid droog gas met zuurstof, als de verbrandingsgassen weer naar de beginwaarden worden afgekoeld. Het bij de verbranding gevormde water bevindt zich na de afkoeling in de vloeistoffase.

Hiermee wordt de aan het aardgas toegekende verbrandingswaarde groter, waardoor het zogenaamde 'rendement op bovenwaarde' lager uitkomt. Het rendement op bovenwaarde van een HR107-ketel komt uit op 96,3%.

Principieel maakt het niet uit of we rekenen met de onderste of de bovenste verbrandingswaarde. Wel is het belangrijk consequent zijn en te blijven bij een eenmaal gemaakte keuze; ook moet die keuze altijd expliciet worden vermeld. In figuur 1 is voor één en dezelfde HR-ketel aangegeven hoe het hanteren van de onderste en bovenste verbrandingswaarde uitpakt.

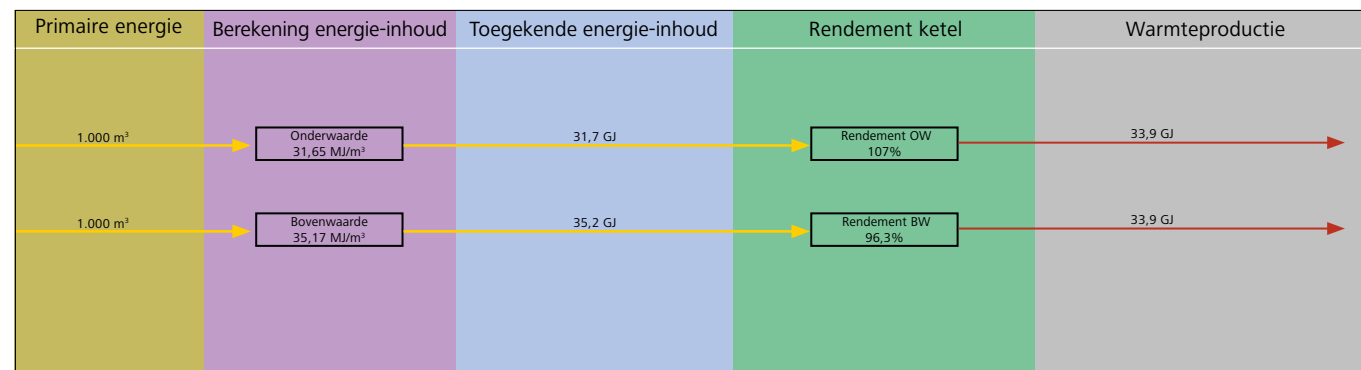
In de figuur zijn ondermeer de waarden van H_i en H_s gegeven voor Gronings aardgas [Gasunie, 1980]:

$$H_i = 31,65 \text{ MJ/m}^3$$

$$H_s = 35,17 \text{ MJ/m}^3$$

Hiermee wordt $H_i / H_s = 0,900$. Het rendement op bovenwaarde is dus altijd zo'n 10% kleiner dan het rendement op onderwaarde. De apparaten zelf worden hierdoor niet beter of slechter. In beide gevallen in figuur 1 zijn de geleverde warmte (33,9 GJ) en de gebruikte hoeveelheid aardgas (1000 m³) hetzelfde. Het zijn twee manieren van rekenen, op basis van dezelfde metingen.

In dit boek wordt gewerkt met de bovenste verbrandingswaarde van aardgas en dus ook met rendementen op bovenwaarde, tenzij uitdrukkelijk anders aangegeven.



Figuur 1 Evaluatie van een HR107-ketel via de onderste en bovenste verbrandingswaarde.

6.2 De ontwikkeling van de HR-ketel

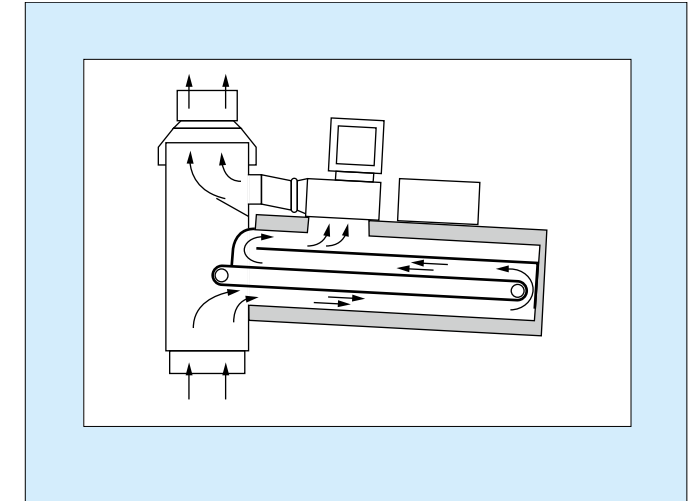
De opkomst van het aardgas viel in Nederland vrijwel samen met de snel toenemende populariteit van centrale verwarmingssystemen. Vóór de introductie van het aardgas waren cv-systemen gestookt op hout, steenkool of huisbrandolie een grote luxe. Vanaf de jaren zestig werden nieuwe en bestaande woningen echter in hoog tempo voorzien van cv-installaties. Olie- en kolenketels ruimden het veld voor gasgestookte ketels. Aardgastechnologie had al snel de naam schoon, betrouwbaar en relatief efficiënt te zijn. Bovendien was er een aanzienlijk ontwikkelingspotentieel. De efficiëntie van cv-ketels nam in de loop der jaren met tientallen procentpunten toe.

6.2.1 Conventionele cv-ketels

Conventionele verwarmingsketels zijn in Nederland geïnstalleerd vanaf het moment dat aardgas beschikbaar kwam. Het zijn eenvoudige aardgastoestellen die als warmtebron dienen voor cv-systemen in woningen. Cv-ketels werden niet gebruikt voor het verwarmen van tapwater. Hiervoor werden geisers gebruikt, kleine gastoestellen met een relatief groot piekvermogen en een warmte-wisselaar die was ontworpen om in korte tijd een relatief kleine hoeveelheid stromend water te verhitten.

Het branderblok van een conventionele ketel is van gietijzer en bestaat uit een aantal nozzles, waar het aardgas met constante snelheid uitstroomt. De nozzles zijn zo geconstrueerd dat het uitstromende aardgas ook de verbrandingslucht vanuit de woning aanzuigt. Deze ketel is dus open. Hij is voorzien van een trekonderbreker. Omdat de hoeveelheid verbrandingslucht niet nauwkeurig regelbaar is, werkt een conventionele ketel altijd met een grote luchtvermaat. Dat is slecht voor het rendement, omdat daardoor de hoeveelheid afgevoerde warme rookgassen groot is. De ontsteking gebeurt met behulp van een 'waakvlam' die altijd brandt. Voor het geval de waakvlam uitwaait, is deze beveiligd met een thermokoppel. Als de vlam onverhoopt dooft, koelt het thermokoppel af, waardoor het de gastoevoer naar de waakvlam afsluit. Hierdoor valt de ketel stil; pas als de waakvlam weer is aangestoken, kan de ketel weer warmte leveren.

De meeste conventionele ketels zijn uitgerust met een continu draaiende elektrische circulatiepomp voor het rondpompen van het cv-water. De ketels zijn zo ontworpen dat condensatie van rookgassen in alle gevallen wordt voorkomen, omdat condensvorming in rookgaskanalen tot onacceptabele corrosie zou leiden.



Figuur 2 Bouwtekening van een 'Economaat'. Bron: Wagenaar 1981

Met hun eenvoudige bouw haalden conventionele cv-ketels een rendement van zo'n 60% (op bovenwaarde).

6.2.2 VR-ketels

Als gevolg van de eerste energiecrisis in 1973 ontstond behoefte aan cv-ketels die minder aardgas verbruikten. Dit leidde tot de introductie van een ketel met 'verbeterd rendement', de zogeheten VR-ketel. Diverse verbeteringen aan de technologie brachten het rendement van de toestellen tot boven de 72% (op bovenwaarde). Rookgascondensatie werd echter nog steeds niet toegepast. De VR-ketel heeft slechts een bescheiden rol gespeeld op de Nederlandse markt, maar is nog steeds leverbaar, ook in combivorm (voor verwarming en warm water). Het succes van de HR-ketel (zie hierna) zorgde voor grote productieaantallen en een forse daling van de prijs. Het prijsverschil tussen VR en HR werd klein en daarmee verdween de VR-ketel naar de achtergrond.

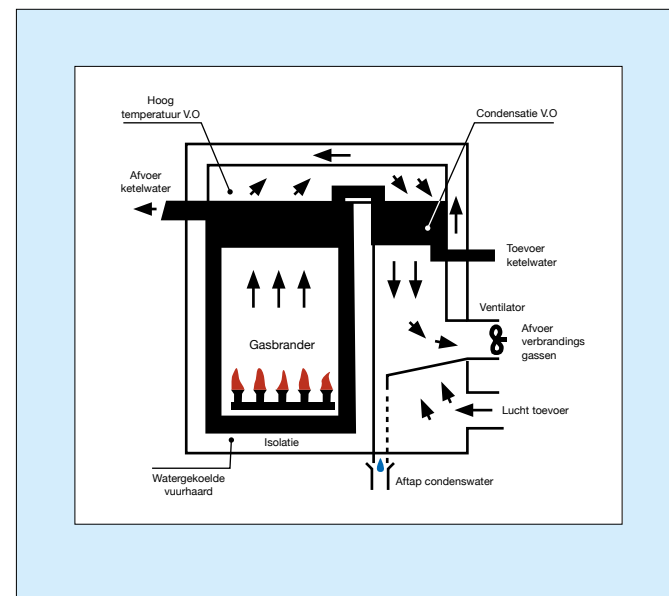
6.2.3 HR-ketels

Het belangrijkste kenmerk van HR-ketels is dat de rookgassen kunnen condenseren als de temperatuur van (de retour van) het afgiftesysteem laag genoeg is. Daarmee onttrekt de ketel zo'n 10% extra warmte aan de rookgassen. Het principe van rookgascondensatie is vóór de introductie van de HR-ketel nog gedurende een korte periode op een bijzondere

manier toegepast in bestaande ketelsystemen. Hiervoor moest een rookgascondensator ('Economaat') in het rookgaskanaal worden gemonteerd. In figuur 2 op pagina 73 is daarvan een tekening te zien. Tijdens deze ontwikkeling kwamen ook de eerste kinderziekten van condenserende systemen naar voren, waaronder corrosieproblemen die werden veroorzaakt door het condensaat. Deze problemen konden destijds al voor een groot deel worden opgelost.

Het eerste prototype van een HR-ketel werd op 8 februari 1979 door Gasunie Research in Groningen gepresenteerd. In figuur 3 is het principeschema te zien. Zoals zo vaak moest ook bij deze innovatie enige weerstand worden overwonnen. Dit had onder meer te maken met de vermeende invloed van condenswater op de riolering. De directeur van Gasunie dronk voor de tv-camera's een glaasje condenswater uit een HR-ketel, om daarmee te laten zien dat dit water onschadelijk en een normale zuurgraad heeft. Twee jaar later, in februari 1981, presenteerden de eerste vier ketelfabrikanten hun toestel met 'GIVEG HR-merk'.

Uit deze eerste ontwerpen is uiteindelijk, dankzij een reeks van verbeteringen en optimalisaties, de huidige HR-ketel ontstaan.



Figuur 3 Principeschema van het prototype van de eerste HR-ketel.
Bron: *Verwarming en Ventilatie 1979*

Deze heeft een brandruimte die geheel is omgeven door gekoeld warmtewisselend oppervlak. Daarmee worden de stralingsverliezen, die bij een conventionele ketel al gauw 6 tot 10% bedragen, sterk gereduceerd.

Zoals gezegd is de HR-ketel ontworpen voor de mogelijkheid van rookgascondensatie. De mate waarin dit lukt, hangt uiteraard af van de ontwerptemperaturen in het cv-systeem. Bij HR-ketels worden de rookgassen vanaf circa 60 °C verzadigd. Dat betekent, dat zij bij verdere afkoeling beginnen te condenseren. Hoe verder de temperatuur daalt, des te meer condensatie zal er optreden. Daar is theoretisch geen ondergrens aan, want tijdens het afkoelen blijven de rookgassen verzadigd. Zij worden, strikt genomen, nooit 'droog'. Een praktische grens ligt bij de temperaturen in het cv-systeem. Bij een gewenste ruimtetemperatuur van bijvoorbeeld 20 °C zal de cv-watertemperatuur altijd hoger dan 20 °C moeten zijn. Bij te hoge temperaturen in het afgiftesysteem zal condensatie dus niet of maar gedeeltelijk optreden. Dit is ongunstig voor het totale rendement, maar beïnvloedt de werking van de ketel niet nadelig.

Moderne HR-ketels kennen de mogelijkheid van modulerend bedrijf. Dit betekent dat het vermogen van de ketel bij deellast wordt gereduceerd tot minimaal ongeveer 20% van het vollastvermogen. Omdat bij deellast het warmtewisselende oppervlak in de ketel (tussen rookgassen en het cv-water) minder warmte hoeft over te dragen, is het temperatuurverschil tussen het verwarmingswater en de rookgassen kleiner. Daarom kunnen in dat geval de rookgassen verder worden gekoeld en gecondenseerd. Ook dit heeft een gunstig effect op het rendement van de ketel.

HR-ketels beschikken over een voorgemengde brander. Daarbij worden zowel het aardgasdebit als de hoeveelheid verbrandingslucht geregeld. In de brander verbrandt het gas-luchtmengsel in een 'korte' vlam. Deze korte verbranding vermindert de vorming en emissie van NO_x. Doordat de luchtvermaat laag is, blijven de schoorsteenverliezen beperkt en neemt condensatie van rookgassen toe. Luchtvermaat leidt namelijk tot een hogere condensatietemperatuur.

Ook op andere punten werd de HR-ketel geoptimaliseerd.

- HR-ketels zijn voorzien van een geavanceerde compacte warmtewisselaar, vaak gegoten in aluminium of uitgevoerd in roestvast staal. Mede hierdoor zijn moderne HR-ketels relatief klein van formaat en licht van gewicht (figuur 4).

- De omkasting is hermetisch afgescheiden van de lucht binnenshuis. De verbrandingslucht wordt via een ventilator van buiten toegevoerd en de verbrandingsgassen worden ook weer naar buiten afgevoerd. Het condensaat wordt via een buis met waterslot afgevoerd.
- De ketel wordt ontstoken met behulp van een elektrische ontstekingspen of gloeiplug. Er is dus geen aardgasgebruik meer voor een waakvlam.
- De verbrandingslucht wordt soms voorverwarmd. Deze lucht komt dan binnen via de buitenmantel van een concentrisch buizenstel. Door de binnenbuis worden de rookgassen naar buiten afgevoerd. In deze coaxiale warmtewisselaar staan de rookgassen warmte af aan de binnenkomende verbrandingslucht. Dit speelt vooral een rol wanneer het rookgaskanaal enige lengte heeft en is één van de details waaraan goed te zien is in welke mate echt alles geprobeerd is om een maximaal rendement te verkrijgen.
- De circulatiepomp voor het cv-water is geregeld. De meest eenvoudige regeling is aan/uit, met een nadraaitijd van enkele minuten na het afschakelen van de ketel. Soms is de regeling toerengeregeld bij deellastbedrijf. Hiermee wordt het gebruik van elektrische hulpenergie sterk verminderd. Overigens wordt in de opgegeven rendementen (bijvoorbeeld HR107) geen rekening gehouden met het elektriciteitsverbruik van de ketel. Dat is van belang bij de vergelijking met andere energieopties, omdat daar soms wel het hulpenergiegebruik in het rendement wordt meegenomen.

De meeste HR-ketels worden in Nederland uitgevoerd als combiketel. Dat betekent dat ze ook warm tapwater leveren. Meestal gebeurt dit zonder opslagvat, dus in doorstroomuitvoering. Dat betekent in de praktijk dat de HR-ketel voor een eengezinswoning wordt geselecteerd op het vermogen dat nodig is voor warm tapwater (21 kW bij een tappatroon met douche⁹). Het vermogen dat nodig is voor ruimteverwarming is veel lager. Als alleen ruimteverwarming gevraagd wordt, gaat de ketel over op modulerend bedrijf.

De meest recente verbetering van de HR-ketel is een verhoging van het rendement voor warm tapwater. Tot voor kort werd bij HR-combiketels warm water bereid via een aparte (platen)warmtewisselaar tussen het cv-water en het leidingwater, waarbij dan tijdelijk de cv-watertemperatuur hoger (tot



Figuur 4 Opengewerkt voorbeeld van een compacte warmtewisselaar van een HR-ketel. Bovenin bevindt zich de brander, die dus geheel met gekoeld oppervlak is omgeven. De rookgassen en het condensaat bewegen zich naar beneden. Bron: *Remeha*

90 °C) werd ingesteld om de vereiste tapwatertemperatuur van 65 °C te bereiken. Vaak werd daarbij ook een kleine cv-waterbuffer toegepast die op dat hogere temperatuurniveau werd gehouden om de responstijd te verminderen. Dit leverde lage rendementen op voor de warmwaterproductie. Omdat het aandeel van de warmwateraanvraag in de totale huishoudelijke energievraag steeds meer toeneemt, was het interessant om de warmwaterproductie verder te verbeteren. Er zijn inmiddels systemen waarbij ook het tapwater direct door de hoofdwarmtewisselaar wordt gestuurd, zodat het koude leidingwater (10 °C) kan bijdragen aan het condenseren van de rookgassen. Daarbij kan het buffervaatje worden weggelaten.

6.3 Rendementen van moderne HR-ketels

De opgegeven rendementen van HR-ketels worden in laboratoria bepaald op basis van testen volgens normen. De prestatie voor ruimteverwarming van HR-ketels wordt bepaald volgens de norm EN 677. De prestaties van een willekeurige voorbeeldketel zijn weergegeven in tabel 1 op pagina 76¹⁰.

Meetcondities volgens EN 677			Gemeten rendement [%]	
T _{retour}	T _{aanvoer}	Deellast [%]	Onderwaarde	Bovenwaarde
30 °C	36 °C	30	109,9	98,9
60 °C	80 °C	100	98,0	88,2

Tabel 1 Voorbeeldprestaties van een HR-ketel (in gebruik voor ruimteverwarming).

Comfortklasse (uitleg: zie kader)	Opwekkingsrendement op bovenwaarde	Jaar-taprendement op bovenwaarde ($\eta_{\text{opw; tap; j}}$ uit de EPN)
4	0,95	0,775

Tabel 2 Voorbeeldprestaties van een HR-ketel (in bedrijf voor warmwaterbereiding).

Bij tapwatertoestellen wordt onderscheid gemaakt in zes comfortklassen. Bij elke comfortklasse hoort een tappatroon dat tijdens een test aan het toestel wordt opgelegd. Uit dat tappatroon volgt dan ook de jaarlijkse warmtevraag voor tapwater. Tabel 3 geeft een overzicht.

Comfortklasse	Tapwatervraag [MJ/jr]	Omschrijving comfort
CW 1	6.500	keuken
CW 2	9.000	Keuken of douche
CW 3	11.500	Keuken of douche of bad (100 liter)
CW 4	14.000	Keuken of douche of bad (120 liter)
CW 5	16.000	Keuken of douche of bad (150 liter)
CW 6	20.000	Keuken en douche, keuken en bad (150 liter) of bad (200 liter)

Definities CW 1 t/m CW 4 conform NEN 7120

Tabel 3 Definitie van de comfortklassen voor warmwatertoestellen.

Interpretatie: CW-klasse 4 is bedoeld voor ongelijktijdig gebruik van keuken en douche (of keuken en bad). Het is echter toch mogelijk om in deze klasse warm water op meerdere plaatsen tegelijk te gebruiken, wanneer de gebruiker enkele beperkingen accepteert. Met een waterbesparende perlator op de keukenkraan (wat altijd een goed idee is) en thermostatische kraan met spaardouche voor de douche kan men in CW-klasse 4 douchen en gelijktijdig warm water in de keuken gebruiken. Het comfort neemt toe bij een hogere CW-klasse, maar het energiegebruik ook.

Door het resultaat 109,9 % valt deze ketel binnen de eisen voor het HR107-keur. De meting wordt gedaan bij een lage temperatuur in het afgiftesysteem (36/30 °C) en bij deellast. De meting bij hoge temperatuur in het afgiftesysteem (80/60 °C) geeft het effect van het niet-condenseren aan.

Deze metingen worden gedaan onder laboratoriumcondities. In de praktijk hangt het rendement in hoge mate af van de specificaties (en de werkelijke uitvoering) van het gehele systeem. Vooral de ontwerptemperaturen en het feitelijke bewonersgedrag (zoals thermostaatinstellingen en het al dan niet ventileren met open ramen als de radiatoren aan staan) zijn van invloed op de prestaties van het toestel.

Voor warm tapwater worden de prestaties bepaald volgens de energieprestatienorm NEN 7120 (vanaf 1 januari 2012 de vervanger van de oude NEN 5128), bijlage A. De prestaties van een willekeurige voorbeeldketel staan in tabel 2.

In de rendementen die in keurmerken voor HR-ketels worden opgegeven, is het hulpenergiegebruik voor de circulatiepomp, de verbrandingsluchtventilator, de servomotor van de driewegklep en de regeltechniek niet meegenomen. Het effect daarvan zal ongeveer 3 tot 6 procentpunten bedragen.

Zoals eerder gemeld vormt de HR107-ketel in dit boek het referentiesysteem. Dit betekent dat de prestaties van alle andere systemen steeds met die van de HR107-ketel worden vergeleken. Dat gebeurt in energiestroomdiagrammen (figuur 5), waarin te zien is hoe uit primaire energie (links) via transport en conversiestappen uiteindelijk aan de eindvraag (rechts) wordt voldaan. Standaard wordt uitgegaan van een ruimteverwarmingsvraag van 40 GJ/jr en een warm(tap)watervraag van 10 GJ/jr, wat ruwweg overeenkomt met de energievraag van een gemiddelde tussenwoning. In het blok linksonder wordt steeds het totale verbruik (in primaire energie) en de besparing ten opzichte van de HR107-ketel gegeven. Die is in dit geval uiteraard gelijk aan nul.

6.4 Overige kenmerken van moderne HR-ketels

Installatiegemak

Omdat moderne HR-ketels licht van gewicht zijn en klein van afmetingen, worden de meeste toestellen opgehangen aan de

muur. Omdat de ketel bijna geen geluid produceert, kan hij vrijwel overal in huis worden gemonteerd.

De montage is eenvoudig. De aan- en afvoerleidingen bevinden zich aan de onderkant, soms verzameld in een standaard aansluitset, waardoor de ketel er in één beweging opgeklit kan worden. De rookgasafvoer en aanvoer van verbrandingslucht zijn concentrisch uitgevoerd, zodat slechts één dak- of muurdoorvoer nodig is. Dit maakt de montage snel en goedkoop. Een onderhoudsinterval van anderhalf jaar is voldoende. Veel gebruikers of eigenaren komen daar niet aan toe, meestal zonder merkbare problemen.

Kosten

De investeringskosten voor een HR-ketel zijn laag. In projecten kunnen de kosten onder 1.000 euro liggen (exclusief btw) liggen. Dit is vooral het gevolg van een uitgekiend ontwerp, productie in grote series en een stevige concurrentie op de Nederlandse markt¹¹. Ook de operationele kosten van HR-ketels zijn laag, vooral omdat aardgas in Nederland relatief goedkoop is, ook ten opzichte van de elektriciteitsprijs. In Nederland ligt de prijsverhouding elektriciteit/aardgas voor kleinverbruikers grofweg tussen 3 en 4 (op basis van energie-inhoud).

Robuustheid

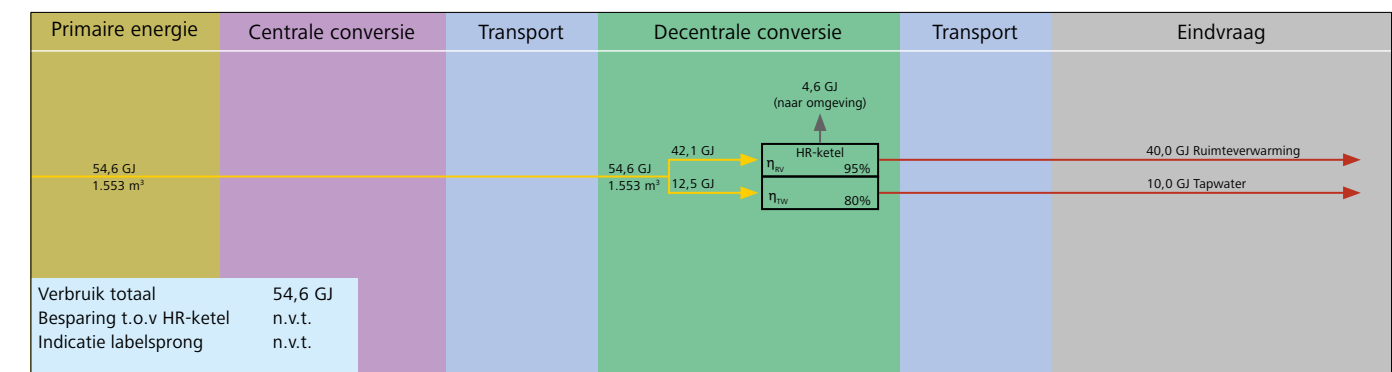
Ook als een installatie niet optimaal is uitgevoerd, functioneert een moderne HR-ketel vaak zonder problemen (hoewel niet met optimaal rendement). Deze robuustheid geldt ook in de richting van het bewonersgedrag. Grote variaties in het bewonersgedrag beïnvloeden het rendement niet zodanig dat de

bewoners er gemiddeld genomen last van hebben. Als de HR-ketel wordt toegepast in combinatie met een verwarmingssysteem dat niet geschikt is voor lage afgiftetemperaturen, kan het gebeuren dat de rookgassen niet condenseren. Het effect hiervan op het rendement (circa 10%), zal veel consumenten niet opvallen. De woning wordt hoe dan ook op het gewenste temperatuurniveau gebracht.

De huidige trend in de woningbouw is dat de warmtevraag voor ruimteverwarming daalt en voor tapwater stijgt. De HR-ketel wordt daarom tegenwoordig altijd gedimensioneerd op de warmwatervraag. Dat betekent dat de ketel voor ruimteverwarming meestal overgedimensioneerd blijkt te zijn. In een extreem geval staat bijvoorbeeld een ketel van 28 kW in een woning met een maximum warmtevraag van 4 kW. Als die ketel maximaal moduleert is de capaciteit 5,8 kW (20% van 28 kW). Voor ruimteverwarming werkt de ketel dus gewoon in aan/uit-bedrijf. Dit is natuurlijk minder gunstig dan modulerend bedrijf, maar het rendementsvoordeel van een laagbelaste ketel blijft.

Standaard

Het is niet verrassend dat de HR-ketel op basis van bovengenoemde eigenschappen op dit moment dé standaard is voor nieuwbouw en vervanging. Het is de technologie waar de overgrote meerderheid van de installateurs bijna zonder na te denken naar grijpt. Er worden per jaar circa 400.000 tot 450.000 HR-ketels geïnstalleerd, hoofdzakelijk op basis van de vervangingsvraag in 7 miljoen bestaande woningen. Daarmee is de ketel een concurrent voor duurzame energiesystemen.



Figuur 5 Energiesysteemdiagram van de HR107-ketel, die in dit boek dient als referentiesysteem.

6.5 Verwachte verbeteringen

Binnen het concept van de HR-ketel zijn waarschijnlijk geen substantiële verbeteringen meer te bedenken. In ieder geval is de energiewinst die dat nog kan opleveren zeer beperkt, omdat de afstand tot het 100%-punt zo klein is geworden. Wellicht zijn in de toekomst nog wel kleine verbeteringen mogelijk op het gebied van levensduur, onderhoud, emissies, gewicht en kosten.

Zelfs bij 100% rendement kan men stellen, dat hoogwaardig aardgas te goed is om er (alleen maar) laagwaardige warmte mee te produceren. De volgende stap in de ontwikkeling van de cv-ketel is daarom de stap naar micro-wkk en gaswarmtepompen. Deze technieken worden behandeld in de volgende hoofdstukken. ■

Hoofdstuk 7

Micro-wkk

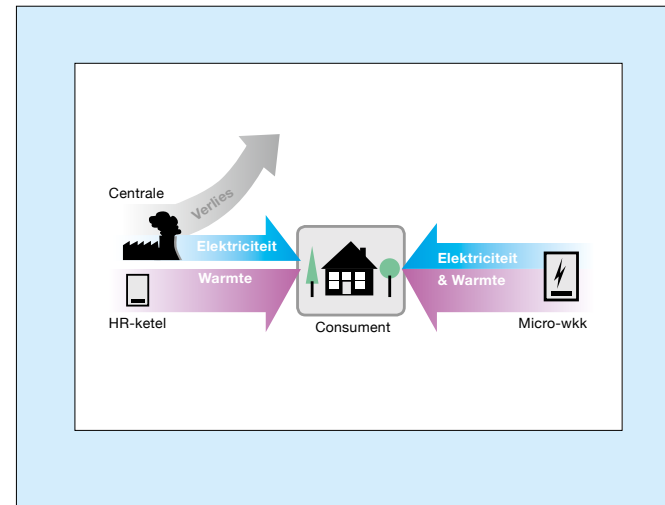
Het is in de praktijk goed mogelijk om met een hoog rendement warmte te produceren uit aardgas of biogas. Bij de productie van elektriciteit uit fossiele brandstoffen komt echter altijd een aanzienlijke hoeveelheid restwarmte vrij. Daarom is het zinvol om de productie van warmte en elektriciteit zoveel mogelijk aan elkaar te koppelen. De warmte die vrijkomt bij de productie van elektriciteit kan dan nuttig worden gebruikt. Dit is het principe van micro-warmtekrachtkoppeling, kortweg micro-wkk.

7.1 Warmte én elektriciteit tegelijk produceren

De productie van elektriciteit via verbranding van fossiele brandstoffen levert niet alleen elektriciteit op, maar ook warmte. Deze warmte verlaat in veel gevallen de centrale zonder nuttig gebruikt te zijn. Dat is zonde, want met behulp van de restwarmte van elektriciteitsproductie kunnen nog prima woningen of andere gebouwen verwarmd worden.¹² Indien zowel de elektriciteit als de warmte van een elektriciteitscentrale nuttig gebruikt wordt, noemen we dit warmtekrachtkoppeling (wkk). Enkele grote elektriciteitscentrales in Nederland passen dit principe toe. In Utrecht en Amsterdam liggen bijvoorbeeld groot-schalige warmtenetten die gevoed worden vanuit elektriciteitscentrales. Een uitgebreide discussie over stadswarmtenetten volgt in hoofdstuk 11.

Het is ook mogelijk het wkk-principe toe te passen op kleine schaal: de micro-wkk¹³. In 2011 is een ketel op de Nederlandse markt geïntroduceerd die op kleine schaal elektriciteit produceert en de vrijkomende warmte gebruikt voor verwarming van de woning. Ook de productie van warm tapwater is mogelijk.

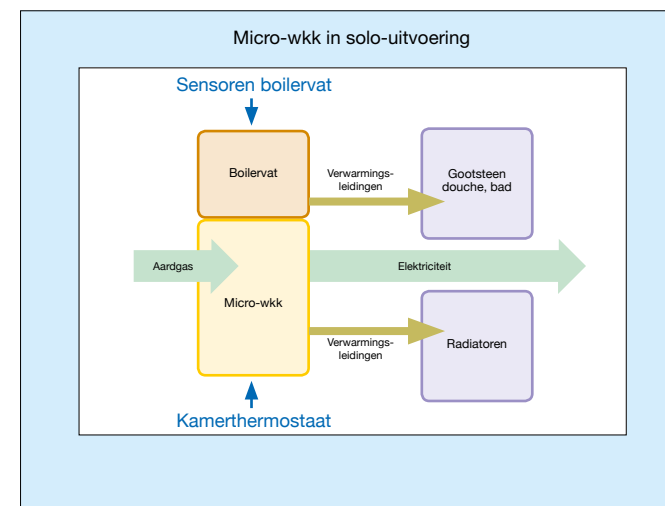
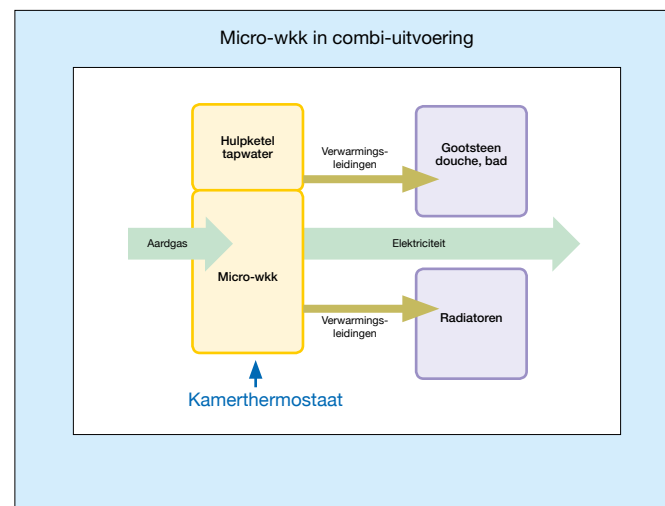
De technieken die worden ingezet voor elektriciteitsproductie op woningschaal zijn niet zo efficiënt als een grote centrale, maar omdat in een woning ook de warmte direct nuttig gebruikt kan worden, is er toch een flinke energiebesparing. Naast de winst door het gecombineerd produceren van elektriciteit en warmte, worden ook elektrische transportverliezen vermeden. Figuur 1 op pagina 82.



Figuur 1 Het besparingsprincipe van micro-wkk. Links gescheiden opwek, waarbij warmte met een HR-ketel geproduceerd wordt en elektriciteit door een centrale. Rechts gezamenlijke productie door een micro-wkk. Bron: Energy Matters

De gebruiker van een micro-wkk zal een iets hoger gasverbruik hebben en een lagere elektriciteitsinkoop van het net. Omdat de consumentenprijs voor elektriciteit veel hoger ligt dan de prijs voor dezelfde energiehoeveelheid aan aardgas, levert dit een jaarlijks kostenvoordeel op. De energetische besparing ligt in het feit dat er op centraal niveau minder elektriciteit wordt geproduceerd, waardoor in de centrales minder fossiele brandstof nodig is. De hoeveelheid brandstof die centraal wordt uitgespaard, is bij een goede wkk groter dan de extra hoeveelheid aardgas die in de woning nodig is.

In de praktijk wordt een micro-wkk niet primair gebruikt om elektriciteit op te wekken, maar ingezet op basis van de warmtevraag¹⁴. Als de thermostaat aangeeft dat er behoefte is aan ruimteverwarming of als het boilervat leeg dreigt te raken, zal de micro-wkk aanslaan. Hierbij wordt tegelijkertijd een hoeveelheid elektriciteit geproduceerd. Deze elektriciteit kan direct in de woning gebruikt worden, maar als daar op dat moment geen behoefte is aan elektriciteit, kan ze ook aan het openbare elektriciteitsnet teruggeleverd worden.



Figuur 2 Een micro-wkk kan worden uitgevoerd als combitoestel (links) of als solotoestel (rechts). In de combi-uitvoering is een hulpketel in het apparaat geïntegreerd. De solo-uitvoering moet worden aangesloten op een boilervat om warm water te kunnen leveren. In de winter is bij het solotoestel nog een hulpketel noodzakelijk om indien nodig de hoge warmtevraag voor ruimteverwarming te kunnen invullen.

Micro-wkk bestaat in twee uitvoeringen: als combi- en als solo-toestel. In de combi-uitvoering bestaat het apparaat uit de micro-wkk zelf en een hulpketel. Bij een lage warmtevraag dekt de micro-wkk de volledige behoefte, maar als de warmtevraag groot wordt, bijvoorbeeld als iemand gaat douchen of als de buiten-temperatuur laag is, springt de hulpketel bij. De micro-wkk en de hulpketel zijn samen geïntegreerd in één behuizing en de gebruiker merkt door het soepele samenspel van beide technologieën niet dat er eigenlijk twee apparaten in de behuizing zitten.

Het is in principe mogelijk om de micro-wkk zo te dimensioneren dat een hulpketel overbodig is. Om aan de onmiddellijke vraag naar warm tapwater te voldoen is dan een groot vermogen nodig. De technologie voor een micro-wkk is echter te kostbaar om een degelijk vermogen te plaatsen. Bovendien is het voor de meeste micro-wkk's niet goed mogelijk om snel de output te moduleren, dat wil zeggen in korte tijd veel meer of veel minder vermogen te leveren.

In een solotoestel is geen hulpketel geïntegreerd. Als er vraag is naar tapwater, kan de micro-wkk het gevraagde vermogen niet leveren. Daarom moet een solotoestel worden geplaatst in combinatie met een boilervat, zodat ook warm tapwater geleverd kan worden. Figuur 2 geeft een schematisch overzicht van de beide uitvoeringen van de micro-wkk.

7.2 Technische principes van micro-wkk

Micro-wkk is niet één bepaalde technologie, maar een verzamelnaam voor alle technieken die gelijktijdig elektriciteit en warmte opwekken [GasTerra, 2008]. Het verschil tussen de technieken zit in de manier waarop elektriciteit wordt gemaakt. De verschillende concepten kunnen in drie groepen worden ingedeeld:

1. Externe verbranding (warmte wordt overgedragen aan een ander medium).
2. Interne verbranding (het verbrandingsproces drijft direct aan).
3. Brandstofcellen (chemische omzetting).

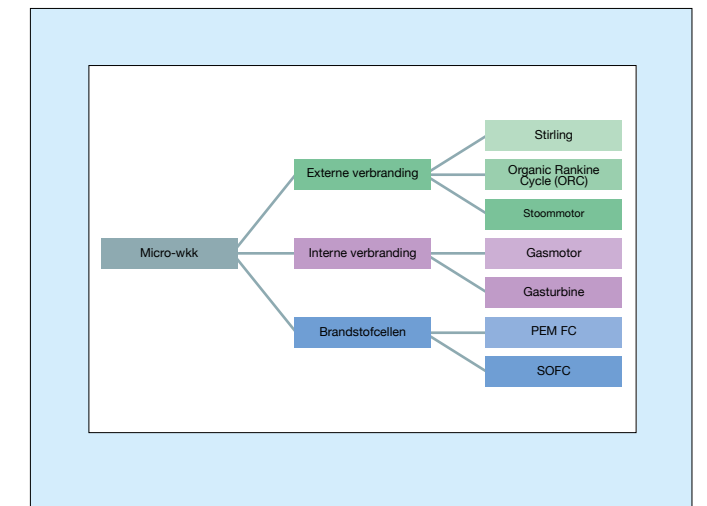
Binnen deze drie groepen is weer een verder onderscheid mogelijk naar subtechnologieën. Dit is weergegeven in figuur 3.

De verschillende technieken hebben ieder hun eigen voor- en nadelen op het gebied van prestatie, kosten, installatietechniek enzovoort. De volgende paragrafen gaan hier verder op in.

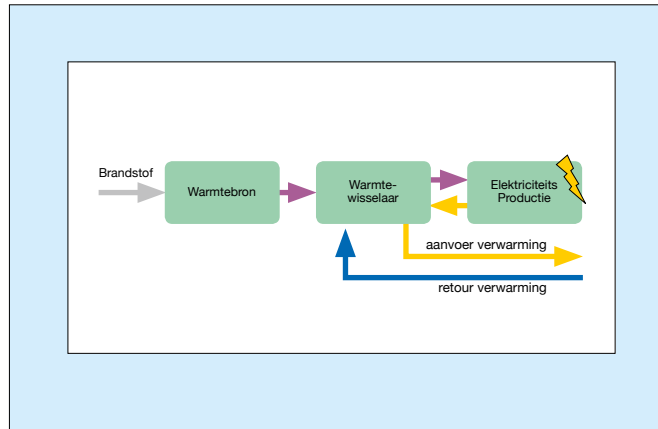
7.2.1 Externe verbranding

Het principe van externe verbranding houdt in dat er een constante bron van warmte aanwezig is om een apparaat aan te drijven dat elektriciteit produceert. De oorsprong van de warmte is voor de elektriciteitsopwekking niet van belang, mits de temperatuur voldoende hoog is om de elektriciteitsproductie mogelijk te maken. Vaak zal een gasbrander gebruikt worden, maar ook andere brandstoffen zijn mogelijk, evenals restwarmte of zelfs zonnewarmte. Er vindt dus geen verbranding plaats binnenin de eigenlijke elektrische opwekker, zoals bijvoorbeeld bij een automotor wel het geval is. Figuur 4 op pagina 84 geeft een schematisch overzicht.

Het is in de praktijk onmogelijk om de toegevoerde warmte volledig om te zetten in elektriciteit. Een deel van de warmte gaat op een lager temperatuurniveau 'verloren' (zie ook de bijlage over thermodynamica in hoofdstuk 13). Deze warmte kan echter prima worden gebruikt om het verwarmingssysteem te voeden. Zodoende wordt een veel groter deel van de warmte nuttig gebruikt. Op de volgende pagina's bespreken we drie externe verbrandingssystemen.



Figuur 3 Verschillende technieken voor micro-wkk. Bron: www.microwkk.nl



Figuur 4 Bij een micro-wkk gebaseerd op externe verbranding is de warmtebron onafhankelijk van de elektriciteitsproductie.



Figuur 5 Opengewerkt voorbeeld van een Stirlingmotor.
Foto: Microgen Engine Corporation

Stoommotor en ORC

De bekendste machine om warmte om te zetten in beweging (en door middel van een generator dus ook in elektriciteit) is wellicht de stoommotor. Een stoommotor is gebaseerd op hetzelfde principe als de stoommachine, die het begin van de industriële revolutie in Europa inluidde. In een stoommotor wordt water verwarmd zodat stoom onder hoge druk ontstaat. Deze stoom kan dan gebruikt worden om een turbine of een zuigersysteem aan te drijven. De turbine (of de zuigers) drijft (drijven) vervolgens via een krukas een generator aan. Thermische energie wordt op deze manier omgezet in elektrische energie. Na de productie van elektriciteit is de energie-inhoud van de stoom nog niet uitgeput. Door middel van een warmtewisselaar kan de stoom worden afgekoeld zodat die condenseert tot vloeibaar water en weer terugstroomt naar de ketel. In de praktijk worden stoommotoren niet gebruikt voor kleinschalige toepassingen, omdat de stoom onder hoge druk een gevaar kan opleveren.

Een tweede voorbeeld van externe verbranding is de Organic Rankine Cycle (ORC). Het principe van een ORC is gelijk aan dat van een stoommotor. In plaats van water en stoom wordt hier echter gebruikgemaakt van een organische vloeistof¹⁵. Deze vloeistof wordt zo gekozen dat het kookpunt lager ligt dan bij water. Hierdoor is het mogelijk om bij lagere temperaturen dan 100 °C damp te produceren.

De huidige ORC-systemen zijn nog niet op kleine schaal beschikbaar. Één van de problemen die moet worden opgelost is de brandbaarheid van de organische vloeistof.

Stirlingmotor

De derde techniek die hier besproken wordt is de Stirlingmotor. Dit motorprincipe bestaat al lang, maar is pas recent commercieel op de markt gebracht voor toepassing in micro-wkk's. Momenteel is de Stirlingmotor in Nederland het meest gebruikte micro-wkk-systeem. We zullen daarom in dit hoofdstuk iets dieper ingaan op de werking en de praktische aspecten van dit apparaat.

Hoofdstuk 13 gaat nader in op de thermodynamische principes van de Stirlingmotor.

De cyclus bestaat uit vier stappen:

1. Een gas wordt verhit ($T\uparrow$), terwijl het volume constant wordt gehouden. Deze verhitting wordt gerealiseerd door het gas te verplaatsen van een koude naar een hete cilinder. Hierdoor stijgt de druk ($P\uparrow$).
2. De cilinder wordt op temperatuur gehouden door een externe warmtebron (bijvoorbeeld een gasbrander), zodat de temperatuur constant blijft. Door de opwarming in de hete cilinder zal het gas uitzetten en een zuiger verplaatsen. Door de uitzetting van het gas neemt de druk af en het volume toe ($P\downarrow$, $V\uparrow$).
3. Nu wordt het gas weer teruggepompt van de warme naar de koude cilinder. Hierdoor neemt bij constant volume de temperatuur af en daalt de druk ($T\downarrow$, $P\downarrow$).
4. In de laatste stap wordt het afgekoelde gas samengedrukt door de zuiger. De koude cilinder blijft op gelijke temperatuur, het volume neemt af en de druk wordt hoger ($V\downarrow$, $P\uparrow$).

Na stap 4 wordt het gas weer naar de warme cilinder gepompt, zoals in stap 1, en begint de cyclus van voren af aan.

De arbeid in een Stirlingmachine wordt geleverd in stap 2. Door de uitzetting van het gas wordt een zuiger verplaatst en deze mechanische beweging kan worden gebruikt om een generator aan te drijven voor elektriciteitsproductie. Op het eerste gezicht lijkt het alsof er netto geen energie geleverd wordt. In stap 4 moet het gas immers weer worden samengeperst en dit kost arbeid. Het belangrijke verschil tussen stap 2 en 4 is echter dat stap 2 plaatsvindt bij een hoge temperatuur en stap 4 bij een lage temperatuur. Bij een hoge temperatuur levert een vergroting van het volume zeer veel arbeid (de zuiger wordt met kracht verplaatst), terwijl bij een lage temperatuur slechts weinig kracht nodig is om het gas samen te drukken. Stap 2 levert veel meer energie op dan stap 4 kost; er is netto levering van arbeid.

In de praktijk bestaat de Stirlingmotor uit een afgesloten cilinder met een vaste hoeveelheid gas en een zuiger. De cilinder wordt aan één kant verwarmd (meestal door de verbranding van aardgas) en aan de andere kant gekoeld door de omgeving. Het gas in de warme kant van de cilinder zet uit en brengt de zuiger in beweging, die op zijn beurt is gekoppeld aan een generator. Door het voortdurend verplaatsen van het gas in de cilinder, van de warme naar de koude kant en terug, ontstaat een cyclus.

Er zijn verschillende typen Stirlingmotoren. Twee typen die voor gebruik in woningen beschikbaar zijn, zijn de kinematische Stirling en de vrijezuiger-Stirling. De kinematische Stirlingmotor werkt met één of meerdere zuigers die een krukas laten bewegen. In de vrijezuiger-Stirlingmotor, die het meest toegepast wordt in Nederland, is de zuiger opgehangen aan stijve veren en bewegen de zuigers vrij in de cilinder; zuiger en cilinder maken geen contact. Wrijving is hierdoor minimaal, wat resulteert in minimale slijtage en een lage onderhoudsbehoefte.

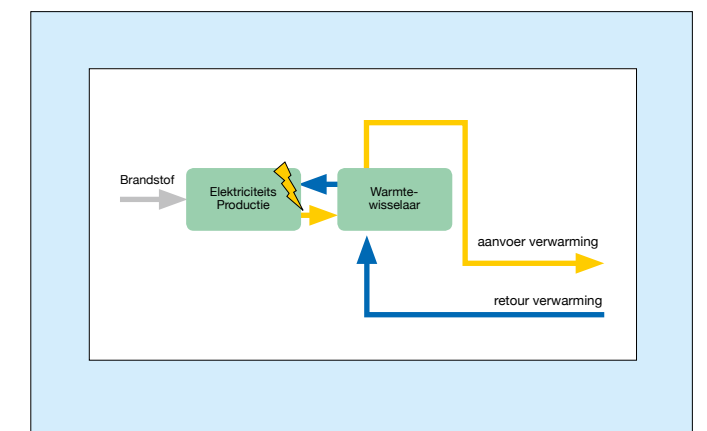
7.2.2 Interne verbranding

Elektriciteitsproductie door middel van interne verbranding is niet afhankelijk van een externe warmtebron. De verbranding die gebruikt wordt om de elektriciteit op te wekken is een onderdeel van het opwekkingsproces. In de meeste gevallen is het dan ook niet mogelijk om een andere brandstofbron te gebruiken dan die waar het toestel voor ontworpen is.

Hieronder beschrijven we twee systemen gebaseerd op interne verbranding.

Gasmotor

De meest toegepaste wkk in Nederland is de gasmotor-wkk, voornamelijk in toepassingen van 100 kW tot 10 MW elektrisch vermogen. De werking van een gasmotor (ook wel Ottomotor



Figuur 6 Bij een micro-wkk gebaseerd op interne verbranding komt warmte vrij als gevolg van de elektriciteitsproductie.

genoemd) is identiek aan die van een automotor. De beweging van de krukas wordt bij een wkk niet aangewend om wielen aan te drijven, maar een generator die elektriciteit opwekt. Met een vloeistofcircuit wordt de motor gekoeld. De warmte die op deze manier aan de motor wordt onttrokken, kan ingezet worden voor ruimteverwarming of voor het verwarmen van tapwater.

Gasmotoren bestaan in verschillende vermogens. De grootste motoren worden gebruikt in de glastuinbouw en hebben een elektrisch vermogen tot wel 10 MW. Kleinere motoren, met vermogens rond 1 MW, worden veel toegepast in bijvoorbeeld ziekenhuizen en grotere hotels. Voor kleinere gebouwen, zoals verzorgingstehuizen, zwembaden en kleinere hotels, zijn motoren beschikbaar van circa 5 kW tot 1 MW.

De efficiency van grote gasmotoren is zeer hoog. Een elektrisch rendement van meer dan 40% (op bovenwaarde) is inmiddels haalbaar. Voor kleinere motoren is het lastig om tegen redelijke kosten een vergelijkbaar rendement te halen. In het afgelopen decennium hebben fabrikanten echter hard gewerkt aan verdere verbeteringen, waardoor tegenwoordig betaalbare



Figuur 7 Kleine gasmotoren worden in Japan al vele jaren gebruikt voor verwarmingsdoeleinden. In Europa is deze ontwikkeling nog relatief nieuw. Bron: Vaillant

kleine gasmotoren beschikbaar zijn met vermogens vanaf 1 kW, die toch een rendement van zo'n 25% op bovenwaarde halen.

De kleinste motoren produceren 1 kW elektriciteit en daarnaast ongeveer 2,5 tot 5 kW warmte. Deze grootte sluit goed aan bij de verwarmingsbehoefte van een gemiddelde woning gedurende een groot deel van het jaar.¹⁶ In koude periodes kan worden bijgestookt met een standaard gasketel.

Gasturbine

Een gasturbine kan gezien worden als een variant op de bekende stoomturbine of stoommotor. Bij de eerste stap wordt lucht gecomprimeerd en naar de verbrandingskamer geleid. Aardgas wordt in de verbrandingskamer met de gecomprimeerde lucht verbrand. Hierdoor stijgen de temperaturen en de druk sterk. In de tweede stap expandeert het verbrandingsgas. Hierdoor wordt zoveel mechanische arbeid opgewekt, dat daarmee de compressie in de eerste stap én een generator voor elektriciteitsproductie kunnen worden aangedreven. Deze cyclus vindt continu plaats; er wordt ononderbroken gas binnengelaten, verbrand en via de turbine naar buiten gelaten.

Het verschil tussen een stoomturbine en een gasturbine is dat bij een stoomturbine een externe warmtebron gebruikt wordt om het hete gas (stoom) te produceren, terwijl bij een gasturbine de warmteproductie in het apparaat plaatsvindt door verbranding van het gas zelf.

Gasturbines worden vooral voor grootschalige toepassingen ingezet, zoals in elektriciteitscentrales of in fabrieken. De laatste jaren komen er ook middelgrote en kleinere turbines op de markt. Middelgrote turbines (tot enkele tientallen kW vermogen) kunnen nu al worden ingezet in de collectieve woningbouw. Naar verwachting gaan binnen enkele jaren de eerste proeven met zeer kleine turbinesystemen voor individuele woningen van start.

7.2.3 Brandstofcellen

Brandstofcellen zijn zeer geschikt om met hoge efficiency elektriciteit op te wekken. In een brandstofcel wordt chemische energie direct omgezet in elektriciteit, in tegenstelling tot de verbrandingstoepassingen die in de paragrafen hiervoor zijn besproken.

De besparing die door brandstofcellen kan worden bereikt komt op dezelfde manier tot stand als bij andere micro-wkk's. De gebruiker zal meer aardgas verbruiken en minder elektriciteit van het net afnemen. Op centraal niveau zal in Nederland daarom minder elektriciteit worden geproduceerd en minder fossiele brandstof worden ingezet.

Bij verbranding wordt chemische energie eerst omgezet in warmte, die vervolgens wordt gebruikt om elektriciteit te produceren. De stap van warmte naar elektriciteit heeft een gelimiteerde efficiency, die onder meer afhangt van het temperatuurniveau van de warmte en de temperatuur van de omgeving. Hierdoor is de totale elektrische efficiency van het systeem altijd beperkt. Omdat een brandstofcel de tussenstap van warmteproductie overslaat, wordt de efficiency niet begrensd door de wet van Carnot (zie hoofdstuk 13). In een brandstofcel ontstaat weliswaar ook warmte, maar deze vrijkomende warmte kan als een echt bijproduct worden beschouwd en is niet noodzakelijk voor de elektriciteitsproductie. Er bestaan verschillende typen brandstofcellen waarvan we er hieronder twee voorstellen.

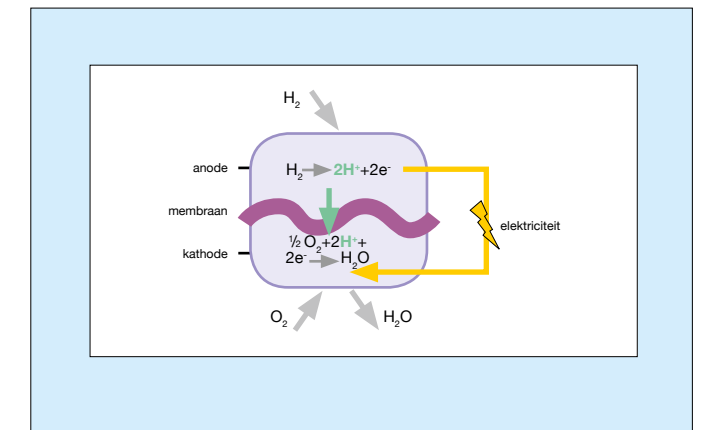
PEM-brandstofcel

De oervorm van de brandstofcel is de PEM, ofwel *Proton Exchange Membrane* brandstofcel. De brandstofcel is opgebouwd uit drie lagen. In de bovenste laag (de anode) wordt waterstof (H_2) ingevoerd; in de onderste laag (de kathode) zuurstof (O_2). Zoals bekend kunnen waterstof en zuurstof reageren tot water (H_2O). Tussen de anode en de kathode is echter een membraan aanwezig waar waterstof alleen doorheen kan als het waterstofatoom zijn elektron afgeeft. Waterstof wordt 'geïoniseerd'. Het waterstofion (H^+) diffundeert door het membraan en reageert aan de andere kant met zuurstof tot water. De elektronen (e^-) moeten buiten het membraan om naar de kathode komen: dit is de opgewekte elektriciteit!

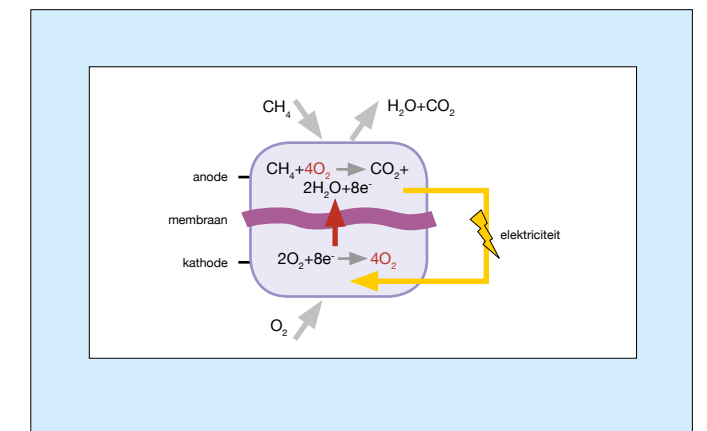
Bij een micro-wkk op basis van een brandstofcel wordt waterstof gemaakt uit methaan (het hoofdbestanddeel van aardgas) met behulp van een reformer. Methaan wordt in de reformer met zuurstof en water omgezet tot waterstof en CO_2 . Het waterstof wordt vervolgens in de brandstofcel gebruikt voor het opwekken van warmte en elektriciteit.

SOFC-brandstofcel

De SOFC-brandstofcel (*Solid Oxide Fuel Cell*) is vergelijkbaar met de PEM-brandstofcel. In dit geval gaan echter geen waterstofionen van de anode naar de kathode, maar zuurstofionen van de kathode naar de anode. Als 'brandstof' hoeft geen waterstof te worden gebruikt, maar zijn verschillende organische stoffen mogelijk. In het onderstaande voorbeeld wordt methaan (CH_4) uit aardgas gebruikt. Het methaan reageert met de zuurstofionen (O^{2-}) tot kooldioxide (CO_2) en water (H_2O). De vrijkomende elektronen gaan buiten het membraan om naar de kathode, waar ze samen met zuurstof de zuurstofionen vormen.



Figuur 8 Werking van een PEM-brandstofcel.



Figuur 9 Werking van een SOFC-brandstofcel.

Het voordeel van de SOFC- boven de PEM-brandstofcel is dat er geen pure waterstof nodig is als brandstof. Nadeel is echter dat het membraan alleen kan opereren bij een zeer hoge temperatuur (tussen circa 650 en 900 °C). Als het membraan eenmaal deze hoge temperatuur heeft, is geen verdere warmtetoevoer nodig. Wel moet de brandstofcel zeer goed geïsoleerd worden en zijn hoogwaardige componenten nodig die bestand zijn tegen hoge temperaturen. Het voordeel van de hoge temperatuur is dat geen dure katalysator nodig is, zoals bij de PEM-cel, waar vaak platina gebruikt wordt.

De SOFC-brandstofcel is dus robuuster en minder kieskeurig ten aanzien van de brandstof, maar is minder gemakkelijk te bouwen en te bedienen dan de PEM-cel.

Brandstofcellen als micro-wkk

De bovenstaande brandstofcellen zijn maar twee voorbeelden van deze technologie; er bestaan inmiddels veel meer varianten. Het principe is echter altijd hetzelfde: door een membraan te gebruiken waar ionen wel doorheen kunnen maar elektronen niet, worden deze elektronen gedwongen een 'omweg' te maken buiten de brandstofcel om. De elektronenstroom is niets anders dan elektriciteit, die gebruikt kan worden in de woning.

Omdat de omzetting van chemische energie in elektriciteit niet perfect is, komt er naast elektriciteit ook warmte vrij. De brandstofcel kan daarom worden aangesloten op een watercircuit voor ruimteverwarming en verwarming van tapwater.

	HR-ketel	Stirling	Gasmotor	Gasturbine	PEM	SOFC
brandstof	aardgas	aardgas	aardgas	aardgas	waterstof	aardgas
rendement elektrisch	n.v.t.	15%	20%	20%	25-45%	25-55%
totaal rendement	95%	95%	90%	90%	85-90%	85-90%
vermogen elektrisch	0 kW	1 kW	1-5 kW	3-5 kW	1-3 kW	1-3 kW
vermogen thermisch	20 kW	5 kW	3-20 kW	10-20 kW	1-3 kW	1-3 kW
investeringskosten	laag	middel	middel	hoog	zeer hoog	zeer hoog
beschikbaarheid	meest toegepaste apparaat in NL	beschikbaar in Nederland	beschikbaar in buitenland	nog niet beschikbaar	proefprojecten	proefprojecten

Tabel 1 Indicatieve vergelijking van verschillende technologieën voor micro-wkk. Ter vergelijking is ook de HR-ketel weergegeven. De rendementen van de PEM- en SOFC-brandstofcel zijn nog niet eenduidig te geven. Er lopen verschillende proeftrajecten en de behaalde rendementen variëren per project. Het PEM-rendement is gegeven voor directe conversie van waterstof, dus exclusief de reformstap. De kosten voor een technologie zijn indicatief aangegeven ten opzichte van een HR-ketel, waarbij de kosten voor de HR als laag zijn geclassificeerd.

7.3 Kenmerken van kleinschalige wkk-technieken

De verschillende technieken voor micro-wkk hebben allemaal hun eigen voor- en nadelen op het gebied van prestatie, kosten, installatiegemak etc. Tabel 1 vergelijkt de prestaties van hiervoor genoemde technieken.

In Nederland wordt momenteel vooral de Stirlingtechnologie toegepast. Andere technologieën zijn nog niet volledig beschikbaar. Hoewel brandstofcellen zich nog in de demonstratiefase bevinden, zouden zij een belangrijke rol kunnen spelen bij energiebesparing in de gebouwde omgeving. Door het hoge elektrische rendement kunnen brandstofcellen namelijk zeer veel energie besparen. De volgende twee paragrafen zullen iets dieper ingaan op de praktische eigenschappen van de Stirlingmotor en brandstofcellen.

7.3.1 De Stirlingmotor

De eigenschappen van een Stirlingmotor maken hem vooral geschikt voor toepassing in bestaande woningen: de motor gebruikt aardgas als brandstof, past op de plaats van een traditionele ketel, is relatief onderhoudsarm en kan probleemloos continu warmte leveren op een hoog temperatuurniveau.

Met name dit laatste is van belang in oude woningen, die vaak matig of slecht geïsoleerd zijn. Natuurlijk moet waar mogelijk isolatie worden toegepast, maar in veel oude panden is dit praktisch geen optie. Bovendien wordt een bestaande verwar-

mingsketel niet altijd vervangen precies op het moment dat het hele huis wordt gerenoveerd en geïsoleerd. In zulke gevallen kan een micro-wkk op basis van een Stirlingmotor een energiebesparende keuze zijn bij vervanging van een bestaande cv-ketel.

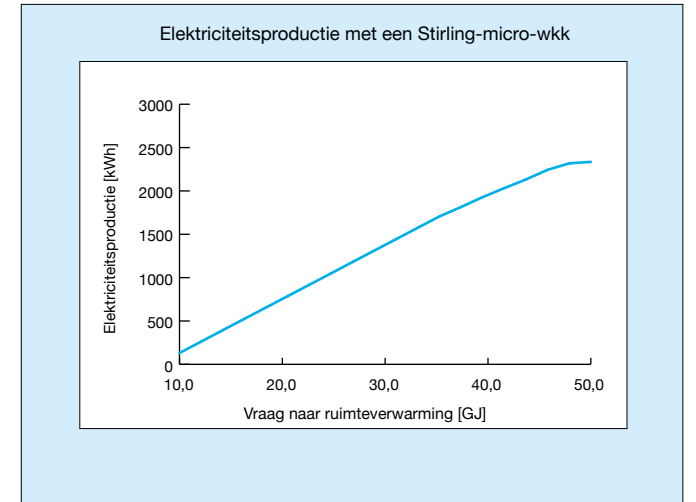
Een Stirlingmotor werkt door middel van externe verbranding en heeft een beperkt aantal bewegende delen. Hierdoor is de motor relatief onderhoudsarm. Tegelijkertijd is het ook mogelijk om in de toekomst door middel van relatief eenvoudige ingrepen over te schakelen op een andere brandstof, bijvoorbeeld biogas van een andere kwaliteit dan het Groninger aardgas.

De Stirling heeft ook nadelen. Om het warme deel van de motor stabiel op temperatuur te houden is een hoge thermische massa nodig. Dat vertaalt zich in een hoog gewicht van de motor, tot wel 100 kg. Dit is een belangrijk nadeel bij de installatie van de ketel. Hoewel inmiddels enkele hulpmiddelen ontwikkeld zijn die het gemakkelijker maken met de zware Stirling te werken, kunnen steile trappen en lastig toegankelijke ketelruimtes in sommige gevallen een onoverkomelijke hindernis vormen.

Daarnaast moet de plaatsing van de ketel secuur gebeuren om te zorgen dat er geen geluidsoverlast ontstaat. De zuiger in de Stirlingmotor beweegt met een frequentie van 50 Hz en dit kan een brommende toon veroorzaken. Het is dus zaak de ketel te bevestigen aan een stenen wand met een zekere massa, om contactgeluid te voorkomen.

Prestaties

De besparing die met een Stirlingmotor kan worden behaald, hangt af van de warmtebehoefte van een woning. Dit komt omdat de Stirlingmotoren die in Nederland op de markt zijn allemaal een vast vermogen hebben.¹⁷ In een kleine woning kan een Stirlingmotor vrijwel de gehele warmtevraag invullen met relatief weinig draaiuren, maar in een grote woning is de bijdrage van de Stirling bijvoorbeeld 75 of 80% van de totale warmtevraag. De rest wordt dan aangevuld door een compacte HR-ketel die samen met de Stirlingmotor in één behuizing geïntegreerd is. Bij een grotere warmtevraag kan de Stirling meer draaiuren maken en produceert dus meer elektriciteit. Hierdoor wordt de economische haalbaarheid beter, want de motor kan zichzelf sneller terugverdienen door een besparing op de elektriciteitskosten. Figuur 10 geeft een indruk van de elektriciteitsproductie van een Stirling-micro-wkk bij een gegeven warmte-



Figuur 10 De warmtebehoefte van een woning bepaalt hoeveel draaiuren een Stirlingmotor kan maken en bepaalt daarmee ook de elektriciteitsproductie. In grotere woningen is de warmtevraag hoger en kan de motor dus vaker en langer worden ingeschakeld. Bron: Werkgroep micro-wkk, 2010

vraag in de woning. Voor de berekening is aangenomen dat een combiapparaat gebruikt wordt, waarbij de tapwatervraag door de bijstook wordt gedekt. In de grafiek is de vraag naar ruimteverwarming (dus exclusief tapwaterbehoefte) horizontaal weergegeven.

Als we de energetische prestatie van een micro-wkk willen vergelijken met een normale ketel, moeten we eerst weten hoe we de productie van elektriciteit waarderen. Een micro-wkk bespaart immers doordat het hogere aardgasverbruik gecompenseerd wordt door extra elektriciteitsproductie.

Een logische manier om elektriciteitsproductie te waarderen is door deze terug te rekenen naar primaire brandstofinzet. De gemiddelde efficiency van een Nederlandse elektriciteitscentrale is ongeveer 39%.¹⁸ Dit betekent dat voor iedere kWh elektriciteit die door een elektriciteitscentrale geproduceerd wordt, 2,5 kWh brandstof nodig is. Dit komt overeen met de energie-inhoud van 0,284 m³ aardgas, ofwel 9 MJ.

We kunnen met behulp van deze gegevens bepalen hoe groot de besparing van een Stirling-micro-wkk is voor een typisch huis-

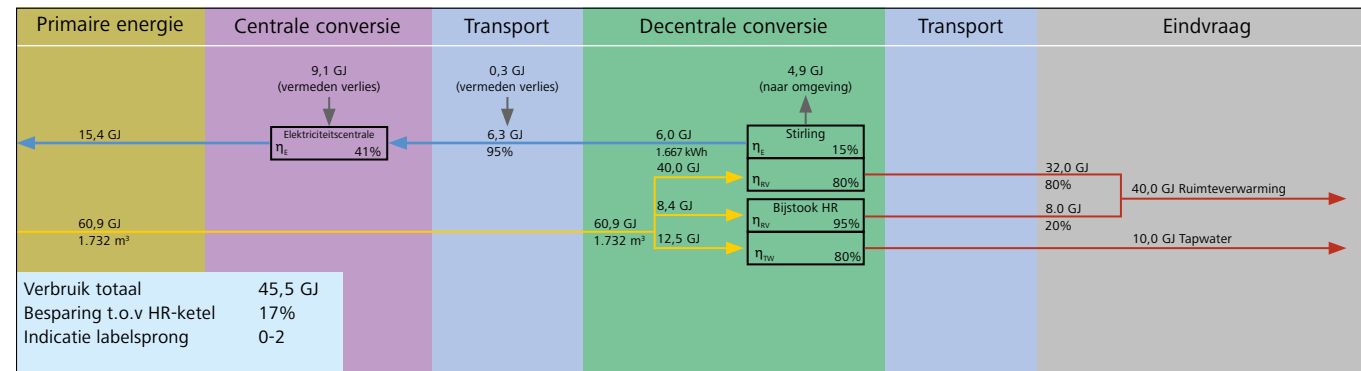
houden. De figuren 11 en 12 geven twee voorbeelden. De eerste figuur toont een micro-wkk zonder boilervat. De tapwatervraag wordt dus volledig door de bijstookketel ingevuld. De tweede case is een micro-wkk met boilervat. Met behulp van dit boilervat is het mogelijk de tapwatervraag met de Stirlingmotor in te vullen en is dus een hogere besparing te behalen.

We kunnen ook op een andere manier een indruk krijgen van de efficiency van een micro-wkk. Net zoals bij een ketel of een warmtepomp kunnen we voor een micro-wkk een totaalrendement berekenen waarin de elektriciteitsproductie is meegere-

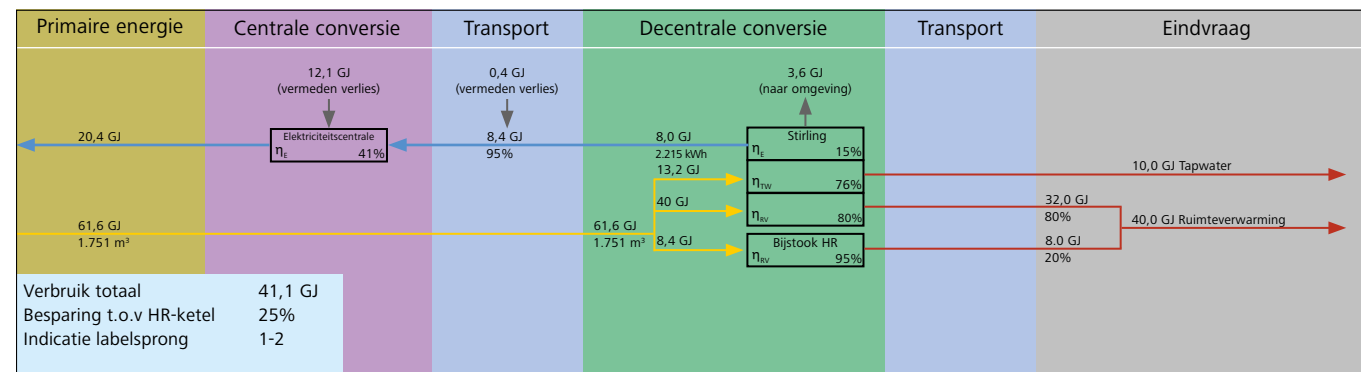
kend. Dit rendement noemen we het 'equivalent rendement'. Het equivalent rendement is als volgt te berekenen:

$$\eta_{equiv} = \frac{Q_{uit}}{Q_{in}} = \frac{Q_{warmte} + \frac{Q_{elektrisch}}{\eta_{centrale}}}{Q_{aardgas}}$$

De berekening is simpelweg de energie die geproduceerd wordt (Q_{uit}) gedeeld door de benodigde energie (Q_{in} ofwel $Q_{aardgas}$). De geproduceerde energie bestaat uit warmte (Q_{warmte}) en elektriciteit ($Q_{elektrisch}$). De elektrische energie moet echter worden verrekend met de efficiency van centrale productie, in dit boek



Figuur 11 Energiestroomdiagram voor een Stirlingmotor-micro-wkk zonder boiler. Er wordt 1.732 m³ aardgas gebruikt, dat wordt ingezet voor ruimteverwarming door de Stirlingmotor, bijstook voor ruimteverwarming en bijstook voor tapwater. De Stirlingmotor produceert 1667 kWh aan elektriciteit, hetgeen 15,4 GJ primaire brandstofinzet bespaart. De totale besparing komt op 17%.



Figuur 12 Energiestroomdiagram voor een Stirlingmotor-micro-wkk met boiler. In vergelijking met het vorige voorbeeld is iets meer aardgas nodig, maar omdat de Stirlingmotor de volledige tapwatervraag dekt, is er een flinke toename in de elektriciteitsproductie. De totale besparing komt in dit voorbeeld uit op 25%.

houden we daarvoor 39% aan. Voor iedere x kWh elektriciteit die door een micro-wkk wordt geleverd, wordt een hoeveelheid $x / \eta_{centrale}$ aan primaire energie uitgespaard.

In de voorbeelden van figuur 11 en figuur 12 hebben we een thermische efficiency van 80% en een elektrische efficiency van 15% op bovenwaarde. Het equivalent rendement wordt dan

$$\eta_{equiv} = \frac{80\% + 15/0,39}{100} = 118\%$$

7.3.2 De brandstofcel

In potentie is een brandstofcel een interessante energieopwekker. Omdat er geen bewegende delen zijn, is er nauwelijks onderhoud nodig en door de directe chemische omzetting kan het rendement zeer hoog worden. In de praktijk is het echter lastig om een betrouwbare en robuuste brandstofcel te bouwen. De eisen die aan het membraan en de overige componenten gesteld worden, zijn zeer hoog. Zeker voor SOFC-cellen, die op een hoge temperatuur werken, zijn de bedrijfscondities zwaar. Degradatie van de *stack* vermindert het rendement en het elektrisch vermogen. Mede hierdoor heeft het lang geduurd voordat de eerste brandstofcellen (semi)commercieel beschikbaar kwamen. Nu moeten brandstofcellen zich in langdurige praktijktesten bewijzen. De eerste testen laten al zien dat een zeer hoog elektrisch rendement op basis van Nederlands aardgas vrijwel zonder storingen mogelijk is.

Een nadeel van brandstofcellen is de hoge prijs. Door gebruik van productiemethodes voor kleine aantallen (soms handmatige productie) en exotische materialen wordt een brandstofcel al snel duur. Naar verwachting zullen in de nabije toekomst de prijzen van brandstofcellen echter nog flink dalen.

Bij de toepassing van een brandstofcel in een woning moet rekening gehouden worden met de specifieke eigenschappen van het apparaat. Een brandstofcel is zwaar en groot vergeleken met een HR-ketel. Belangrijk is dat de warmte- en elektriciteitsproductie goed passen bij de betreffende woning. Een brandstofcel produceert immers bij een gegeven warmteproductie veel meer elektriciteit dan andere micro-wkk-opties. Voor woningen met een kleine warmtevraag (kleine woningen of

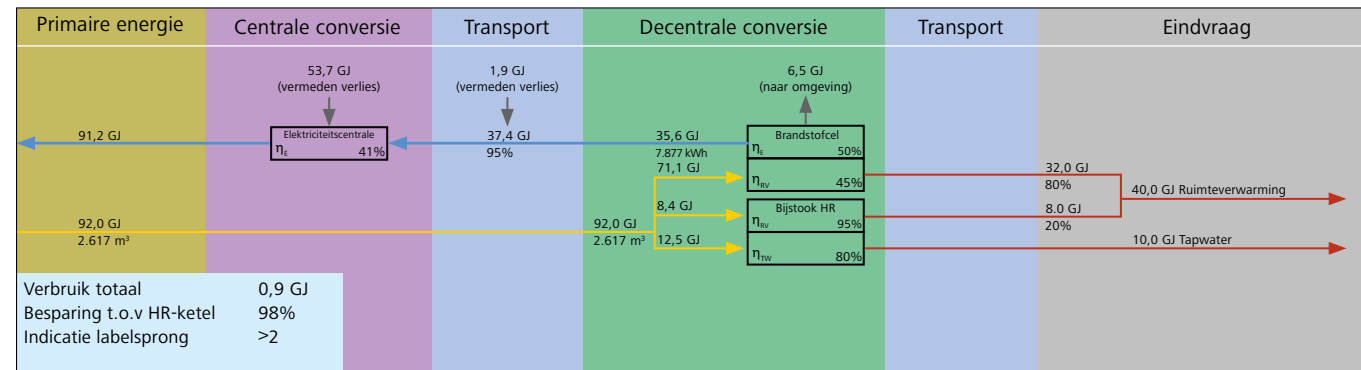
goed geïsoleerde nieuwbouw) is daardoor de elektriciteitsproductie toch substantieel. Daarom past een brandstofcel energetisch gezien beter bij de energievraag van nieuwbouwwoningen dan bij die van bestaande woningen. Voor woningen met een grote warmtevraag is het thermisch vermogen van de brandstofcel aan de krappe kant. Om te kunnen voldoen aan de warmtevraag is een combitoestel of een solotoestel met een extra grote buffer noodzakelijk.

De hoge elektrische efficiency kan organisatorische problemen veroorzaken in woningen met een grotere warmtevraag. Als een brandstofcel in een gemiddelde woning wordt geregeld op basis van de warmtebehoefte is de bijbehorende elektriciteitsproductie zo groot dat deze niet in de woning zelf gebruikt zal worden. Het overschot aan elektriciteit vloeit dan terug naar het openbare elektriciteitsnet. Het is echter nog niet duidelijk hoe de spelers op de elektriciteitsmarkt (energieleverancier, netbeheerder, overheid) zullen omgaan met de structurele teruglevering door brandstofcel-wkk's.

Prestaties

De energiebesparing die met een brandstofcel behaald kan worden, is groot. De elektrische efficiency van een brandstofcel kan hoger zijn dan die van een gemiddelde elektriciteitscentrale. Als zo een kwalitatief hoogwaardige brandstofcel wordt aangeschakeld om te voldoen aan een bepaalde warmtevraag, levert dit tegelijkertijd een flinke hoeveelheid elektriciteit op. Aangezien alleen al deze elektriciteitsproductie energie bespaart ten opzichte van een gemiddelde centrale, kost de warmteproductie in feite geen extra brandstof.

Figuur 13 op pagina 92 geeft een rekenvoorbeeld. Voor de productie van tapwater en ruimteverwarming is een bepaalde hoeveelheid aardgas nodig. Tegelijkertijd wordt zoveel elektriciteit geproduceerd dat de besparing ten opzichte van een elektriciteitscentrale méér is dan het verbruikte aardgas! De brandstofcel levert netto energie op.



Figuur 13 Energiestroomdiagram voor een brandstofcel. De uitgespaarde energie in de elektriciteitscentrale is bijna net zo groot als de benodigde hoeveelheid aardgas. De besparing is daardoor bijna 100%. Natuurlijk wordt de besparing kleiner naarmate de gemiddelde elektriciteitscentrale in Nederland een beter rendement krijgt, maar op dit moment (2011) geeft deze figuur wel degelijk een reëel beeld.

7.4 Combinaties met andere concepten

Een micro-wkk kan goed worden gecombineerd met andere verwarmingsconcepten. Zoals in paragraaf 7.1 al is besproken, bestaat een micro-wkk meestal standaard uit een deel dat elektriciteit én warmte produceert (het eigenlijke wkk-gedeelte) en een normale ketel voor de pieklast. Naast deze standaardsituatie zijn er echter nog verschillende mogelijkheden om te combineren met andere energievoorzieningen. Indien mogelijk is de eerste stap op weg naar energiebesparing het reduceren van de vraag. In woningen kan de warmtevraag worden verminderd door isolatiemaatregelen toe te passen. In sommige gevallen is het echter uit praktisch of financieel oogpunt niet mogelijk of wenselijk om verregaand te isoleren. Woningen waar dat het geval is, zullen ook op middel-lange termijn nog een grote warmtevraag houden.

Voor woningen met een grote warmtevraag moet meestal gebruikgemaakt worden van hogetemperatuurverwarming om voldoende vermogen te kunnen leveren. Daarnaast moet de verhouding tussen elektrische en thermische productie van een micro-wkk passen bij de woning. Voor woningen met een hoge warmtevraag zijn daarom technieken geschikt met een relatief laag elektrisch rendement, zoals de Stirlingmotor of de gasmotor.

Voor woningen met een lage warmtevraag komen micro-wkk's in aanmerking met een lage thermische productie en een flink

elektrisch rendement: brandstofcellen. Ook warmtepompen kunnen in dergelijke woningen goed worden ingezet.

Zon-thermisch

Veel micro-wkk's zijn niet ingericht voor het verwarmen van tapwater. Indien zonnewarmte wordt ingezet voor het aanmaken van warm tapwater, is dat een goede aanvulling op micro-wkk. De micro-wkk en de zonne-installatie zitten elkaar totaal niet in de weg.

In systemen waarbij de micro-wkk ook het tapwater verwarmt, concurreren zon-thermisch en micro-wkk met elkaar. Vaak zal de behoefte aan tapwater in de zomer echter relatief klein zijn ten opzichte van de totale warmtevraag gedurende het jaar. Zeker in bestaande woningen, die slechter geïsoleerd zijn dan nieuwbouwwoningen, is dit het geval. De micro-wkk zal dan in de zomer weinig draaiuren maken door de aanwezigheid van de zonneboiler, maar als geheel is het systeem energetisch gezien efficiënter omdat vrij beschikbare zonnewarmte gebruikt wordt.

In collectieve wkk-systemen¹⁹, waarbij een woongebouw met meerdere appartementen van warmte wordt voorzien, ligt de situatie anders. De warmwaterbehoefte is voor zulke systemen meestal een leidende ontwerpvoorwaarde. Als in een significant deel van deze warmwatervraag zou worden voorzien met zonne-

collectoren, kan de wkk te weinig draaiuren maken en is het niet rendabel om deze te installeren.

Zon-PV

Zonnepanelen (zon-PV) voor het opwekken van elektriciteit kunnen een goede aanvulling vormen op micro-wkk. De elektriciteitsproductie van een micro-wkk is normaal gesproken voor een standaard-huishouden niet voldoende om in de complete behoefte te voorzien. Zonnepanelen kunnen probleemloos elektriciteit produceren, zonder dat grote overschotten ontstaan. Sterker nog, omdat zonnepanelen juist veel elektriciteit maken als er geen warmtevraag is (namelijk in de zomer), zijn de productieprofielen van micro-wkk en zon-PV ruwweg complementair: als het ene apparaat weinig oplevert, levert het andere juist veel elektriciteit.

Warmtepompen

Een micro-wkk levert de grootste besparing op als hij veel draaiuren maakt. Dat geldt in principe voor alle zuinige warmteopwekkers. Daarom moet goed worden bekeken of uit financieel oogpunt het combineren van meerdere opwekkers mogelijk is. Energetisch gezien kan echter wel flink worden bespaard door een slimme combinatie van wkk en een warmtepomp. Een wkk kan een warmtepomp aandrijven, direct of via zijn elektriciteitsproductie. Er is dan warmte beschikbaar uit de wkk, maar ook via de warmtepomp. Deze gecombineerde systemen zijn nog volop in ontwikkeling en zijn momenteel nog niet beschikbaar in vermogens die geschikt zijn voor individuele woningen.

Ook op wijkniveau kunnen wkk en warmtepompen een voordeel opleveren. Een warmtepomp verbruikt vrij veel elektriciteit, juist op momenten dat de warmtevraag groot is. Op diezelfde momenten zal ook een micro-wkk maximaal draaien en daarbij elektriciteit produceren. In een wijk waar veel wkk's en veel warmtepompen naast elkaar gebruikt worden, zal de totale elektriciteitsvraag vlakker zijn dan in een buurt waar alleen wkk's of alleen warmtepompen geïnstalleerd zijn. Het gezamenlijk toepassen van wkk's en warmtepompen kan daardoor meehelpen de belasting van het elektriciteitsnet te beperken.

Elektrische auto's

Elektrische auto's produceren zelfstandig geen energie. Toch kunnen ze een belangrijke rol spelen in de energiehuishouding

van woningen, met name door de opslagcapaciteit die hun accu's bieden. De elektriciteitsproductie van een micro-wkk is niet gemakkelijk te sturen, omdat de micro-wkk warmtevolgend wordt ingezet. Het kan dus voorkomen dat de wkk elektriciteit produceert die niet direct in de woning gebruikt kan worden. Deze elektriciteit kan worden geleverd aan het openbare elektriciteitsnet, maar als de elektriciteit direct ter plaatse gebruikt wordt om een elektrische auto op te laden, is dit efficiënter.

Behalve als een elektrische auto volledig geladen of onderweg is, kan de accu in principe op ieder moment van de dag geladen worden. Door slimme aansturing kan de auto daarom preferent geladen worden als er elektriciteit uit de micro-wkk beschikbaar is.

7.5 Verwachte ontwikkelingen

De micro-wkk vormt een nog jonge ontwikkeling binnen de verwarmingsindustrie. Er is dan ook nog een flinke ontwikkeling mogelijk en naar verwachting zal de toepassing van micro-wkk in de komende jaren eenvoudiger, efficiënter en goedkoper worden.

De verwachte ontwikkelingen kunnen in vijf groepen worden ingedeeld:

Nieuwe technologie

Een forse verbetering van de prestaties van micro-wkk mag worden verwacht door de introductie van nieuwe technologie. De huidige standaard is de Stirlingmotor, maar met gasmotoren en in de toekomst brandstofcellen is een beduidend hoger elektrisch rendement mogelijk.

Installatiegemak

Bij de installatie en aansluiting van micro-wkk's zijn nog verbeteringen mogelijk. Naast de gewichtsproblemen bij Stirlingmotoren is er bij installateurs nog een gebrek aan ervaring met micro-wkk's. Naarmate meer toestellen geplaatst worden, zal de ervaring toenemen en zal het installeren steeds efficiënter kunnen plaatsvinden.

Ook de regelingen voor micro-wkk's zullen naar verwachting nog beter worden. Er worden momenteel al proefprojecten uitgevoerd met regelingen die hun productie niet alleen afstemmen op

bewonersgedrag en weersomstandigheden, maar die ook rekening houden met de actuele elektriciteitsprijzen, om economisch zo gunstig mogelijk te kunnen produceren.

Rendementsverbetering

Binnen iedere technische optie zijn nog rendementsverbeteringen te verwachten. Bij Stirlingmotoren en gasmotoren zal het elektrisch rendement door verregaande optimalisering nog iets verhoogd kunnen worden. Bij brandstofcellen is onder laboratoriumomstandigheden het rendement al zeer hoog, maar het is de kunst om dit rendement ook over langere periodes onder realistische omstandigheden op peil te houden.

Daarnaast is de efficiency van de warmteproductie een belangrijk aspect. Hoewel de warmte die vrijkomt bij elektriciteitsproductie in principe vrij beschikbaar is, moet deze nog wel op een effectieve manier uit het apparaat worden gehaald door middel van warmtewisselaars. Verlies van warmte via de rookgassen of straling naar de omgeving moet zo veel mogelijk voorkomen worden. Ketelfabrikanten hebben traditioneel veel ervaring met 'warmte-uitkoppeling'. Een goede samenwerking tussen de producenten van de eigenlijke wkk-bron (Stirlingmotor, gasmotor, brandstofcel etc.) en de ketelfabrikanten, die daaromheen een compleet apparaat moeten bouwen, is essentieel.

Vergroening

De huidige generatie micro-wkk's loopt op aardgas, of in een enkel geval op waterstof. Door op termijn steeds meer duurzaam gas (bijvoorbeeld biogas uit een rioolwaterzuiveringsinstallatie) in te zetten, kan de CO₂-uitstoot nog eens flink worden verminderd. Omgekeerd is het verstandig om duurzaam gas zo effectief mogelijk in te zetten: liever in een wkk dan in een ketel dus.

Kostenbesparing

Als laatste aspect wordt hier kostenbesparing genoemd. Kostenbesparing is met name voor micro-wkk's een belangrijke factor. Omdat de technieken relatief jong zijn, bevinden veel projecten zich in een proef- of ontwikkelingsfase. Dit gaat gepaard met veel handwerk en extra aandacht. Als de vraag naar micro-wkk zal toenemen, kan ook de productie worden opgeschaald waardoor de kosten significant kunnen dalen ten opzichte van de huidige situatie. ■

Hoofdstuk 8

Warmtepompen

Bijna iedereen heeft een warmtepomp in huis: een koelkast. Dit apparaat pompt warmte uit de gekoelde ruimte en geeft die warmte af aan de lucht in de keuken. Daarvoor is aandrijfenergie nodig in de vorm van elektriciteit voor de compressor. Een warmtepomp is dus niet zozeer een warmteopwekker, maar een warmteverplaatser. Omdat verplaatsen minder energie kost dan opwekken, bespaart de warmtepomp energie.

8.1 Het principe van de warmtepomp

Bij wijze van gedachte-experiment kunnen we de koelkast in een muur onder een raam opnemen (zie figuur 1), met de opening naar buiten en de deur verwijderd. De koelkast koelt dan de omgeving (neemt daarbij de warmte $Q_{omgeving}$ op) en heeft daar de hoeveelheid elektriciteit $P_{elektrisch}$ voor nodig. Uit de wet van behoud van energie²⁰ volgt dan dat de warmtehoeveelheid die het zwarte rooster achter op de koelkast aan de binnenlucht afgeeft gelijk is aan

$$Q_{nuttig} = Q_{omgeving} + P_{elektrisch}$$

Hieraan is direct te zien dat de warmtepomp energie bespaart: Q_{nuttig} is groter dan $P_{elektrisch}$, dus het rendement van de warmtepomp, dat we aanduiden met COP (*coefficient of performance*), is gelijk aan:

$$COP_{verwarming} = \frac{Q_{nuttig}}{P_{elektrisch}} > 1$$

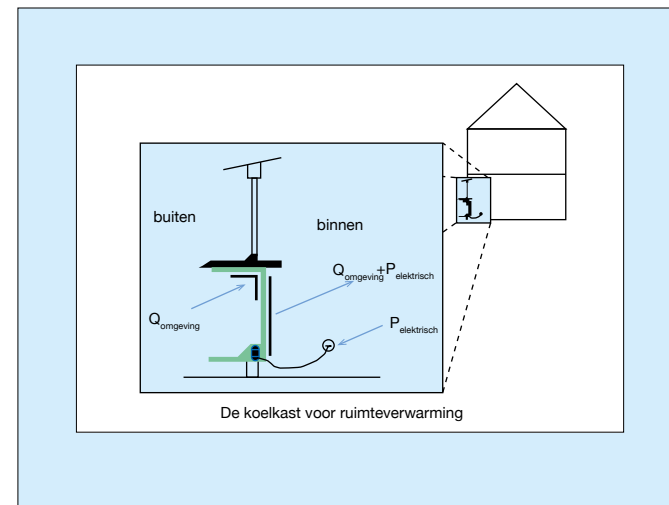
Dat het rendement groter is dan 1 (of 100%), is dus niet in strijd met de wet van behoud van energie, maar volgt er juist uit. Het rendement is groter dan 1 omdat de gratis omgevingswarmte $Q_{omgeving}$ naar binnen wordt gepompt en daarmee nuttig wordt.

Deze redenatie kan worden opgesteld zonder precies te weten hoe de technische werking van de warmtepomp is. Daar maken we in de energietechniek vaker gebruik van: door een systeemgrens om een systeem aan te brengen (in dit geval: rond de koelkast) kunnen we meteen checken of het globaal klopt. We kunnen nu ook concluderen dat de warmtepomp niet een

‘omgekeerde koelkast’ is, zoals vaak wordt gezegd. Een warmtepomp en een koelkast zijn in wezen hetzelfde apparaat. Welke naam we gebruiken, hangt af van de functie. Als het om de koude gaat, is het een koelkast of een koelmachine. Gaat het om de warmte, dan is het een warmtepomp. Ook als beide functies gebruikt worden, spreken we in de praktijk van warmtepomp. Het belangrijkste in dat geval is de efficiëntie van het systeem. Bij hetzelfde elektriciteitsgebruik produceert het zowel nuttige warmte als koude. Een interessant voorbeeld hiervan is de warmtepomp die in de winter warmte onttrekt aan de bodem ten behoeve van ruimteverwarming, terwijl de koude die daarbij wordt gegenereerd, wordt opgeslagen en in de zomer direct (zonder tussenkomst van de warmtepomp) kan worden gebruikt voor koeling. Het rendement van zo’n systeem is dan dus, in termen van de hierboven genoemde grootheden:

$$COP_{\text{verwarming en koeling}} = \frac{Q_{\text{nuttig}} + Q_{\text{omgeving}}}{P_{\text{elektrisch}}}$$

Dit rendement is hoger dan $COP_{\text{verwarming}}$. Door een warmtepomp zowel in te zetten voor koeling als voor verwarming, is dus een beter totaalrendement haalbaar.

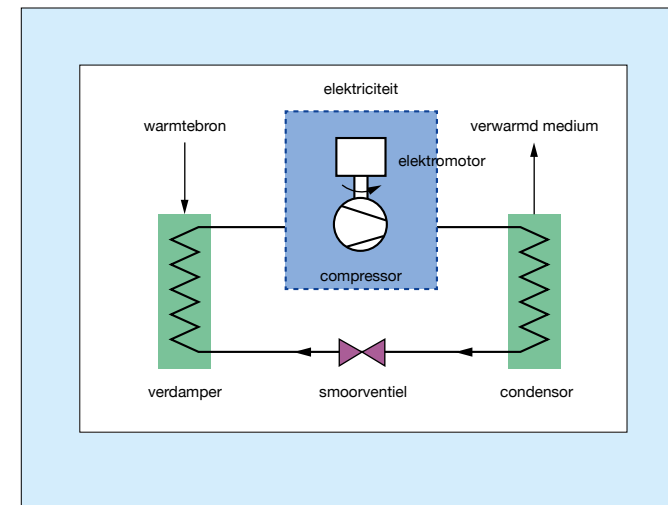


Figuur 1 De koelkast als ruimteverwarmer. Bron: TNO

8.2 De elektrische warmtepomp

De meeste warmtepompen zijn elektrisch aangedreven. De werking is gebaseerd op het verdampen en condenseren van koudemiddel. Deze elektrische warmtepomp wordt nu eerst behandeld; de andere opties komen later aan bod.

In figuur 2 is een kringloop weergegeven waarin een koudemiddel circuleert (met de klok mee). Links staat de verdamper. Dat is een warmtewisselaar waarin het koudemiddel verdampt onder opname van warmte uit de warmtebron. Daar is de koelfunctie gelokaliseerd. Het verdampte koudemiddel wordt aangezogen door de compressor, in druk verhoogd en naar de condensor gebracht. Dat is een warmtewisselaar waar het koudemiddel condenseert onder afgifte van warmte aan het ‘verwarmde medium’ (bijvoorbeeld water dat in de vloerverwarming circuleert). Tenslotte stroomt het koudemiddel terug naar de verdamper via een smoorventiel dat de druk weer reduceert. Omdat de verdampingstemperatuur en de condensatietemperatuur afhangen van de druk, vindt de condensatie in de condensor plaats bij een hogere temperatuur dan de verdamping in de verdamper. De warmte die in de verdamper werd opgenomen, wordt in de condensor bij verhoogde temperatuur weer afgegeven.

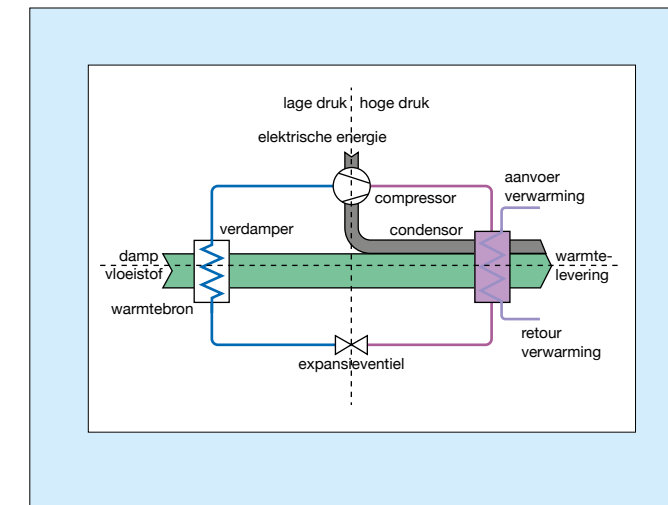


Figuur 2 Principeschema van een elektrische warmtepomp. Bron: TNO

De warmtepomp verplaatst dus verdampingswarmte. Daarbij verlaat, volgens de wet van behoud van energie, ook alle aandrijfenergie van de compressor het systeem als warmte via de condensor. Dit wordt duidelijk in figuur 3, waar op de achtergrond van de kringloop ook het bijbehorende Sankeydiagram is getekend.

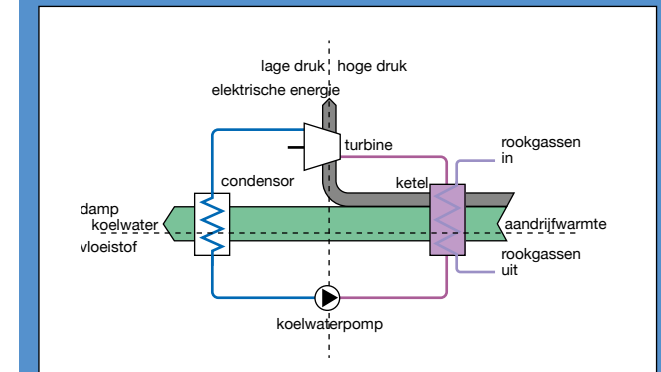
In deze figuur is ook te zien hoe het systeem is verdeeld in een hogedrukdeel (rechts) en een lagedrukdeel (links). Hoe groter het verschil in druk, des te groter is het overbrugde temperatuurverschil tussen bron en afgiftesysteem (de zogeheten ‘temperatuurlift’ van de warmtepomp), én des te groter het energiegebruik van de compressor. Hieruit volgt dat het rendement van de warmtepomp het hoogst is als de temperatuurlift zo klein mogelijk is. Daarmee is duidelijk dat warmtepompen bij voorkeur moeten worden toegepast met systemen voor lagetemperatuurverwarming (LTV) en dat we moeten zoeken naar een warmtebron met een zo hoog mogelijke temperatuur.

Tenslotte laat figuur 3 zien dat het koudemiddel in de bovenste helft van de kringloop als damp circuleert en in de onderste helft als vloeistof. In de compressor wordt de druk verhoogd doordat het koudemiddel wordt samengedrukt. Hier wordt dus arbeid aan de kringloop toegevoegd in de vorm van elektrische energie.



Figuur 3 Elektrische warmtepomp met Sankeydiagram. Bron: TNO

Van warmtepomp naar wkk



Figuur 4 Krachtcyclus met Sankeydiagram. Bron: TNO

Hiervoor werd al verwezen naar het misverstand dat de warmtepomp een omgekeerde koelkast zou zijn. Dat is niet zo. Het is echter wel een omgekeerde krachtcyclus. In figuur 4 is op dezelfde manier als de warmtepomp in figuur 3 een krachtcyclus getekend. Figuur 4 ontstaat uit figuur 3 door alle massa- en energiestromen om te draaien. De gebieden met hoge en lage druk en met damp versus vloeistof zijn hetzelfde gebleven. Voor de overgang van figuur 3 naar figuur 4 geldt het volgende:

- De elektriciteit leverende turbine komt in de plaats van de elektriciteit gebruikende compressor.
- De krachtcyclus heeft warmte nodig van zo hoog mogelijke temperatuur.
- De krachtcyclus heeft koelwater nodig met een zo laag mogelijke temperatuur.
- Het feit dat een grote temperatuurval bij een krachtcyclus veel elektriciteit oplevert is in lijn met het gegeven dat een warmtepomp bij een grote temperatuurlift veel elektriciteit verbruikt.
- Een krachtcyclus wint aan waarde als de warmte in het koelwater nuttig gebruikt wordt. Dan is er sprake van een wkk-systeem, zie hoofdstuk 7.

Voor het theoretisch rendement van de krachtcyclus geldt volgens Carnot:

$$\eta_{\text{krachtcyclus, Carnot}} = \frac{T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}}}{T_{\text{hoog}} + 273,15}$$

Dat is het omgekeerde van het theoretisch rendement van de warmtepomp.

Schatting van de COP van elektrische warmtepompen

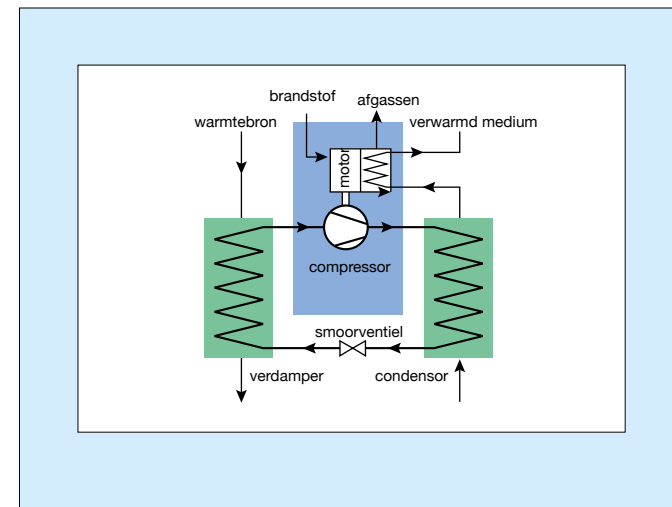
Een allereerste schatting van het rendement van een warmtepomp kan worden gemaakt op basis van het rendement van Carnot. Dat is een basisformule uit de thermodynamica waarbij alleen de twee temperaturen van condensor en verdamper een rol spelen:

$$COP_{WP,Carnot} = \frac{T_{condensor} + 273,15}{T_{condensor} - T_{verdamper}}$$

Dit rendement geldt voor een theoretisch verliesvrij systeem. Een reële warmtepomp haalt ongeveer 50 tot 60% van dit rendement:

$$COP_{WP,reeel,schatting} = 0,6 \frac{T_{condensor} + 273,15}{T_{condensor} - T_{verdamper}}$$

Aan deze formule is te zien dat de COP omgekeerd evenredig is met de temperatuurlift $T_{condensor} - T_{verdamper}$. Dit laat nogmaals zien dat warmtepompen bij voorkeur gebruikt moeten worden in combinatie met LTV-systemen. Meer over temperaturniveaus in paragraaf 8.6 (warmtebronnen) en in paragraaf 5.2.2 (afgiftesystemen).



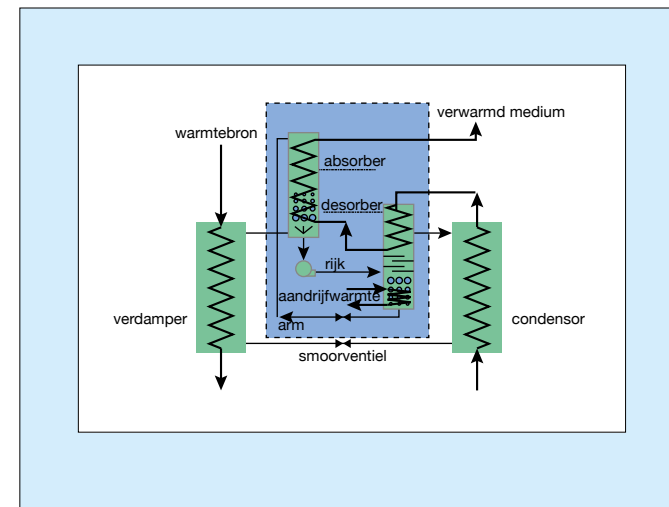
Figuur 5 Principeschema van een gasmotorwarmtepomp. Bron: TNO

8.3 Andere typen warmtepompen

Onder de niet-elektrische warmtepompen zijn er veel die ook met een verdampend koudemiddel werken. De verschillen zitten dan in de compressiefunctie. Deze warmtepompen kunnen in feite ook weergegeven worden met een opzet als in figuur 2, waarbij het blauwe blok (met de compressor) anders is ingevuld. De overige componenten zijn hetzelfde. Gasgedreven warmtepompen zijn de belangrijkste van de niet-elektrische warmtepompen. Ze worden hieronder behandeld. Aan gaswarmtepompen is ook een apart deel van deze boekenserie gewijd [GasTerra, 2010].

8.3.1 De gasmotorwarmtepomp

Figuur 5 geeft schematisch de werking van de gasmotorwarmtepomp weer. In plaats van een elektromotor is er nu een gasmotor die de compressor aandrijft. De gasmotorwarmtepomp verbruikt dus geen elektriciteit maar aardgas. Het voordeel is dat de restwarmte die vrijkomt in de gasmotor nuttig gebruikt kan worden. In de figuur stroomt daarom het in de condensor opgewarmde medium ook langs de gasmotor, waar het warmte opneemt uit het koelwater en de rookgassen van de motor. Let hierbij op de goede volgorde. De warmtepomp functioneert het beste bij een lage afgiftetemperatuur. Daarom stroomt het op te warmen medium éérst door de condensor en daarna door de gasmotor.



Figuur 6 Principeschema van een gasabsorptiewarmtepomp. Bron: TNO

8.3.2 De gasabsorptiewarmtepomp

In figuur 6 is het blauwe compressieblok ingevuld met een thermochemische compressor. In dit geval is de aandrijfenergie warmte. Met deze warmte wordt in een kookvat (de desorber of generator) bij hoge druk koudemiddeldamp uitgekookt uit een oplossing. Vaak bestaat deze oplossing uit ammoniak (het koudemiddel) en water (het oplosmiddel of de 'absorbens'). De damp doorloopt de condensor (hoge druk), het expansieventiel en de verdamper (lage druk), zoals eerder beschreven. De lage-druk-damp uit de verdamper wordt vervolgens bij lage druk in de absorber weer geabsorbeerd door het oplosmiddel. Daarbij komt warmte vrij. Er ontstaat een rijke oplossing (rijk aan koudemiddel) die met een vloeistofpomp getransporteerd wordt naar de generator, waar de koudemiddeldamp weer wordt uitgekookt. De arme oplossing die daarbij ontstaat, gaat via een expansieventiel vast naar de absorber.

Hoewel de thermochemische compressor een lager rendement heeft dan een mechanische compressor, heeft de absorptiewarmtepomp een aantal belangrijke voordelen:

- In plaats van met aardgas, kan de absorptiemachine ook met (duurzame) warmte of restwarmte worden aangedreven. De benodigde temperatuur van de aandrijfwarmte is bij een absorptiewarmtepomp gekoppeld met de temperaturen in verdamper en condensor. Bij een lagere (hogere) temperatuurlift ($T_{condensor} - T_{verdamper}$) zal de temperatuur van de aandrijfwarmte lager (hoger) zijn. Zo kan men bijvoorbeeld met warmte uit de stadsverwarming (100 tot 120 °C) in de zomer gebouwen koelen. Met warmte uit zonnecollectoren (60 °C) koelt men in de tropen voorraden medicijnen.
- Afgezien van de vloeistofpomp heeft de absorptiewarmtepomp geen bewegende delen. Daardoor kent dit type warmtepomp weinig slijtage (en dus een lange levensduur bij gering onderhoud). Ook functioneert hij geruisloos. Mede daarom wordt het absorptieprincipe veel toegepast in koelkasten voor hotelkamers en caravans.

8.4 Besparing op primaire energie

De energiebesparingen die in woningen haalbaar zijn met warmtepompen, worden geïllustreerd in de energiestroomdiagrammen op de volgende pagina's. Daarbij hebben wij een aantal keuzes gemaakt voor rendementen en andere grootheden, zoals in tabel 1 is weergegeven. De rendementen van de warmtepompen zijn

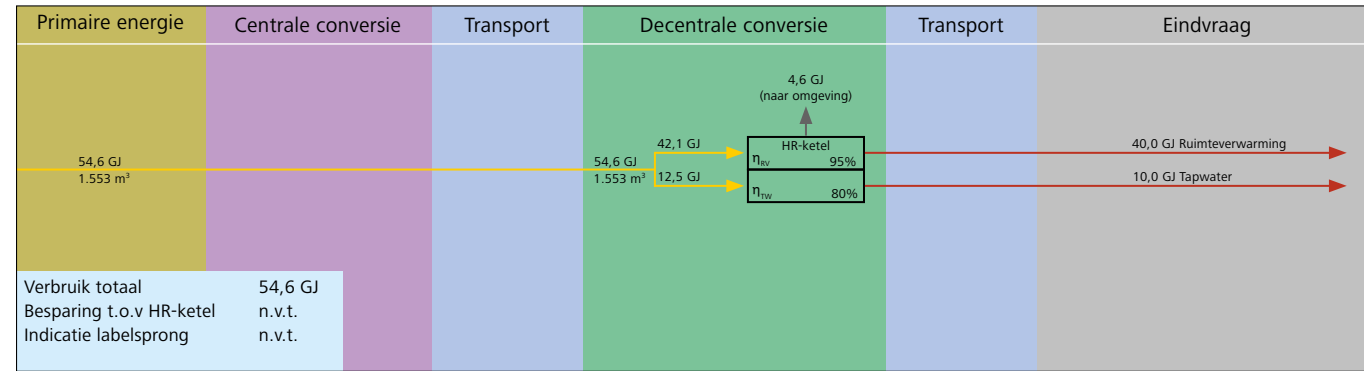
Grootheid		Waarde	Dimensie
Warmtevraag	Ruimteverwarming	40	GJ _{th} /jaar
	Warm Tapwater	10	GJ _{th} /jaar
Aardgas	Transport	$\eta_{transport, aardgas}$	$\frac{GJ_{aardgas}}{GJ_{aardgas}}$
Elektriciteit	Opwekking	η_E	$\frac{GJ_{el}}{GJ_{primair}}$
	Transport	$\eta_{transport, el}$	$\frac{GJ_{el}}{GJ_{el}}$
HR-ketel	Ruimteverwarming	η_{RV}	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{aardgas}}$
	Warm tapwater	η_{TW}	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{aardgas}}$
Elektrische WP	Ruimteverwarming	COP_{RV}	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{el}}$
	Warm tapwater	COP_{TW}	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{el}}$
Gasmotor	Kracht	$\eta_{elektrisch}$	$\frac{GJ_{el}}{GJ_{primair}}$
	Warmte	η_{warmte}	$\frac{GJ_{el}}{GJ_{primair}}$
Elektrische bijstook		$COP_{bijstook}$	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{el}}$
Absorptiewarmtepomp		η_{RV}	$\frac{GJ_{th}}{GJ_{aardgas}}$

Tabel 1 Aannamen voor energiestroomdiagrammen.

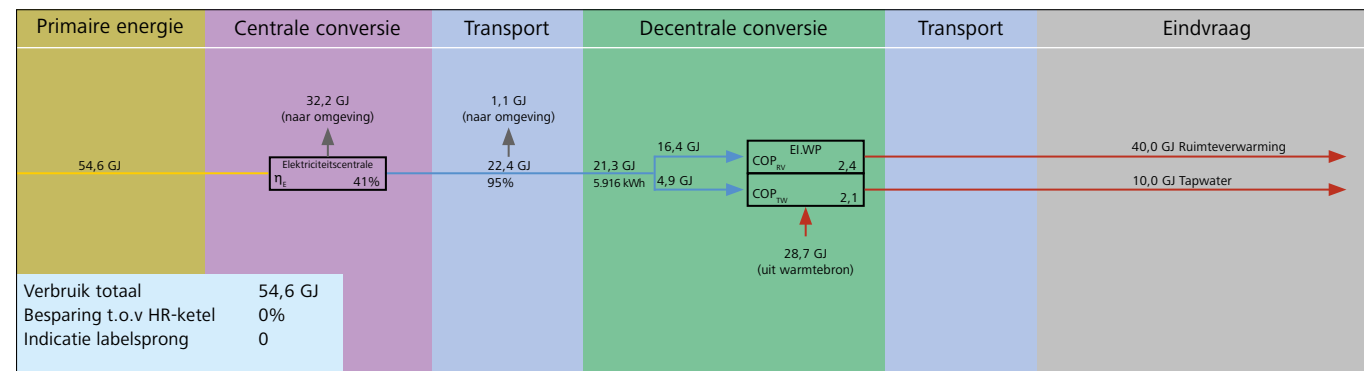
all-in, dus inclusief het energiegebruik van pompen, ventilatoren, regeling en dergelijke. Overigens zijn de prestaties van warmtepompsystemen niet alleen van de warmtepomp zelf, maar nog sterker van het totale systeem afhankelijk, zoals hierna in paragraaf 8.8 wordt uiteengezet.

Figuur 7 op pagina 102 toont om te beginnen het energiestroomdiagram van het referentiesysteem, de HR-ketel. Ook in dit hoofdstuk worden alle besparingsopties vergeleken met de HR-ketel. De figuur laat zien dat de primaire energie in dit geval rechtstreeks naar de woning wordt getransporteerd en daar in een HR-combiketel de gevraagde warmte voor ruimteverwarming en warm tapwater genereert.

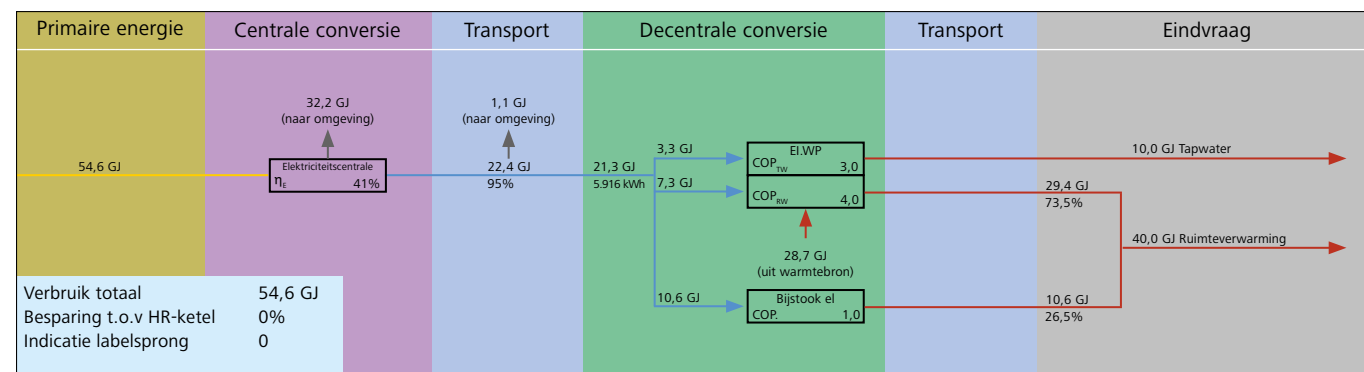
In figuur 8 op pagina 102 is een elektrische warmtepomp te zien met $COP_{RV} = 2,4$ en $COP_{TW} = 2,1$. We zien dat bij deze grenswaarden en bij een centraal opwekkingsrendement voor elektriciteit van 0,41 (op bovenwaarde) de besparing op primaire energie ten opzichte van de HR-ketel gelijk is aan nul. Kennelijk compenseert de warmtepomp in dit geval precies de verliezen die bij de elektriciteitscentrale (en bij het transport van elektriciteit) optreden. Dat is ook te zien aan het feit dat de warmtepomp via zijn bron ongeveer de warmte uit de omgeving haalt die de centrale erin stopt (het verschil is gelijk aan het verlies van de HR-ketel in figuur 7). Om energie te besparen moet kennelijk de warmtepomp beter presteren dan in figuur 8. Of het rendement van de centrale moet omhoog.



Figuur 7 Energiestroomdiagram van het referentiesysteem: de HR-ketel.



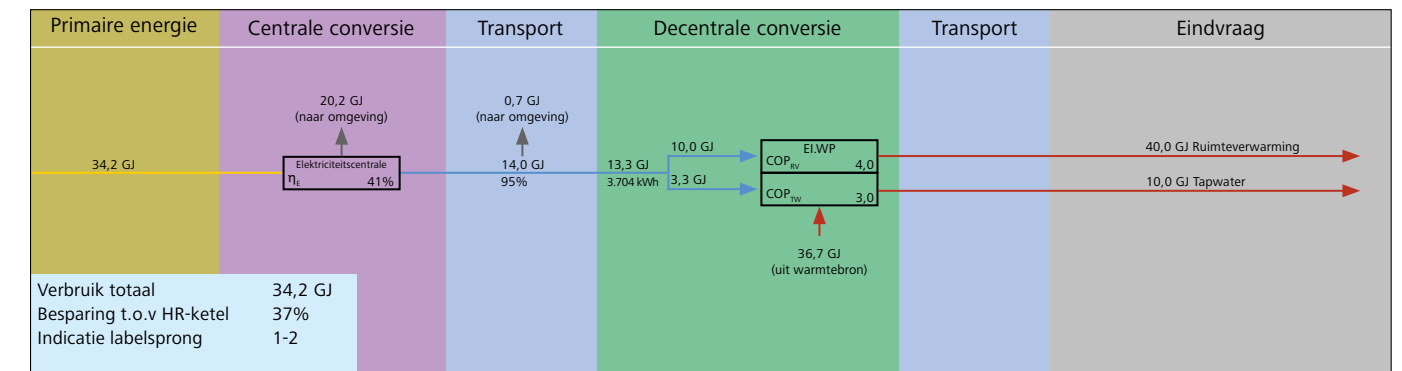
Figuur 8 Grensgeval waarbij monovalente warmtepomp juist de verliezen in de elektriciteitscentrale compenseert.



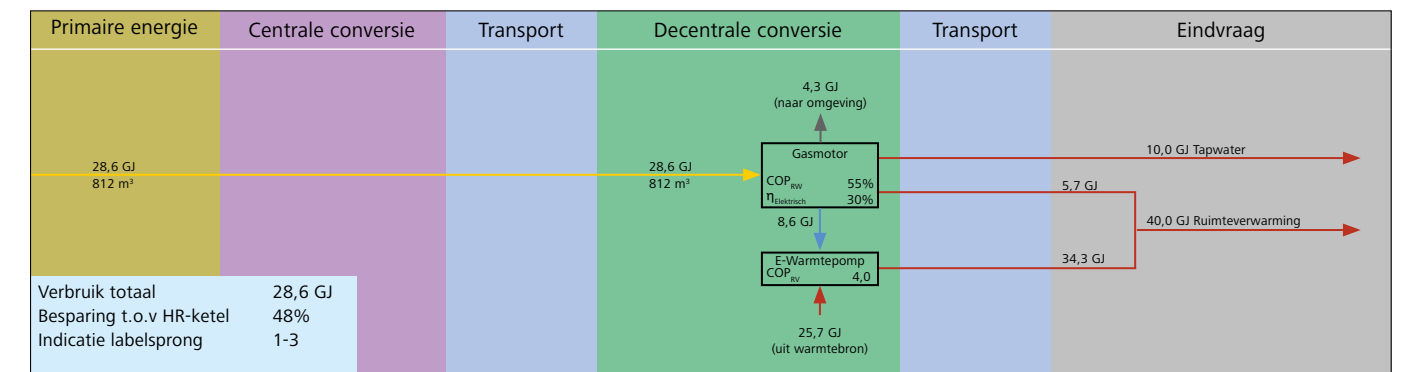
Figuur 9 Grensgeval van een bivalente warmtepomp, waarbij de elektrische hulpstook de besparing van de warmtepomp teniet doet.

In figuur 9 is een ander grensgeval te zien. Hier is een elektrische warmtepomp met typische gemiddelde waarden voor de COP_{rv} en de COP_{tw} opgenomen in een zogeheten bivalent systeem. Omdat warmtepompen relatief duur zijn en bij een relatief kleine capaciteit al een groot deel van de jaarlijkse warmtevraag kunnen leveren, worden zij vaak met kleine capaciteit geïnstalleerd (bijvoorbeeld 50% van de maximale vraag). Wanneer de rest van de benodigde capaciteit (de 'hulpstook') wordt uitgevoerd in de vorm van elektrische weerstandsverwarming, kan dit desastreuze gevolgen hebben voor de totale energiebesparing. In figuur 9 is het grensgeval aangegeven met 0% besparing ten opzichte van de referentie. Wanneer de elektrische hulpstook een aandeel heeft van 26,5% in de warmtevraag voor ruimteverwarming,

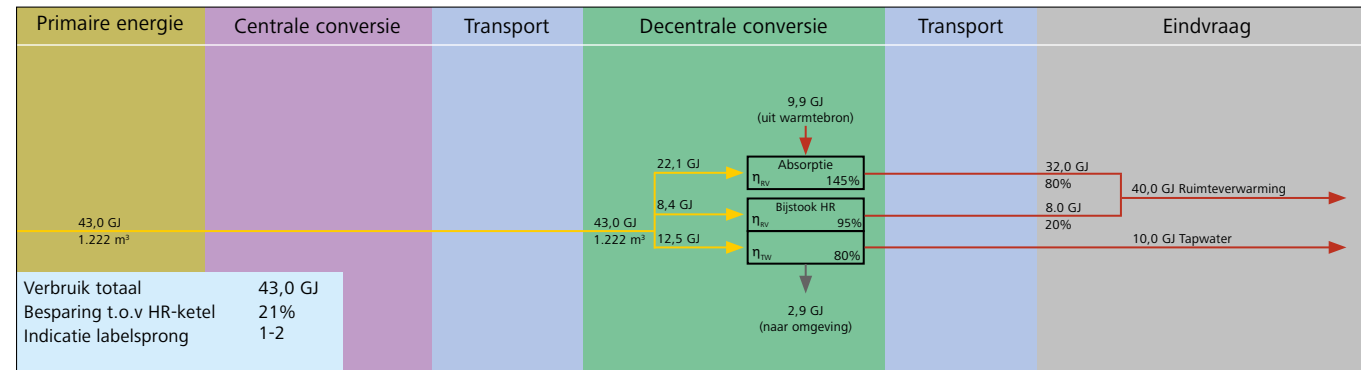
wordt bij de gegeven aannamen de besparing door de warmtepomp tot nul gereduceerd. Wordt het aandeel van de hulpstook groter, dan is de besparing zelfs negatief. Figuur 10 geeft een meer realistisch voorbeeld van een monovalent systeem. Dit systeem realiseert een besparing op primaire energie van 37%. Deze besparing is geen bovengrens: Wanneer de COP van de warmtepomp hoger is (bijvoorbeeld door het toepassen van een lagere temperatuur in het afgiftesysteem), wordt het totale resultaat navenant beter. In paragraaf 8.8 worden deze grenzen nader aangeduid. Uit systeem oogpunt is het jammer dat de restwarmte uit de elektriciteitscentrale niet wordt benut. Benutting van restwarmte is wel mogelijk als we een gasmotor-warmtepomp (figuur 11) gebruiken.



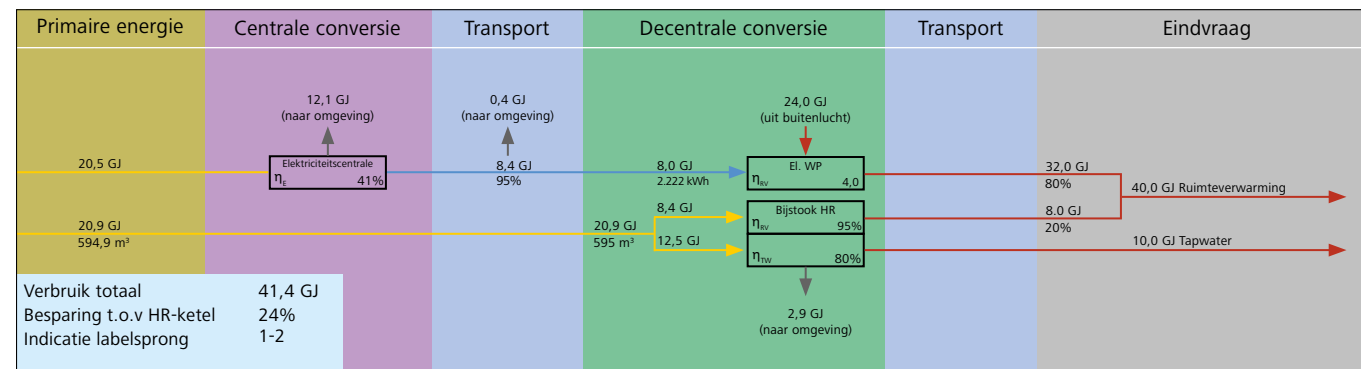
Figuur 10 Representatieve monovalente elektrische warmtepomp.



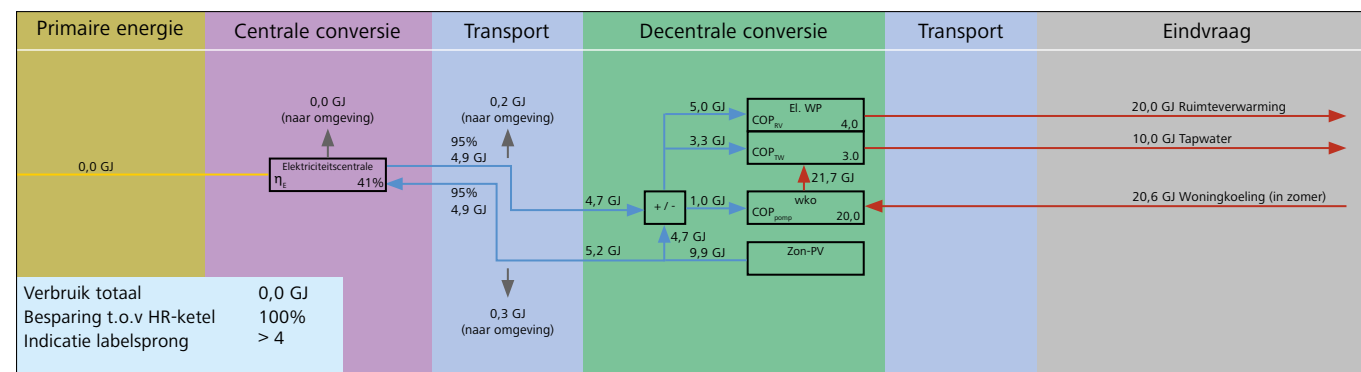
Figuur 11 Energiestroomdiagram van een installatie met gasmotorwarmtepomp.



Figuur 12 Energiestroomdiagram van een bivalente installatie met gasabsorptiewarmtepomp.



Figuur 13 Bivalente elektrische warmtepomp met een HR-ketel als hulpstook.



Figuur 14 Energiestroomdiagram van een mogelijk systeem voor een laag-energiehuis. Getallen op jaarbasis.

Bij de gasmotorwarmtepomp wordt het benodigde mechanische vermogen voor de warmtepomp decentraal geproduceerd. Hoewel dit lokale rendement lager is (hier gesteld op 30%), is het totale effect beter, omdat de restwarmte van de motor groten-deels (op 15 procentpunten na) nuttig wordt gebruikt. De warmte-pomp en de gasmotor draaien gelijktijdig. Daarom dragen beide bij aan de warmte voor zowel ruimteverwarming als warm tapwater.

Gasmotorwarmtepompen bestaan nog niet met zodanig kleine capaciteiten dat zij voor individuele woningen geschikt zijn. Figuur 11 op pagina 103 geeft een mogelijk toekomstige situatie aan. In hoofdstuk 10 wordt de gasmotorwarmtepomp beschreven voor collectieve systemen. Dit geval lijkt natuurlijk op de combinatie van een wkk-installatie en een elektrische warmtepomp, waarbij dan alle geproduceerde elektriciteit naar de warmtepomp gaat.

Een gasabsorptiewarmtepomp functioneert analoog (figuur 12), zij het dat het totale rendement iets lager is. In de figuur is het systeem bivalent uitgevoerd. De warmtepomp voedt het (lage-temperatuur-) verwarmingssysteem. De bijstookketel is uitgevoerd als combi en levert ook het warme tapwater.

Aan het diagram is ook te zien dat gasgestookte warmtepompen in vergelijking met elektrische warmtepompen veel minder warmte uit de warmtebron halen en dus een kleinere warmte-bron nodig hebben. Doordat de warmte-krachtconversie decen-traal plaatsvindt, komt ook de restwarmte van die conversie beschikbaar en kan de warmtepompfunctie (inclusief de warmte-bron) dus kleiner zijn. In de figuren 5 en 6 op pagina 100 is dit te zien: het verwarmde medium wordt niet alleen opgewarmd in de condensor (warmtepompfunctie) maar ook in de gasmotor, respectievelijk de absorber (warmte-krachtfunctie). Tenslotte laat figuur 13 een bivalente elektrische warmtepomp zien met een HR-ketel als hulpstook. Hier komt de besparing op primaire energie uit op 24%. Deze niet zo hoge waarde komt onder meer voort uit het feit dat de tapwatervraag geheel vanuit de bijstook wordt verzorgd.

8.5 Combinaties met andere concepten

In het algemeen zijn warmtepompen goed te combineren met andere energiebesparende componenten. Er zijn diverse redenen om dat te doen. Soms worden hulpstookinrichtingen toegepast om een pieklast die niet zo vaak voorkomt door een goedkoper apparaat te laten

dekken, zodat de (per kW duurdere) warmtepomp kleiner en goed-koper kan worden uitgevoerd. Combinaties met warmtekracht worden toegepast om een gunstiger belasting van het elektriciteitsnet te realiseren. Warmtevraaggestuurde warmtekracht levert namelijk elektriciteit op de momenten dat warmtepompen daarom vragen.

Voor een goed ontworpen warmtepompsysteem is de eerder genoemde trias energetica (hoofdstuk 3) een goed uitgangspunt. Voor woningen houdt dit in:

1. Aandacht besteden aan isolatie, HR++-beglazing, warmteterug-winning uit ventilatielucht, het voorkomen van ongewenste lekventilatie.
2. Inzetten van duurzame energietechnieken (zonneboilers, warmtepompen, zon-PV, windenergie, et cetera).
3. Inzet van (bijvoorbeeld) een HR-ketel voor resterende vraag.

Terwijl de warmtepomp onder stap 2 valt, is stap 1 juist voor de warmtepomp heel belangrijk. In de bestaande bouw zal ten gevolge van isolatiemaatregelen de warmtevraag dalen. Daarmee kan ook de afgiftetemperatuur in het bestaande verwarmings-systeem omlaag. Dit heeft een gunstig effect op de prestaties van de warmtepomp. In de nieuwbouw leidt een lagere warmtevraag tot een kleinere warmtepomp en een kleinere bron, wat een direct investeringsvoordeel met zich meebrengt.

Overigens is het niet verstandig om een zogenaamd 'kerstboom-systeem' (een gecompliceerd systeem met veel componenten) te ontwerpen. Zo'n systeem is ingewikkeld, moeilijk te regelen en waarschijnlijk duurder dan nodig is.

Bij het ontwerpen van gecombineerde systemen is het belangrijk onderscheid te maken tussen parallelle componenten en compo-nenten in serie. Parallelle componenten zitten elkaar vaak in de weg, werken binnen dezelfde besparingsruimte en hebben daar-door een verminderde meeropbrengst. Als we voor verwarming zowel een zonneboiler inzetten als een warmtepomp, vermindert het besparingspotentieel van het ene toestel het potentieel van het andere, waardoor hun individuele haalbaarheid minder wordt.

Componenten in serie versterken elkaar. Een elektrische warmte-pomp, (deels) gevoed door zon-PV is weliswaar duur, maar ook effectief. Ook duurzame energie (zon-PV in dit geval) moet zo effec-tief mogelijk worden ingezet. Stroom uit zonnepanelen inzetten in elektrische weerstandsverwarming is dus niet optimaal.

Een voorbeeld van een gecombineerd systeem is weergegeven in figuur 14 op pagina 104. Het is een mogelijk systeem voor een woning met een laag energiegebruik. De woning is bouwkundig zodanig uitgevoerd dat de warmtevraag voor ruimteverwarming laag is. Deze warmtevraag is in dit voorbeeld gesteld op 20 GJ en wordt ingevuld door een elektrische warmtepomp. Er is ook een koelvraag aangenomen van 20,6 GJ. De bron van de warmtepomp is een systeem voor warmte- en koudeopslag (wko)²¹. Deze wko levert koeling door in de zomer de bodemwarmtewisselaar direct te koppelen aan het afgiftesysteem in de woning, zonder tussenkomst van de warmtepomp. Daarom is de $COP_{koeling} = 20$ van de wko zo hoog: er is alleen een circulatiepomp nodig. Zon-PV zorgt voor de elektriciteit. In het diagram (figuur 14) is aangegeven dat de helft van de elektriciteitsbehoefte en -productie van het systeem gelijktijdig is. De elektriciteit wordt lokaal direct via het +/- punt doorgeleverd. De andere helft wordt ongelijktijdig door de centrale geleverd, respectievelijk teruggeleverd aan het net. De energiehoeveelheden die worden geleverd door het net en aan het net zijn niet precies gelijk. Dit komt door de netverliezen. Op jaarbasis is de elektriciteitslevering door de centrale gelijk aan nul. Het systeem functioneert bij de gratie van het feit dat het elektriciteitsnet een 'gratis' buffer vormt. In dit voorbeeld staat de installatie voor zon-PV in serie met de warmtepomp. Zon-PV levert de aandrijfenergie voor de warmtepomp en is functioneel dus geen concurrent.

Een belangrijk ander principe bij combinaties van concepten is dat de geavanceerde, energiebesparende component, die vaak duur is, niet te groot moet zijn en veel draaiuren moet maken (de zogeheten 'basislast'). Een goedkopere, minder goede component kan dan de pieklast leveren. Zie hiervoor paragraaf 5.5.2.

8.6 Warmtebronnen voor warmtepompen

Toen in Nederland aan het eind van de jaren zeventig van de vorige eeuw de eerste warmtepompen verschenen, gebruikten die de buitenlucht als warmtebron. Dat kwam doordat de techniek toen vooral werd gebruikt voor airconditioning. Buitenlucht was algemeen beschikbaar en goedkoop te exploiteren. Werd de warmtepomp ook ingezet voor verwarming, dan was buitenlucht als bron minder aantrekkelijk: de lucht was het koudst op het moment dat de warmtevraag het grootst was.

Het eerste alternatief dat in beeld kwam, was grondwater. De brontechniek is echter duur, zeker als er ook een retourput nodig is. In sommige gebieden is het grondwater bovendien sterk ijzerhoudend; het oxideren en neerslaan van ijzerdeeltjes bij contact met zuurstof leverde daar problemen op.

Vervolgens werd de aandacht gericht op de bodem als warmtebron. Eerst gebeurde dat door horizontale bodemwarmtewisselaars aan te leggen, een techniek die onder meer was ontwikkeld in Oostenrijk. In het dichtbevolkte Nederland was de ruimte te beperkt en raakte de verticale bodemwarmtewisselaar in zwang. Een interessante variant daarbij is een speciale heipaal die ook als warmtewisselaar functioneert (de 'energiepaal'). Echter, bij langdurig gebruik van een bodemwarmtewisselaar wordt jarenlang warmte aan de bodem onttrokken. Daardoor daalt de bodemtemperatuur geleidelijk, waardoor de COP van het systeem door de jaren heen langzaam afneemt. Regeneratie van de bodembron is dus belangrijk.

Kortom: de warmtebron is niet het eenvoudigste deel van een warmtepompsysteem. Daar komt bij dat het tot nu toe niet om echt grote aantallen gaat, ook al wordt er al 35 jaar met warmtepomptechniek gewerkt. In Nederland ondervindt de warmtepomp sterke concurrentie van HR-ketels, die in grote aantallen worden geproduceerd, waardoor ze zeer goedkoop zijn.

Een eerste doorbraak in de nieuwbouw ontstond toen er, parallel aan de opkomst van airconditioning in auto's, een vraag ontstond naar koeling in woningen. Het nadeel dat de temperatuur van een bodembron langzaam daalt als gevolg van de warmte-onttrekking, wordt hierbij een voordeel. Immers, de bron wordt in de zomer een koudebron die vrijwel gratis kan worden gebruikt. Het volstaat in veel gevallen om direct warmte uit te wisselen vanuit het afgiftesysteem in de woning naar de bodemwarmtewisselaar. Dit is één van de vormen van warmte- en koudeopslag (wko). Wko is bijzonder aantrekkelijk, omdat door het leveren van een nuttig product (koeling in de zomer) het probleem van de langzaam dalende bodemtemperatuur in het stookseizoen wordt opgelost. Dit heeft wezenlijk bijgedragen tot een versnelde inzet van bodem/water-warmtepompen in de nieuwbouw. Terwijl de warmtepomp op zichzelf maar moeizaam kan concurreren met de HR-ketel, levert een warmtepomp met

wko-systeem ten opzichte van de HR-ketel iets wat in de beleving van de bewoner veel waard is: koeling in de zomer.

In figuur 15 is zo'n warmtepomp met wko-systeem weergegeven. Te zien is dat in de zomer koude geleverd kan worden door de vloerverwarming aan de bodemwarmtewisselaar te koppelen via een 'scheidingswarmtewisselaar'. Deze laatste is nodig om de antivries in het circuit van de bodemwarmtewisselaar niet te laten mengen met het water in het afgiftesysteem in de woning. In dit geval spreken we van 'passieve koeling', ook wel vrije koeling of topkoeling. Hierbij is de capaciteit om twee redenen beperkt. Ten eerste kan het afgiftesysteem, als er vloer-of wandverwarming is aangelegd, niet te koud worden gemaakt, omdat er anders condensvorming zou optreden. Daarnaast is de koude die op deze wijze aan de bodem kan worden onttrokken (op lange termijn) beperkt tot de hoeveelheid die in de winter is gegenereerd.

Als de gebruiker meer koelcapaciteit wil, dan moet de warmtepomp worden ingezet als koelmachine. Hiervoor moet de werking van de warmtepomp omdraaien. Dit heet 'actieve koeling'. Omdat nu de compressor aandrijfenergie vraagt, wordt het energetisch voordeel beduidend minder.

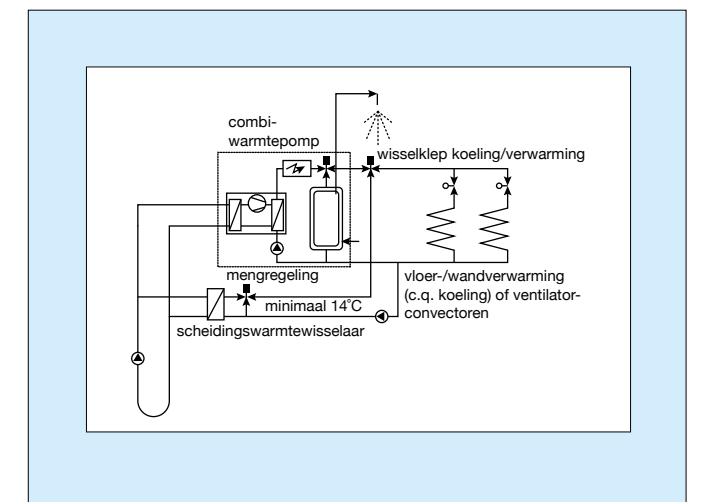
Een recente ontwikkeling is de toepassing van warmtepompen in de bestaande bouw. Het is duidelijk dat de nationale en Europese doelstellingen voor energiebesparing en hernieuwbare energie niet haalbaar zijn als alleen de nieuwbouw daaraan een bijdrage levert.

Omdat warmtepompen eenvoudiger in te zetten zijn wanneer de randvoorwaarden nog gekozen kunnen worden (zoals goede woningisolatie, kierdichting, gebalanceerde ventilatie met warmterugwinning, een LTV-afgiftesysteem en de aanleg van een bodemwarmtewisselaar) werd de inzet ervan tot voor kort vooral in de nieuwbouw gerealiseerd. In de bestaande bouw liggen veel randvoorwaarden al vast, tenzij men kiest voor totale renovatie. Daarom is in de bestaande bouw vooral aandacht voor het al langer bestaande principe van de lucht/water-warmtepomp. Moderne lucht/water-warmtepompen presteren om een aantal redenen beter dan de systemen die drie of vier decennia geleden beschikbaar waren. Zo is de kwaliteit van de warmtepompen duidelijk verbeterd; bij dezelfde brontemperaturen worden hogere COP's gehaald. Bij een aantal systemen wordt

niet alleen de buitenlucht maar ook ventilatielucht gebruikt. Gebalanceerde ventilatie met warmterugwinning is in de bestaande bouw moeilijk aan te brengen, maar er is vaak wel een mechanisch ventilatiesysteem. Een lucht/water-warmtepomp is dan een goed alternatief om de warmte uit de ventilatielucht terug te winnen.

Daar komt bij dat de energie-eisen die in toenemende mate ook aan bestaande woningen gesteld worden (onder meer via het energielabel), de interesse in efficiënte technologie hebben aangewakkerd. Via het woningwaarderingssysteem (WWS) wordt het voor woningcorporaties mogelijk om investeringen in duurzaamheid, waardoor de energiekosten van de bewoner dalen, ook in de huur te verrekenen.

Een belangrijk type warmtepomp voor bestaande woningen is de zogeheten hybride warmtepomp. Dit is een combinatie van een lucht/water-warmtepomp en een gewone HR-ketel, waarbij de ketel onder extreme omstandigheden de verwarmingstaak overneemt van de warmtepomp. Het is dus een bivalente warmtepomp (figuur 13 op pagina 104). Met de term 'hybride' wordt benadrukt dat de bijstook hier op aardgas werkt. Dat is heel belangrijk, want in de bestaande bouw is de capaciteit van het elektriciteitsnet niet berekend op de grootschalige inzet van elektrische warmtepompen. Het is dan belangrijk dat met name de pieklast niet elektrisch is.



Figuur 15 Warmtepomp met bodemwarmtewisselaar als gesloten wko-systeem. Bron: TNO

8.7 Uitvoeringsvormen

Afhankelijk van de warmtebron kan een warmtepomp in de praktijk uiteenlopende verschijningsvormen hebben. Er is altijd een binnenunit. Deze ziet er uitwendig niet heel anders uit dan een HR-ketel. Vaak hangt hij ook aan de wand. Soms, als er een voorraadvat voor warm tapwater in opgenomen is, is hij iets groter dan een HR-ketel. De meeste tot nu toe geplaatste warmtepompen zijn elektrisch. Gasgestookte warmtepompen bestaan nog niet in een kleine capaciteit en zijn dus vooral te vinden in de utiliteit en collectieve systemen in de woningbouw. Aan gaswarmtepompen is een separaat boek in deze serie gewijd [GasTerra, 2010].

8.7.1 Lucht/water-warmtepomp in split-uitvoering

Deze warmtepomp bestaat uit een binnenunit en een buitenunit. De buitenunit (verdampers en compressor) neemt warmte op uit de buitenlucht en is via koudemiddelleidingen verbonden met de binnenunit. Dit type warmtepomp is meestal omschakelbaar, zodat hij in de zomer actief kan koelen. Verdampers en condensator verwisselen dan van functie, zodat de buitenunit warmte afstaat aan de buitenlucht. Figuur 16 laat zien hoe de buitenunit op een niet-alledaagse manier geplaatst kan worden.

8.7.2 Lucht+ventilatielucht/water-warmtepomp

Figuur 17 toont een warmtepompen die zich geheel binnen de woning bevinden en eventueel naast de buitenlucht ook de beschik-



Figuur 16 Buitenunit van lucht/water-warmtepomp in split-uitvoering. Bron: HR Advies

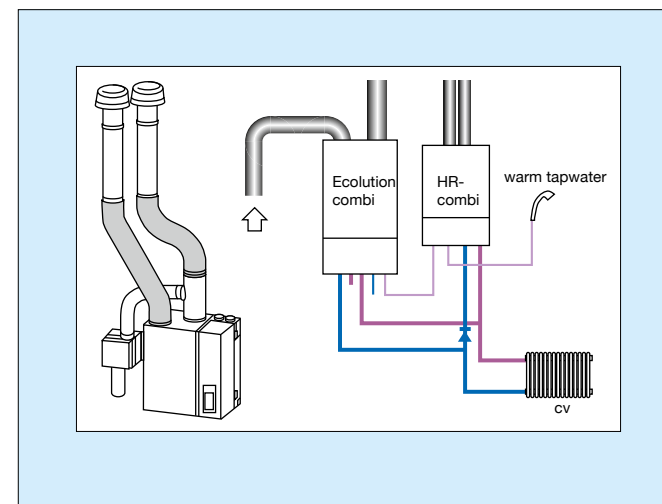
bare ventilatielucht als warmtebron gebruiken. De warmtepomp verzorgt hier dus ook de mechanische ventilatie van de woning.

8.7.3 Bodem/water-warmtepomp

Het type dat tot nu toe het meest in de Nederlandse nieuwbouw is toegepast, is de bodem/water-warmtepomp. Deze kan eventueel worden uitgevoerd als het eerdergenoemde wko-systeem (figuur 15). De gehele warmtepomp bevindt zich meestal binnenshuis. Het aanbrengen van de bodemwarmtewisselaar heeft letterlijk nogal wat voeten in aarde (figuur 18). Tot nu toe zijn er geen inbrengtechnieken bekend waarmee bodemwarmtewisselaars gemakkelijk en zonder omploegen van reeds aangelegde tuinen in de bestaande bouw toe te passen zijn.

8.7.4 Water/water-warmtepomp

Bij de water/water-warmtepomp is sprake van een open bron. Vaak wordt het water, nadat er warmte aan is onttrokken, weer teruggevoerd in de grond (dit is een milieu-eis). Meestal wordt de open bron collectief uitgevoerd voor een aantal woningen. Daarbij staat in elke woning een individuele warmtepomp die op deze bron is aangesloten. Voordeel van dit systeem is dat de investeringen voor de grotere bron relatief gunstig kun-



Figuur 17 Voorbeelden van lucht/water-warmtepompen. Links wordt zowel de buitenlucht als de ventilatielucht gebruikt, rechts alleen de ventilatielucht. Bron: Itho-Daalderop en Inventum

nen zijn. Omdat de bronwarmte die gedistribueerd wordt van lage temperatuur is, behoeven de leidingen niet geïsoleerd te worden.

8.8 De kwaliteit van de installatie

De prestaties van warmtepompen zijn zeer contextgevoelig. De warmtepomp is een geavanceerd en thermodynamisch subtiel apparaat dat vraagt om ontwerpers en installateurs die hoge kwaliteitsnormen hanteren. Anders dan bij de HR-ketel moeten de omringende systeemelementen nauwkeurig gedimensioneerd en ingeregeld zijn. Bij een HR-ketel maakt het niet zoveel uit dat de retourtemperatuur uit het afgiftesysteem te hoog is: het rendement zal wat lager zijn, maar het comfort blijft overeind. Bij een warmtepomp heeft dit echter grote gevolgen voor zowel het rendement als de capaciteit. Aan de andere kant: wanneer aan de juiste randvoorwaarden is voldaan, zijn met een warmtepomp uitstekende energetische prestaties mogelijk. Hieronder volgen de belangrijkste aandachtspunten.

Temperatuurlift

Zoals al is uiteengezet, hangt het rendement van een warmtepomp met name af van de temperatuurlift (verschil in temperatuur tussen het afgiftesysteem en de warmtebron). Het is dus van belang dat de bron een zo hoog mogelijke temperatuur heeft en het afgiftesysteem een zo laag mogelijke. LTV-afgiftesystemen zijn dan ook cruciaal.

Bouwkundige kwaliteit

De bouwkundige kwaliteit van een gebouw moet goed zijn. Het warmtepompsysteem is ontworpen op basis van een bepaalde warmtevraag. Wanneer de bouwtechniek of het bouwproces faalt (koudebruggen, gebrekkige isolatie, kieren, op het laatste moment wegbezuinigde warmteterugwinning, lagere kwaliteit isolatieglas, etc.), dan wordt de warmtevraag groter en de relatieve capaciteit van de geplande warmtepomp kleiner. In paragraaf 5.5.2 is aangegeven dat het aandeel dat de warmtepomp levert in de jaarlijkse warmtevraag dan kleiner wordt. Bovendien zal bij stijgende warmtevraag de afgiftetemperatuur stijgen omdat het afgiftesysteem zwaarder wordt belast. Hierdoor neemt de COP van de warmtepomp af. Een grotere warmtevraag die voor een kleiner deel gedekt wordt door de warmtepomp bij een lagere COP is dus een drievoudig nadeel voor het uiteindelijke resultaat.



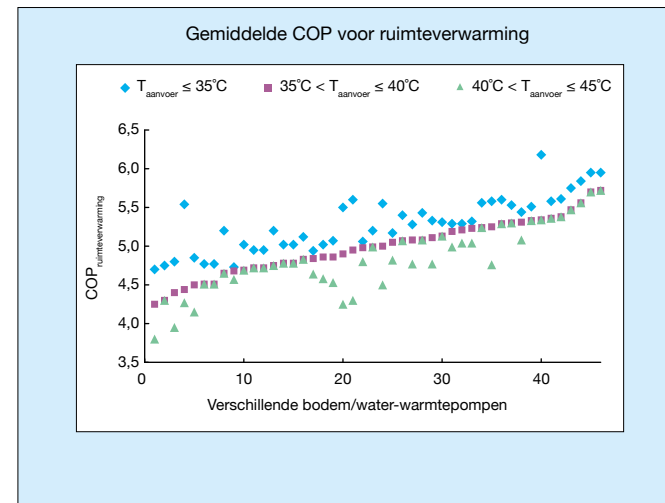
Figuur 18 Aanbrengen van een bodemwarmtewisselaar.

Een voorbeeld uit de praktijk: tijdens het betonstorten worden de ingegoten luchtkanalen van de warmteterugwinning geplet (iets dat nadien niet meer te zien is). Mogelijke gevolgen: te lage ventilatiedebieten waardoor bewoners de ramen open zetten, een hoger elektriciteitsverbruik voor de ventilator, geluidsklachten, een te grote warmtevraag en bewoners die klagen over een hoge energierekening.

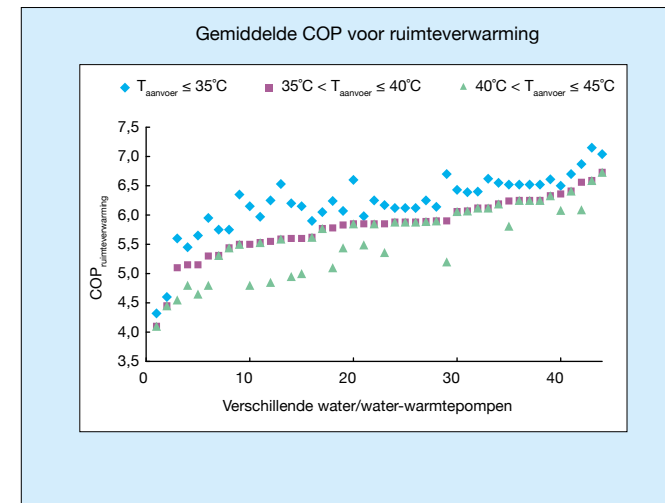
Kwaliteit van het installatiewerk

Een ontwerp en de realisatie van een warmtepompinstallatie moeten voldoen aan hoge kwaliteitseisen. Hier zijn minimaal de volgende aandachtsgebieden te onderscheiden:

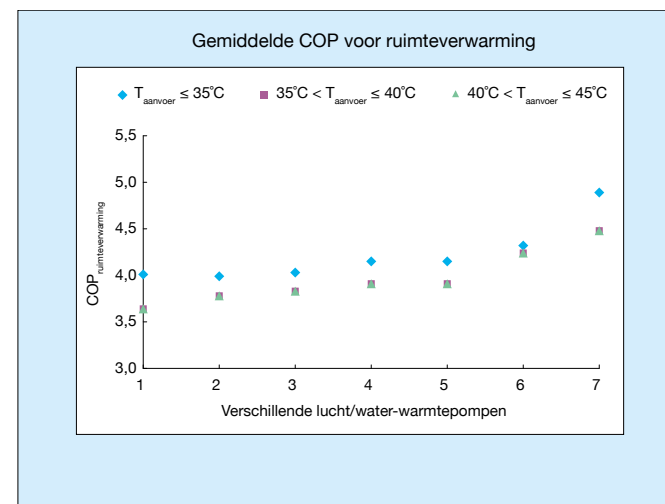
- De hydraulische schakeling uitvoeren zonder menging van waterstromen met verschillende temperaturen. Investeren in een LTV-systeem is tevergeefs als de warmtepomp de lage temperaturen niet 'ziet'. De installateur moet voorkomen dat waterstromen met verschillende temperaturen bij elkaar komen. Ook moet het aantal circulatiepompen (vooral de niet-geregelde pompen die continu draaien) beperkt blijven. In het algemeen moeten circulatiepompen van vloerverwarmingssets achterwege gelaten worden.
- Het systeem moet vóór oplevering worden ingeregeld.
- De ontwerptemperaturen van verschillende afgiftesystemen (bijvoorbeeld: vloerverwarming beneden en radiatoren op de etage) moeten gelijk gekozen worden.



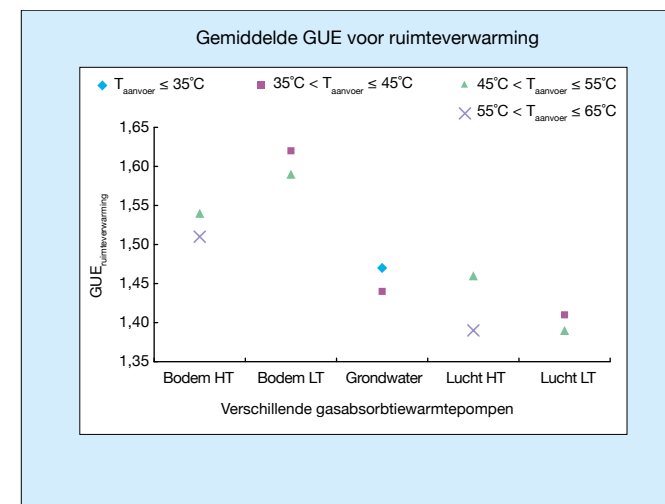
Figuur 19 Jaargemiddelde COP_{RV} van 46 bodem/water-warmtepompen, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 20 Jaargemiddelde COP_{RV} van 44 grondwater/water-warmtepompen, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 21 Jaargemiddelde COP_{RV} van zeven lucht/water-warmtepompen, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 22 Jaargemiddelde GUE_{RV} van vijf gasabsorptiewarmtepompen gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO

d. Een correcte plaatsing voorkomt problemen met geluid. Een compressorwarmtepomp bevat een component die geluid produceert, maar dankzij maatregelen van de fabrikant en een correcte plaatsing is geluidshinder goed te voorkomen. Een goed geplaatste elektrische warmtepomp produceert niet meer geluid dan een HR-ketel.

Wanneer aan deze eisen (en nog enkele, zie hiervoor de betreffende ISSO-publicaties [ISSO]) is voldaan, zijn goede prestaties en een gunstig rendement te verwachten.

8.9 Prestaties van warmtepompen

Omdat de praktijkomstandigheden van grote invloed zijn, is het moeilijk om de prestaties van warmtepompsystemen op papier precies te voorspellen. In deze paragraaf bekijken we de rendementen van verschillende typen warmtepompen en de omstandigheden die daarop van invloed zijn.

8.9.1 Elektrische warmtepompen

In figuur 19 zijn de opwekkingsrendementen voor ruimteverwarming weergegeven voor 46 bodem/water-warmtepompen. Dit zijn de rendementscijfers die TNO in zogenaamde 'kwaliteitsverklaringen' heeft vastgelegd op basis van laboratoriummetingen [TNO, 2011]. Deze waarden mogen worden ingevoerd in de EPC-berekening. De aangegeven rendementen zijn te interpreteren als jaargemiddelde COP-waarden, mits de warmtepomp inderdaad de aangegeven aanvoertemperatuur aangeboden krijgt, deskundig is geïnstalleerd en juist is gedimensioneerd.

Aan figuur 19 is onder meer te zien dat het loont om te werken met een LTV-verwarmingssysteem. Wanneer de ontwerptemperatuur daarvan onder 35 °C ligt, wat mogelijk is, zijn COP-waarden van rond de 5,5 haalbaar.

Op dezelfde wijze tonen de figuren 20 en 21 de opwekkingsrendementen van grondwater/water- en lucht/water-warmtepompen. Goed is te zien dat grondwater, met zijn constante temperatuur van 10 tot 12 °C, tot nog hogere COP-waarden leidt.

8.9.2 Gaswarmtepompen

Voor gasabsorptiewarmtepompen (GAWP) zijn beduidend minder gegevens beschikbaar. Ze zijn verzameld in figuur 22. De cijfers langs de horizontale as geven aan wat de warmtebron is en

naar welke afgiftetemperaturen de GAWP is geoptimaliseerd. Dit is belangrijk bij een GAWP; het gebeurt door het mengsel van het koudemiddel (in dit geval ammoniak) en het absorptiemiddel (in dit geval water) goed te kiezen.

GAWP 1 en 2 gebruiken de bodem als warmtebron. GAWP 1 is geoptimaliseerd naar een hogetemperatuurafgiftesysteem (voor watertemperaturen tussen 45 en 65 °C), GAWP 2 naar een LTV-afgiftesysteem (voor watertemperaturen tussen 35 en 55 °C). Het is dan ook te verwachten dat GAWP 2 beter presteert dan GAWP 1.

Bij GAWP 4 en 5 is hetzelfde aan de hand. In principe zou GAWP 5 het dan ook iets beter moeten doen dan GAWP 4, maar dat is in de grafiek niet het geval. Hier zou de betreffende fabrikant nog eens goed naar moeten kijken.

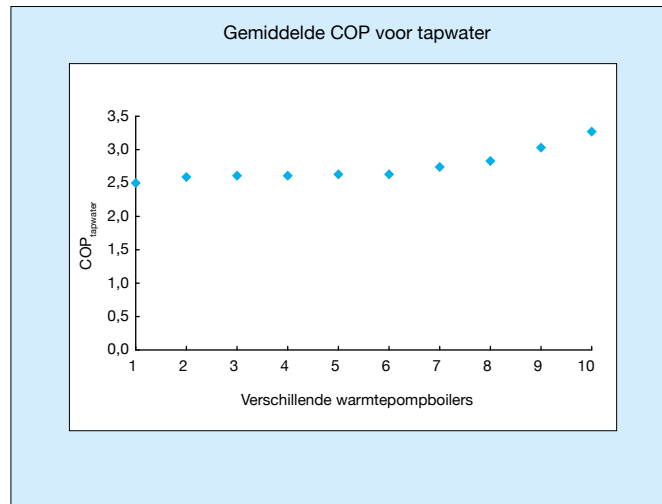
GAWP 3 gebruikt grondwater als bron en werkt bij lagere buitentemperaturen. Die scoort dus ook relatief laag.

Om te benadrukken dat de input bij gaswarmtepompen primaire energie is, wordt de prestatie uitgedrukt als *gas utilisation efficiency* (GUE).

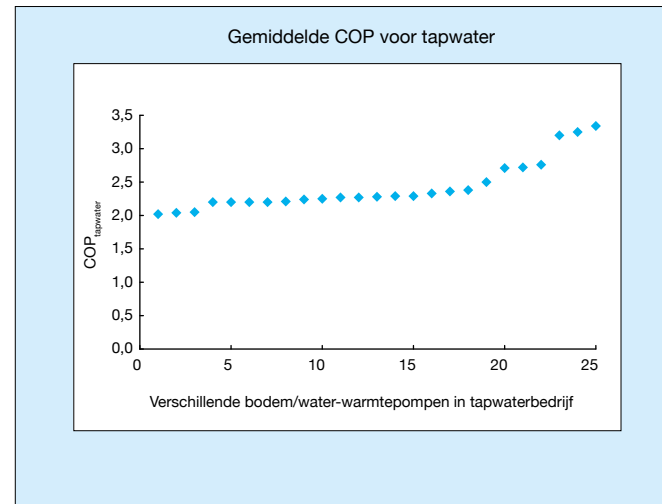
8.9.3 Tapwaterbereiding met warmtepompen

Ook voor tapwaterwarmtepompen zijn de gegevens ontleend aan de verklaringen volgens norm op basis van laboratoriummetingen, waarbij verschillende tappatronen conform de NEN 7120 worden nagebootst [TNO, 2011]. De figuren 23 tot en met 25 op pagina 112 spreken verder voor zichzelf. De hier gegeven COP-waarden zijn bepaald voor comfortklasse CW4. Hierbij heeft de gebruiker de beschikking over het genormeerde comfort indien hij of zij warm water gebruikt in de keuken óf in de douche óf voor een bad van 120 liter. Accepteert de gebruiker enige beperkingen (zoals een waterbesparende perlator op de keukenkraan en een thermostatische kraan met spaardouche in de badkamer), dan kan hij tegelijkertijd de keukenkraan en de douche gebruiken.

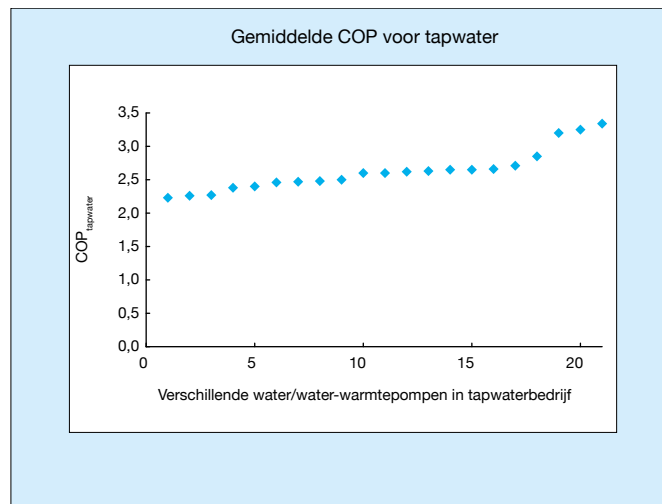
De tappatronen zijn dagpatronen, dus de gegeven waarden zijn te beschouwen als daggemiddelde (en daarom ook als jaargemiddelde) waarden van de COP_{TW}.



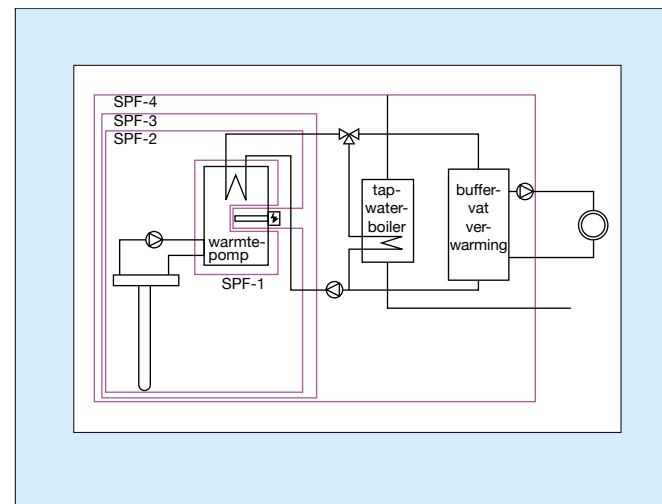
Figuur 23 Jaargemiddelde COP_{TW} van tien warmtepompboilers, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 24 Jaargemiddelde COP_{TW} van 25 bodem/water-warmtepompen in tapwaterbedrijf, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 25 Jaargemiddelde COP_{TW} van 21 water/water-warmtepompen in tapwaterbedrijf, gemeten in het laboratorium onder normcondities. Bron: TNO



Figuur 26 Warmtepompsysteem met de grenzen aan de hand waarvan de SPF-1, SPF-2, SPF-3 en SPF-4 zijn gedefinieerd. Bron: www.sepemo.eu

Met warmtepompboilers (figuur 23) worden warmtepompen aangeduid, die de ventilatielucht van de woning als warmtebron gebruiken en die alleen warm tapwater bereiden.

Warmtepompen die grondwater of de bodem als warmtebron gebruiken worden vaak als combitoestel uitgevoerd, zodat zij dus naast de ruimteverwarming ook de bereiding van warm tapwater kunnen verzorgen.

De figuren 24 en 25 geven de resultaten voor deze warmtepompen, getest op hun tapwaterfunctie en gemeten in het laboratorium onder normcondities. (Bron: TNO)

8.9.4 Rendementsgetallen bij warmtepompsystemen

Wanneer bij warmtepompprojecten resultaten over de prestaties worden gepresenteerd is het niet altijd duidelijk hoe die geïnterpreteerd moeten worden. Soms is bijvoorbeeld niet duidelijk of en in welke mate de hulpenergie van de randsystemen is meegenomen. Met de al eerder geïntroduceerde COP (*coefficient of performance*) wordt meestal de momentane prestatie van de warmtepomp bij een enkele conditie bedoeld. Vaak is die in het laboratorium bepaald. Maar veel belangrijker is natuurlijk de prestatie gedurende het gehele jaar in het veld, als totaal van een reeks verschillende bedrijfstoestanden. Als we daarin geïnteresseerd zijn, spreken we vaak van SPF (*seasonal performance factor*). Binnen het Europese SEPEMO-project over het monitoren van warmtepompsystemen heeft men een aantal soorten SPF gedefinieerd. In figuur 26 zijn de controleoppervlakken getekend binnen het totale systeem, waar deze SPF-waarden betrekking op hebben.

De definities zijn als volgt:

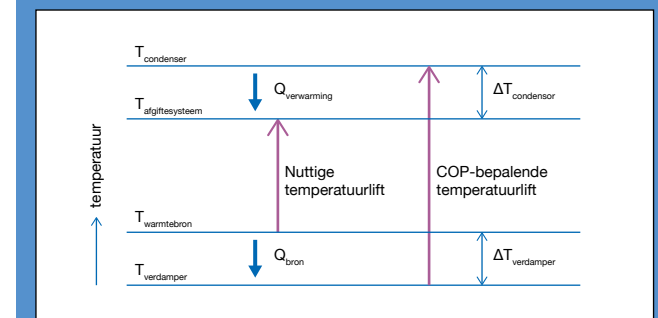
- SPF-1: Gebaseerd op de warmtelevering van warmtepomp en het elektriciteitsgebruik van de compressor.
- SPF-2: Als SPF-1, maar dan uitgebreid met het elektriciteitsgebruik van de pomp of ventilator van de warmtebron.
- SPF-3: Als SPF-2, maar dan uitgebreid met de warmtelevering en het energiegebruik van de bijstook.
- SPF-4: Als SPF-3, maar dan uitgebreid met het elektriciteitsgebruik van de pompen en ventilatoren aan de afgiftezijde van het systeem.

In het algemeen geldt:

$$SPF-1 > SPF-2 > SPF-3 > SPF-4$$

Nuttige en COP-bepalende temperatuurlift

Bij de keuze van een warmtepomp is het belangrijk dat de kwaliteit van de warmtepomp in balans is met die van het afgiftesysteem en van de bron. Dit wordt geïllustreerd in figuur 27. Verticaal zijn de temperatuurniveaus aangegeven.



Figuur 27 Relatie tussen de nuttige en COP-bepalende temperatuurlift van de warmtepomp. Bron: HR Advies

De nuttige temperatuurlift is vanzelfsprekend het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het afgiftesysteem. De COP wordt echter bepaald door het temperatuurverschil tussen verdampert en condensator. Dat laatste temperatuurverschil is groter dan de nuttige temperatuurlift. Het verschil wordt groter naarmate de temperatuurverschillen over condensator en verdampert (de beide ΔT's in de figuur) groter zijn. Deze ΔT's zijn nodig om de verdampert en condensator als warmtewisselaars te kunnen laten functioneren. Bij betere warmtepompen zijn de ΔT's in de regel kleiner, omdat hier geïnvesteerd is in goede, grote warmtewisselaars.

Rekenvoorbeeld

$T_{bron} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_{afgifte} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ (dit betekent: een zéér goed afgiftesysteem)
 De nuttige temperatuurlift is dus $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Stel dat de temperatuurverschillen in verdampert en condensator (in een matige warmtepomp) beide $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ zijn, dan wordt de COP-bepalende temperatuurlift dus $50 \text{ }^\circ\text{C}$, een factor 2 hoger dan de nuttige lift. De investering in een LTV-systeem wordt echter pas echt verzilverd als de warmtepomp navenant goed is, bijvoorbeeld met ΔT's van $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dan wordt de COP-bepalende temperatuurlift slechts $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Omdat de COP omgekeerd evenredig is met de temperatuurlift, is dan het resultaat 40% beter.

Het voorbeeld laat zien hoe belangrijk systeembenadering en systeemoptimalisatie zijn. Bij iedere extra euro die aan een systeem wordt besteed, zou moeten worden vastgesteld waar die euro het meeste effect heeft. Deze systeembenadering geldt voor de gehele energie-infrastructuur en dus ook voor de keuze van het type warmtepomp (elektrisch, hybride of gasgedreven), de keuze van de bron en het afgiftesysteem.

Het is duidelijk dat het totale systeemrendement SPF-4 voor de gebruiker het belangrijkste is, want dat bepaalt de energierekening voor het geleverde comfort.

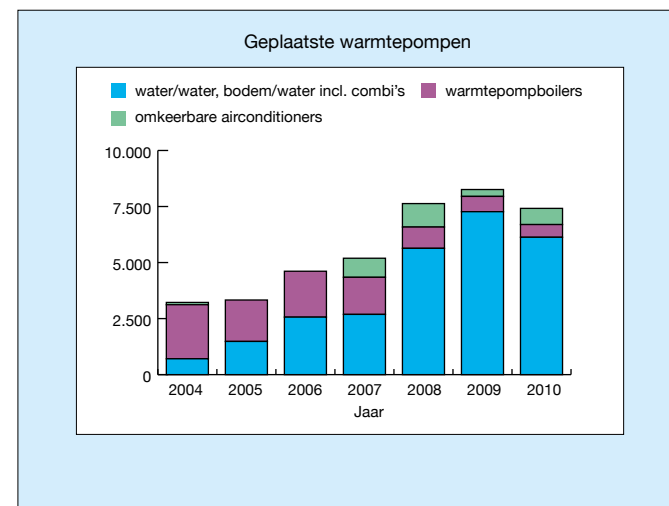
In folders van leveranciers staat van de component warmtepomp vaak de COP-waarde aangegeven op niveau SPF-2. Enerzijds kan dat niet anders (want de leverancier kent de systeemkenmerken niet), anderzijds is die waarde altijd hoger dan het te bereiken overall systeemrendement.

De COP-getallen die in dit hoofdstuk in de energiestroomdiagrammen zijn gebruikt, zijn van het niveau SPF-4, maar dan zonder de bijstook. Die is immers in de diagrammen afzonderlijk zichtbaar gemaakt.

De hiervoor gepresenteerde prestatiegetallen van de individuele warmtepompen (figuren 19 tot 25), gemeten in het laboratorium, zijn van het niveau SPF-1. In de laboratoriumresultaten wordt echter wel de hulpenergie van de pompen aan warmtebron- en afgiftezijde meegenomen, voor zover die wordt veroorzaakt door de stromingsweerstand in de warmtepomp.

8.10 Huidige implementatie van warmtepompen

Tot aan 2009 nam het aantal per jaar in woningen geplaatste aantal warmtepompen in Nederland sterk toe. In 2010 daalde



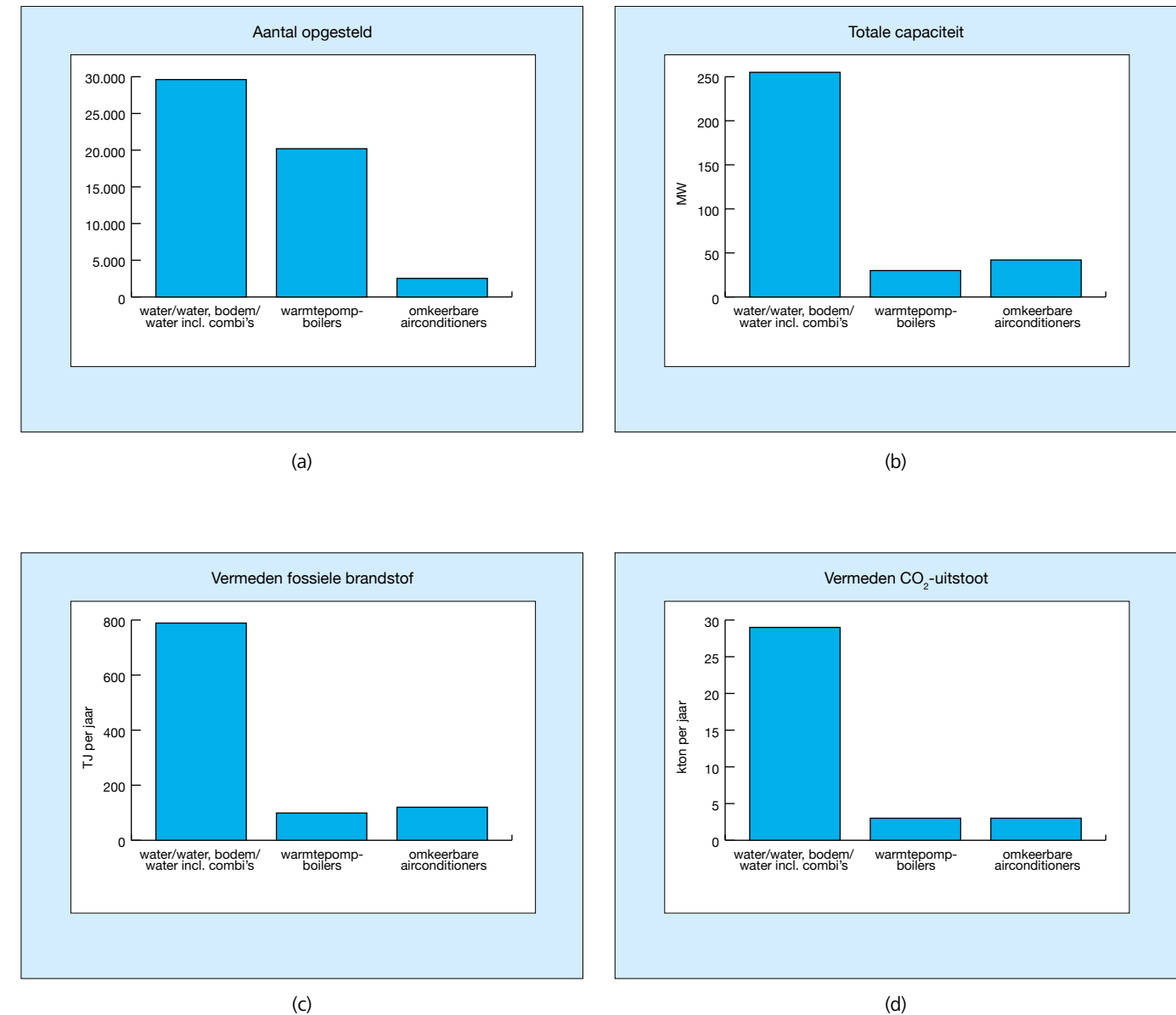
Figuur 28 Aantal per jaar geïnstalleerde warmtepompen in woningen. Bron: EHPA 2010/CBS

het aantal geïnstalleerde systemen voor het eerst in jaren, waarschijnlijk als gevolg van de economisch minder gunstige tijden en het verdwijnen van de overheidssubsidie op duurzame energie-technieken. Figuur 28 geeft het verloop aan in de periode 2004 tot 2010. De diagrammen in figuur 29 illustreren de situatie in de woningbouw eind 2010.

Wat onder meer opvalt is dat warmtepompboilers in aantal zwaar meetellen (figuur 29a), maar door hun geringe capaciteit (figuur 29b) relatief weinig effect sorteren in energiebesparing (figuur 29c) en CO₂-emissiereductie (figuur 29d). ■

Verwachte ontwikkelingen

Per 1 januari 2011 is voor de nieuwbouw de EPC-eis aangescherpt tot $EPC_{max} = 0,6$. Een warmtepomp is een goede en concurrerende optie om deze lage EPC-waarde te halen. In de bestaande bouw is de hybride lucht/water-warmtepomp sterk in opkomst. De toepassing van deze warmtepomp alleen voor ruimteverwarming leidt gemiddeld genomen tot één labelstap verbetering van de woningkwaliteit [TNO, 2010]. In Nederland is de Dutch Heat Pump Association (DHPA), de brancheorganisatie voor leveranciers van warmtepompen, in overleg met netbeheerders en energieleveranciers om een speciaal elektriciteitstarief voor warmtepompen te realiseren, in ruil voor een bepaalde centrale afschakelbaarheid van deze warmtepompen door netbeheerders en elektriciteitsproducenten. Op die manier kunnen zij het warmtepomp-park gebruiken om hun netbelasting te managen, wat kosten- en energiebesparend werkt. Een deel van dat voordeel kan in de toekomst vertaald worden in lagere tarieven voor warmtepompen.



Figuur 29 Warmtepompen in woningen eind 2010: a. aantallen, b. capaciteit, c. energiebesparing en d. CO₂-emissiereductie. Bron: EHPA 2010/CBS

Hoofdstuk 9

Zon-thermisch

De zon is sinds mensenheugenis een belangrijke bron van energie. Zonnestraling is vrij beschikbaar en kan zonder ingewikkelde technische hulpmiddelen worden geogst. Bij de verwarming van gebouwen speelt de warmte van de zon vrijwel altijd een rol. De mate waarin deze warmte bewust wordt gebruikt, varieert sterk. Dit hoofdstuk behandelt de verschillende systemen voor het verwarmen van tapwater en de mogelijkheden die er zijn om zonnewarmte actief in te zetten voor ruimteverwarming.

9.1 Het principe

Er zijn verschillende manieren om zonnewarmte te benutten. Ze worden in volgorde van complexiteit besproken.

9.1.1 Passieve zonnewarmte

Zonder twijfel de eenvoudigste maar wellicht ook de effectiefste inzet van zonnewarmte is passief gebruik. Passief gebruik wil zeggen dat een bouwwerk zodanig wordt ingericht dat de zonnewarmte vanzelf een bijdrage levert aan een aangenaam binnenklimaat.

Een bekend voorbeeld hiervan is de serre, het liefst op het zuiden. In een onverwarmde serre zorgt de grote hoeveelheid glas ervoor dat ook op zonnige winterdagen de temperatuur snel behaaglijk wordt, wat een gunstig effect heeft op de aangrenzende verwarmde ruimten (meestal de woonkamer). Om

oververhitting in de zomer te voorkomen, moet een serre wel worden voorzien van een goede zonwering aan de buitenzijde.

Ook de oriëntatie van gebouwen is van belang voor het benutten van zonnewarmte en voor het verhinderen van oververhitting. Door slim te bouwen kan een woning een aanmerkelijk lagere verwarmingsvraag én een lagere koelvraag hebben dan gemiddeld. In de bouwkosten hoeft er echter geen verschil te zijn. Het belang van passieve zonnewarmte mag dan ook niet onderschat worden.

9.1.2 Lowtech oplossingen

Onder lowtech oplossingen verstaan we alle eenvoudige toestellen die specifiek zijn gebouwd om zonnewarmte in te vangen. In Zuid-Europese landen zijn veel voorbeelden te zien van eenvoudige maar doeltreffende oplossingen. Op veel daken staan

bijvoorbeeld zwartgeschilderde watervaten. Deze worden gebruikt om water te verwarmen voor huishoudelijk gebruik. Een regeling is in principe niet noodzakelijk. Door de grote zonstraling levert deze constructie voldoende energie, zonder dat een complexere installatie nodig is. Een tweede voorbeeld, dat ook in Nederland wel te vinden is, is de verwarming van zwembadwater in buitenbaden met behulp van verwarmingsmatten. Deze matten zijn simpele zwartgekleurde rubberen constructies waar water in buisjes doorheen gepompt wordt. Als de matten in de zon liggen, vangen ze door hun donkere kleur voldoende zonnewarmte op om het zwembadwater een aantal graden op te warmen.

9.1.3 Zonnecollectoren

In streken waar de zon niet zo intensief schijnt, zoals in Nederland, zijn low-tech oplossingen niet efficiënt genoeg voor warmwaterproductie of ruimteverwarming. Geavanceerde technische systemen zijn nodig om voldoende zonnewarmte op te vangen. Het principe achter deze collectoren is eenvoudig. De zonnewarmte wordt gebruikt om een vloeistof op te warmen die door de collector stroomt, net als bij de verwarmingsmatten die hierboven beschreven werden. Door het gebruik van hoogwaardige materialen en zeer goede isolatie wordt echter voorkomen dat de warmte weer terugstroomt naar de omgeving.

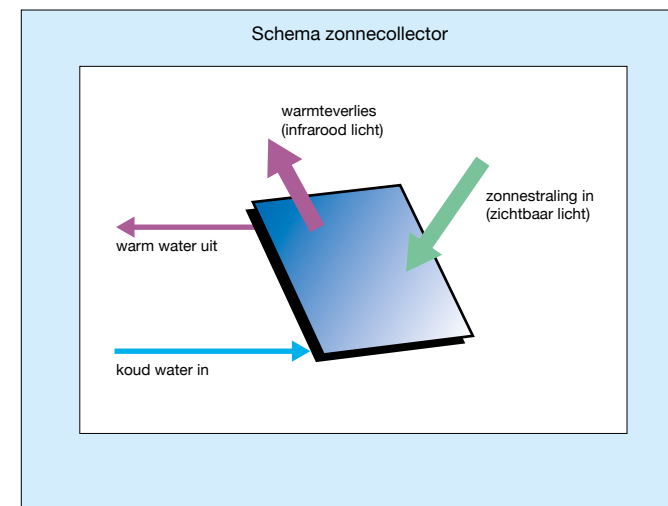


Figuur 1 Twee zonnecollectorsystemen. Boven een plaatcollector en onder vacuümbuisen. Foto: Shutterstock

Er zijn twee gangbare vormen van zonnecollectoren: vlakkeplaatcollectoren en vacuümbuiscollectoren.

Vlakkeplaatcollectoren zijn, zoals de naam al zegt, plaatvormig. Achter een glasplaat ligt een koperen absorber en daarachter loopt een buis met daarin een vloeistof, meestal water met antivries. Door de zonstraling wordt het water verwarmd. Het water wordt door de collector heen gepompt, zodat de warmte wordt afgevoerd. Als de warmte niet wordt afgevoerd, zal de temperatuur in de collector oplopen en zal daardoor steeds meer warmte worden teruggestraald naar de omgeving. Bij een bepaalde temperatuur wordt de uitstraling net zo groot als de opgevangen energie. Deze temperatuur wordt het stagnatiepunt genoemd. In de praktijk is het zaak te voorkomen dat de collector te warm wordt: de verliezen door uitstraling nemen dan immers sterk toe.

De warmte van een zonnecollector wordt dus afgevoerd en opgeslagen in een buffervat. Het buffervat moet groot genoeg zijn om onder normale omstandigheden de zonnewarmte maximaal te kunnen benutten. Op zonnige zomerse dagen kan het echter toch voorkomen dat een deel van de warmte niet benut kan worden omdat de buffer vol is.



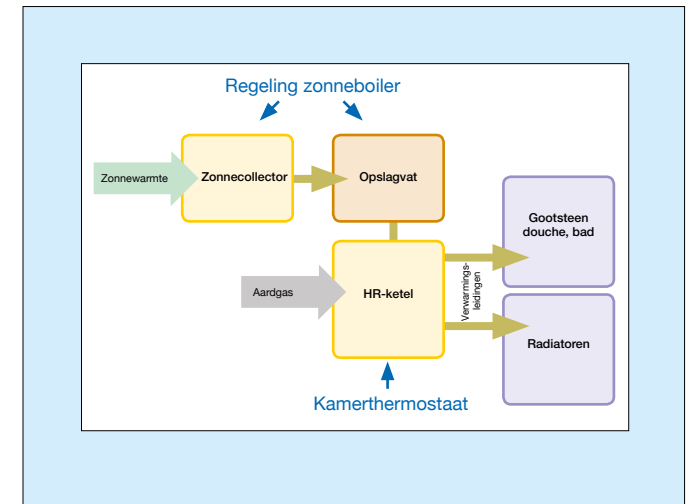
Figuur 2 Schematische weergave van de energiestromen in een zonnecollector. Bron: Energy Matters

Vacuümbuiscollectoren zijn opgebouwd uit glazen buizen die aan één kant gemonteerd zijn in een aansluitstuk waarin een vloeistofcircuit loopt. In de buizen is een koperen staaf (een zogenaamde *heatpipe*) geplaatst die de zonnewarmte opvangt en afvoert naar het vloeistofcircuit. De buizen zelf worden vacuüm gezogen, zodat de isolatie tussen de koperen staaf en de buitenlucht maximaal is. Hierdoor kent een vacuümbuiscollector een veel lager verlies dan een vlakke plaatcollector. De stagnatietemperatuur ligt dan ook veel hoger, tot ver boven de 200 °C. Door de lage verliezen is de opbrengst van vacuümbuiscollectoren hoger dan die van vlakkeplaatcollectoren. Bovendien kan gedurende een langere periode in het jaar zonnewarmte effectief worden ingevangen. Zo kan ook in het voor- en naseizoen en soms zelfs op zonnige winterdagen warm water worden aangemaakt.

9.1.4 Zonneboiler voor warm water of ruimteverwarming?

De opbrengst van een zonneboilersysteem is over het algemeen in Nederland onvoldoende om er direct een woning mee te kunnen verwarmen. Niet alleen is de hoeveelheid warmte die kan worden ingevangen te klein, maar de warmte is ook op het verkeerde moment beschikbaar. Juist in de winter, als de verwarmingsvraag maximaal is, is de opbrengst van de zonnecollector het kleinst. Het allergrootste deel van de zonneboilers in Nederland wordt dan ook toegepast voor de bereiding van warm water. Figuur 3 laat zien hoe een zonneboiler in de meeste gevallen wordt ingepast.

Hoewel de meeste zonneboilers voor warm water worden ingezet, is het wel degelijk mogelijk om ook (een deel van) de ruimte-



Figuur 3 De inpassing van een zonnecollector (als voorverwarmer) in de warmwatervoorziening.

verwarming met een zonnecollector te realiseren. Omdat het aanbod van zonne-energie en de vraag naar warmte uiteenlopen moet de warmte dan worden opgeslagen, bijvoorbeeld in een ondergrondse watervoerende laag (*aquifer*)²². In bestaande woningen is het lastig om deze techniek toe te passen: de warmtevraag is hoog en er is meestal weinig ruimte om een opslagsysteem in de bodem aan te leggen. Daarnaast is het benutten van een aquifer alleen haalbaar als collectieve maatregel voor meerdere woningen. In nieuwbouwprojecten wordt echter steeds vaker van zonnewarmte (uit de woning of uit collectoren) gebruikgemaakt om de bodem te regenereren voor gebruik in de winter.



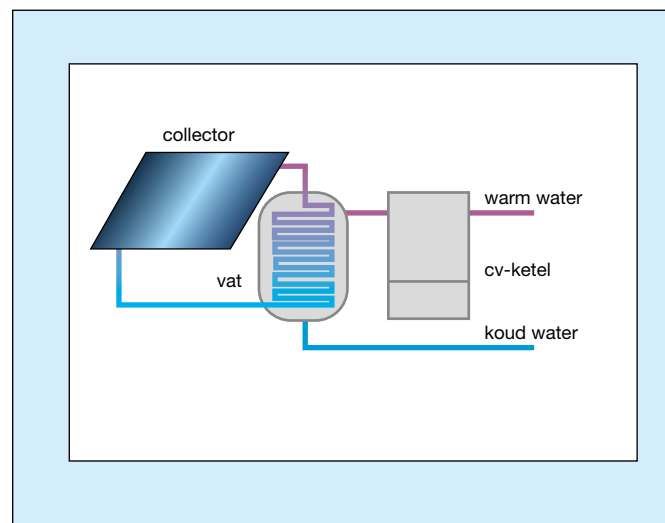
Figuur 4 Zoneiland in Almere. De warmte die door de collectoren wordt opgevangen, wordt direct in het stadswarmtenet gevoed. Vanuit het warmtenet kan de zonnewarmte dan worden ingezet voor zowel ruimteverwarming als warm water. In de praktijk zal de warmteproductie vooral in de zomer plaatsvinden, zodat het grootste deel van de zonnewarmte uiteindelijk voor de bereiding van warm water zal worden gebruikt. Bron: www.panopictures.nl

9.2 Kenmerken

De installatie van een zonneboiler is over het algemeen relatief eenvoudig. De belangrijkste eis is dat er voldoende dakoppervlakte beschikbaar is met de juiste oriëntering. De richting van het dak moet ongeveer zuidelijk zijn en de helling het liefst circa 40°. In de praktijk is een oriëntatie van zuid-west tot zuid-oost en een hellings-hoek tussen 15° en 65° acceptabel. Met behulp van een frame kan een zonneboiler ook op een plat dak geplaatst worden of zelfs aan een gevel worden bevestigd.

Zonneboilers zijn uitgerust met een buffervat. Naast de beschikbaarheid van dakoppervlak is daarom ruimte nodig voor dit buffervat. Om de leidingverliezen tussen de zonneboiler en de hoofdwarmteopwekker (ketel, warmtepomp, HRe, etc.) te beperken is het verstandig om de afstand tussen de zonneboiler en de hoofdwarmteopwekker zo klein mogelijk te houden. Plaatsing van de ketel op zolder heeft daarom de voorkeur.

Door de decennialange technische ontwikkeling van zonneboilers zijn alle kinderziekten verdwenen. Lekkage en oververhitting treedt nog zeer zelden op. Een zonneboiler is daarmee een betrouwbare manier om energie te besparen.



Figuur 5 Standaard zonneboilersysteem. Bron: Milieu Centraal

Installatievormen

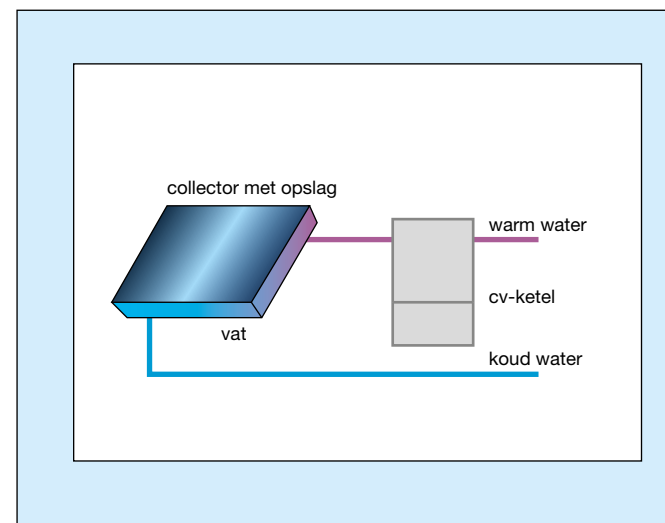
Er zijn vier manieren om een zonneboiler te koppelen aan het verwarmingssysteem van een woning.

Standaardinstallatie

In de standaardvorm loopt het vloeistofcircuit van de zonneboiler door een vat met daarin leidingwater. Het werkmedium van de zonneboiler wordt rondgepompt en geeft zijn warmte af aan het koude leidingwater. Als de zon voldoende krachtig is, zal de temperatuur van het leidingwater hoog genoeg worden om het direct te kunnen gebruiken als warm tapwater. Als de vraag naar warm water groter is dan de beschikbare zonnewarmte (bijvoorbeeld in de winter), moet het water uit het voorraadvat nog worden naverwarmd. Dit gebeurt simpelweg door het water nog door de cv-ketel te laten lopen. De naverwarming komt in bedrijf indien nodig en zorgt ervoor dat het tapwater altijd de gewenste temperatuur heeft, ook als de zon niet schijnt.

Compacte zonneboiler

Een variant op de standaardzonneboiler is de compacte versie. In een compacte zonneboiler is het opslagvat geïntegreerd in de collector zelf. De collectorplaat is dan dikker en zwaarder geïsoleerd. Dit systeem heeft als voordeel dat het ruimtebeslag



Figuur 6 Compacte zonneboiler. Bron: Milieu Centraal

kleiner is dan voor een gewone zonneboiler, er hoeft immers geen extra voorraadvat te worden geplaatst. Wel moet bij de installatie rekening gehouden worden met de grotere afmeting van de collector en het extra gewicht.

Cv-zonneboiler

Bij een cv-zonneboiler (of *hottop*) loopt de warmwateraanvoer niet door de cv-ketel (of een andere naverwarmer) heen, maar houdt de naverwarmer het voorraadvat op temperatuur (samen met de zonnecollector). De naverwarmer kan op deze manier het gehele vat op een constante hoge temperatuur houden, ook als er tijdelijk geen vraag is naar warm water. Het voordeel van deze configuratie is dat er snel een grote hoeveelheid warm water geleverd kan worden.

Zonneboilercombi

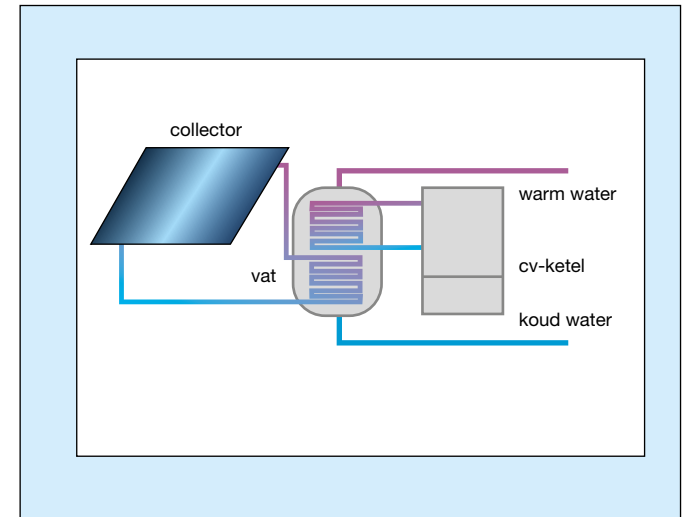
De vierde installatiemogelijkheid voor zonneboilers is de zonneboilercombi. Een combisysteem levert warm water én ruimteverwarming. In het toestel is een voorraadvat geïntegreerd met een cv-apparaat. Vanuit het vat wordt warm water geleverd, maar ook de cv-leidingen worden door het vat opgewarmd.

Zolang de zon krachtig genoeg schijnt, kunnen dus warm water én ruimteverwarming worden geleverd. Met name in het voor- en najaar kan dit een voordeel zijn boven een systeem dat alleen warm water kan leveren. Ook bij een combisysteem zal de naverwarming ervoor zorgen dat de warmtevoorziening altijd gewaarborgd is, ook als de zon niet schijnt.

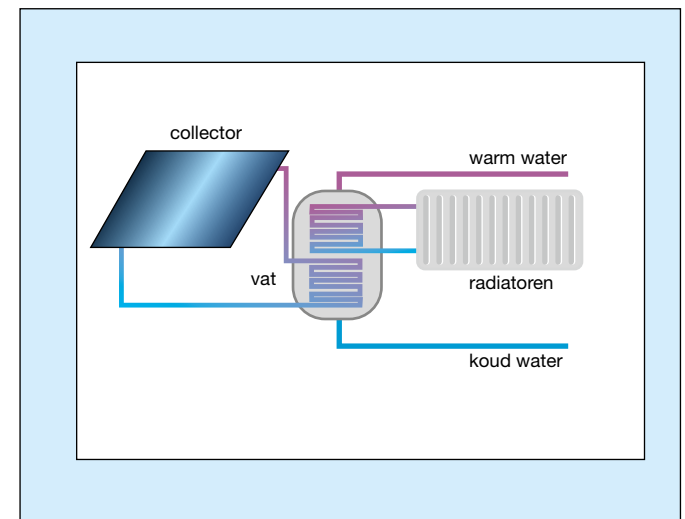
Voor een goed werkend combisysteem is het wel essentieel dat de verwarming op lage temperaturen kan werken. Alleen dan is het mogelijk om ook in voor- en naseizoen een voldoende deel van de warmtevraag vanuit de zoninstraling te dekken.

Opbrengst

De prestatie van een zonneboilersysteem hangt af van verschillende factoren. De hoeveelheid zoninstraling en de kwaliteit van de installatie spelen vanzelfsprekend een rol. Ook is de verhouding tussen de warmtevraag en de zoninstraling op het collectoroppervlak van belang. We zullen deze factoren hier kort bespreken.



Figuur 7 Cv-zonneboiler. Bron: Milieu Centraal



Figuur 8 Zonneboilercombi. Bron: Milieu Centraal

Zoninstraling

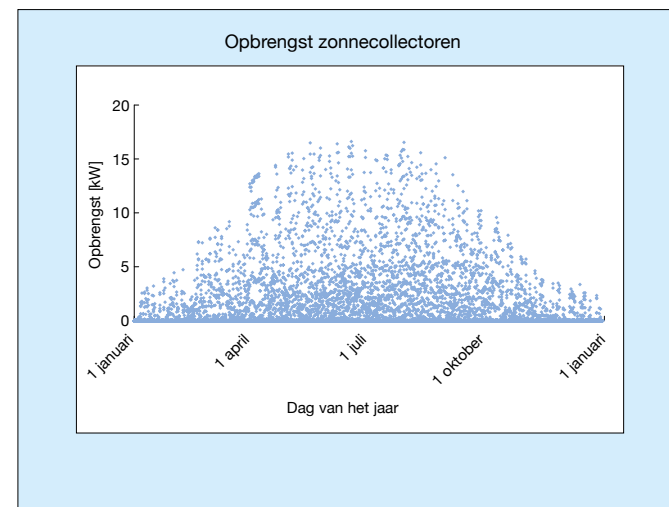
De zoninstraling in Nederland bedraagt circa 1.000 kWh/m²/jaar ofwel 3,6 GJ/m²/jaar. Aan de kust is de zoninstraling iets hoger dan het gemiddelde en naar het oosten toe neemt de hoeveelheid zoninstraling

ling per jaar af. De hoeveelheid zonninstraling bepaalt het theoretische maximum van de beschikbare zonne-energie. De jaarlijkse opbrengst van een zonnecollector kan per m² nooit hoger zijn dan 3,6 GJ. In de praktijk wordt een efficiency rond de 35% gehaald, ofwel 1,3 GJ/m².

De zonninstraling is in Nederland niet gelijkmatig over het jaar verdeeld. Naast de dagelijkse fluctuatie van de lichtintensiteit is er ook een sterke variatie per seizoen. In de zomer is de opbrengst van een zonneboiler significant hoger dan in de winter. Figuur 9 geeft een indruk van de opbrengst van een zonnecollector per uur gedurende een heel jaar (8.760 uur). Het is duidelijk dat de opbrengst sterk fluctueert. Dit is de reden dat een opslagvat voor warm water noodzakelijk is voor het zinvol inzetten van zonnewarmte.

Kwaliteit van de installatie

De kwaliteit van een zonnecollector en het aangesloten boilervat heeft een grote invloed op de opbrengst. Vanzelfsprekend is



Figuur 9 Berekend opbrengstprofiel - gedurende een jaar - van een set zonnecollectoren met een totale oppervlakte van 25 m². De totale opbrengst in dit voorbeeld is 46 GJ. De punten in het diagram geven de pure opbrengst die aan zonninstraling wordt ingevangen door de collectoren. Afhankelijk van het vraagprofiel van de warmtegebruiker kan een deel van deze opbrengst direct worden gebruikt. Een ander deel zal worden opgeslagen in een voorraadvat voor gebruik op een later tijdstip. In de zomer zal meestal sprake zijn van overcapaciteit: bij sterke zonninstraling kan een deel van de warmte niet worden gebruikt. Dit gaat verloren. Bron: Energy Matters

het noodzakelijk om gebruik te maken van een gekwalificeerde installateur, om fouten bij de aanleg van het systeem te voorkomen. Maar ook bij een perfecte installatie bestaan grote verschillen tussen de systemen.

Vacuümbuiscollectoren hebben in het algemeen een duidelijk hogere opbrengst dan vlakkeplaatcollectoren, maar ook binnen deze twee klassen bestaan nog grote verschillen tussen fabrikanten. De opbrengstverschillen vertalen zich in het algemeen in een verschil in aanschafprijs. Het is daarom niet erg zinvol om puur te kijken naar de oppervlakte of de prijs van een systeem. Uiteindelijk is het van belang hoeveel GJ warmte een systeem op jaarbasis kan leveren. Om verschillende systemen objectief te kunnen vergelijken, bestaat in Nederland een norm voor de prestatiebepaling. In dat kader worden metingen uitgevoerd door erkende meetinstututen die onafhankelijk de opbrengst van een systeem vaststellen onder gestandaardiseerde omstandigheden.

Warmtevraag versus collectoroppervlakte

Verrassend genoeg hangen de prestaties van een zonneboiler direct samen met de grootte van de warmtevraag ten opzichte van de grootte van de collector. Dit is als volgt te begrijpen: als er een zeer groot oppervlak wordt bedekt met collectoren, terwijl de warmtevraag beperkt is, is er een flinke overcapaciteit: de opbrengst van de collectoren is dan veel groter dan de warmtebehoefte.

In het omgekeerde geval, als er juist een te kleine collectoroppervlakte is ten opzichte van de warmtevraag, zal alleen bij uitzondering voldoende zonnewarmte worden ingevangen. Hiertegenover staat dat de kleine hoeveelheid warmte die door het systeem wordt ingevangen bijna altijd direct gebruikt kan worden in het huishouden.

Een groot gedimensioneerd systeem levert dus een grote bijdrage aan de vraag naar warm water, maar gebruikt een relatief klein deel van de invallende zonnewarmte nuttig. Een klein gedimensioneerd systeem levert een kleine bijdrage aan de warmwater-vraag, maar kan de opgevangen zonnewarmte bijna altijd goed kwijt in de woning. De grafiek in figuur 10 geeft dit verband weer. Alle berekeningen en metingen zijn uitgevoerd onder dezelfde condities voor een standaardhuishouden met een gestandaardiseerd warmwaterverbruik.

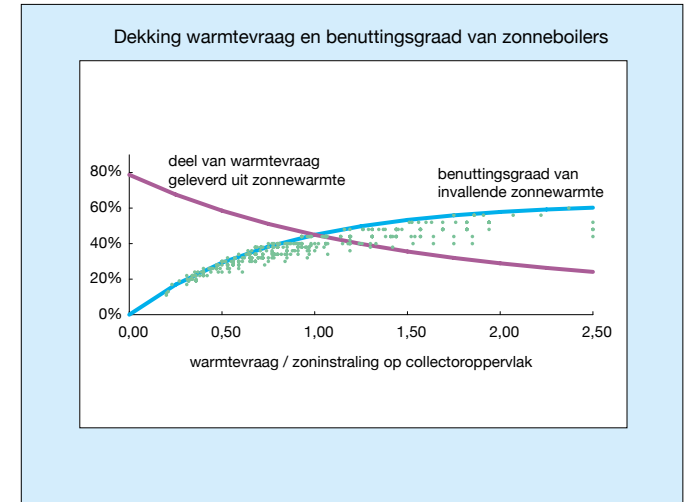
Uit de grafiek blijkt dat er verschillende mogelijke keuzes zijn voor een zonneboilersysteem. Een grote dimensionering levert veel warmte op, maar is ook relatief duur doordat niet alle opgevangen zonnewarmte benut kan worden. Een klein systeem is goedkoop en efficiënt, maar levert ook een kleinere bijdrage aan de warmtevraag.

Het is interessant om vast te stellen dat ook een zeer groot gedimensioneerd systeem (links in de grafiek) de totale warmtebehoefte niet kan dekken. Er zijn immers gedurende een jaar altijd perioden waarin de zon langere tijd niet of zeer zwak schijnt. Voor een normale zonneboiler is de maximale bijdrage aan de warmtevraag ongeveer 80%. Bijstook door bijvoorbeeld een HR-ketel of een warmtepomp blijft dus noodzakelijk. Een andere optie is het gebruik van zeer grote buffers, hetgeen in de praktijk vaak niet mogelijk is.

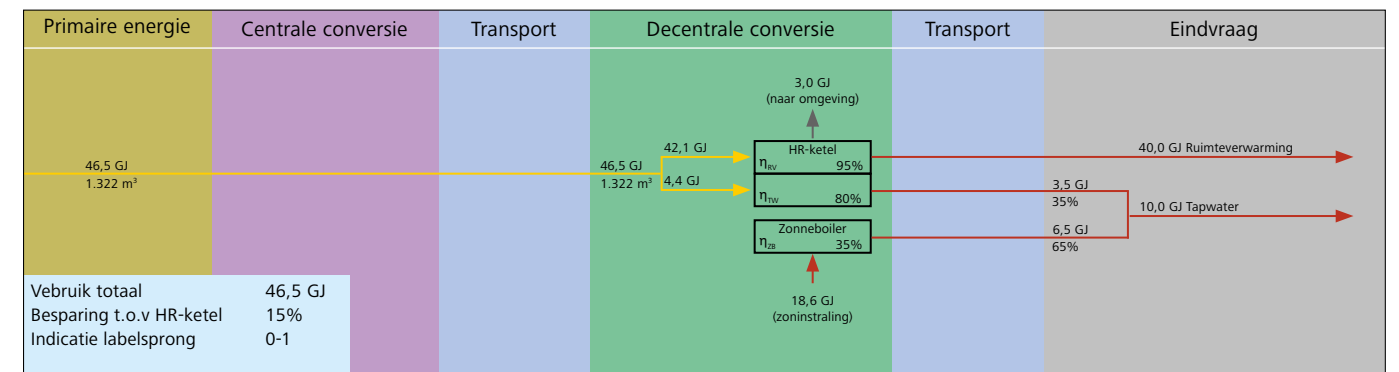
Als voorbeeld bekijken we wat er gebeurt als we uitgaan van een verhouding tussen warmtevraag en zonninstraling van 0,5. Bij een warmwater-vraag van 10 GJ en een zonninstraling van 3,6 GJ/m² komt dit dus neer op een collectoroppervlak van 2x10/3,6 = 5,5 m², waarop jaarlijks 20 GJ aan zonnewarmte terecht komt. Bij deze verhouding vult de zonneboiler ongeveer de helft van de jaarlijkse vraag naar warm water in en wordt ongeveer een derde van de invallende zonnestraling nuttig gebruikt.

Kwaliteit en prestaties

De prestaties van in Nederland verkrijgbare zonnecollectoren is over het algemeen goed. Door het systeem van kwaliteitsverklaringen is het eenvoudig om na te gaan wat de opbrengst van een collector is onder standaardomstandigheden. De opbrengst



Figuur 10 De verhouding tussen de warmtevraag en de zonninstraling op het collectoroppervlak bepaalt de efficiency van het systeem. Voor een systeem met een relatief groot oppervlak (kleine warmtevraag t.o.v. beschikbare zonninstraling, dus links in de grafiek) is de opbrengst hoog. Een groot deel van de warmtevraag kan worden ingevuld door de zonneboiler. Een flink deel van de warmteopbrengst gaat echter onherroepelijk verloren, zodat de benuttingsgraad (de efficiency) laag is. Voor een klein systeem ligt dit omgekeerd: de bijdrage in de warmtevoorziening is beperkt, maar een groot deel van de opgevangen zonnewarmte kan nuttig worden ingezet. De meetpunten in de grafiek zijn ontleend aan een groot aantal kwaliteitsverklaringen van verschillende zonneboilersystemen, opgesteld door TNO.



Figuur 11 Energiestroomdiagram voor een zonneboiler in combinatie met een HR-ketel.

ligt meestal rond de 1,2 GJ per m² collectoroppervlakte per jaar. Figuur 11 op pagina 123 geeft het energiestroomdiagram voor een typische installatie van een zonneboiler in combinatie met een HR-ketel. De totale besparing op de inzet van aardgas bedraagt circa 15%.

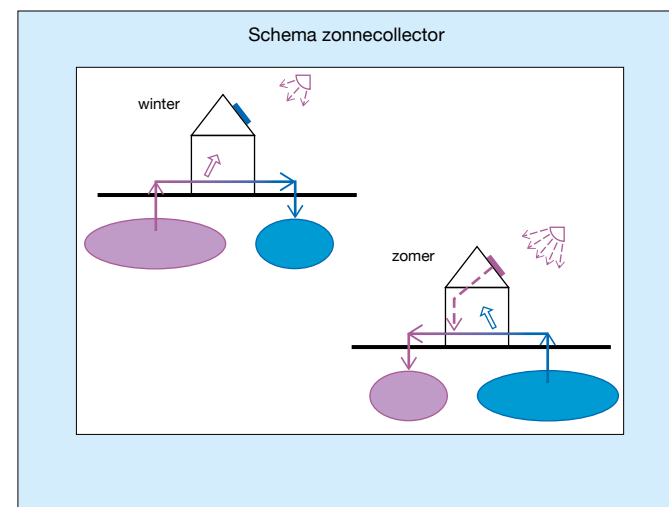
Voor vacuümbuiscollectoren ligt de opbrengst hoger dan voor vlakkeplaatcollectoren, tot circa 2 GJ per m² per jaar. Deze systemen hebben echter ook een hogere kostprijs per m². De afweging tussen opbrengst per m², kostprijs en beschikbaar dakoppervlak bepaalt uiteindelijk welk systeem het meest geschikt is in een specifieke situatie.

9.3 Combinaties met andere concepten

Een zonneboiler wordt in de praktijk altijd gecombineerd met andere warmteopwekkers. Deze paragraaf inventariseert de meest interessante combinaties en de meest logische functieverdeling die daarbij hoort.

Zon voor warm water, ruimteverwarming apart

Een zonneboiler zorgt in de meeste gevallen voor warm water en kan daarom worden gecombineerd met verschillende systemen voor ruimteverwarming zonder dat overlap ontstaat. Of de ruimte-



Figuur 12 Schematische weergave van een bodemopslagsysteem met regeneratie door woningkoeling en zonnecollectoren.

verwarming nu met een HR-ketel, een wkk, een warmtepomp of via een collectief systeem wordt geregeld, maakt in principe niet uit. Het grote voordeel van warmwaterproductie door een zonneboiler ligt in het feit dat de zonneboiler direct op een hoge temperatuur water kan leveren. Juist bij een hoge afgiftetemperaatuur zijn veel verwarmingssystemen relatief inefficiënt. Technisch gezien is daarom de combinatie van een zonneboiler voor het tapwater met een lagetemperatuursysteem voor ruimteverwarming aantrekkelijk. Alleen als de zonneboiler niet voldoende warm water kan leveren, is bijstook op een hogere temperatuur nodig.

Bij het combineren van een zonneboiler met andere duurzame systemen voor warmwaterproductie moet goed worden bekeken of de systemen elkaar niet in de weg zitten. Als een wijk bijvoorbeeld duurzaam wordt verwarmd door middel van een efficiënt stadsnet op geothermie, is het technisch gezien mogelijk om warm water met een zonneboiler te maken. De consequentie is dan wel dat in twee duurzame systemen geïnvesteerd moet worden.

Regeneratie voor ruimteverwarming

Eerder in dit hoofdstuk hebben we aangegeven dat zonnearmte meestal wordt ingezet voor de productie van warm water. Het is ingewikkelder om de vraag naar ruimteverwarming met behulp van zonne-energie in te vullen. De zonnearmte is immers juist dan beschikbaar als de vraag naar ruimteverwarming laag is. Met behulp van grootschalige opslagsystemen is het echter wel degelijk mogelijk om zon-thermische ruimteverwarming te realiseren.

Het meest voor de hand liggende systeem is verwarming met behulp van een warmtepompsysteem met bodemopslag. De warmte die 's winters aan de bodem wordt onttrokken, moet in de zomer weer worden geregenereerd. Voor een deel kan dit gebeuren door woningen te koelen en de warmte af te voeren naar de bodem. In veel gevallen levert dit echter niet voldoende regeneratiewarmte op. Het tekort aan warmte kan met zonnecollectoren worden ingevuld.

Een nadeel²³ van dit systeem is wel dat de zonnearmte op een hoog temperatuurniveau beschikbaar komt en slechts op een laag temperatuurniveau in de bodem mag worden opgeslagen.²⁴

Het zou daarom optimaal zijn om de zonnearmte eerst deels te gebruiken voor het maken van warm water. De zonnearmte die dan nog op een laag temperatuurniveau overblijft, kan in de bodem worden opgeslagen voor hergebruik in de winter.

Zonnearmte combineren met zon-PV

Een interessante mogelijkheid is de combinatie van thermische zonne-energie met fotovoltaïsche zonnecellen (zon-PV) in één apparaat. Dat wil zeggen dat een enkele collector op het dak zowel elektriciteit als warmte levert. Dit kan een flink kosten- en ruimtevoordeel opleveren. In zo'n PVT-installatie is een laag zonnecellen voor elektriciteitsproductie bevestigd boven op een absorber in een zonnecollector. De zonnecellen vangen weliswaar een deel van de zoninstraling op, maar er blijft toch nog voldoende over om een acceptabele warmteopbrengst te realiseren. Een extra voordeel is dat de zonnecollector aan de onderzijde van de zonnecellen warmte afvoert. Hierdoor kunnen de PV-cellen koel blijven, waardoor ze beter presteren.

Bij PVT-systemen moet wel kritisch worden gekeken naar de daadwerkelijke prestaties. Voor een optimale werking van de zonnecellen zouden deze gekoeld moeten worden tot onder een temperatuur van circa 40 °C. Dit betekent echter dat de installatie geen warm water kan leveren met een temperatuur die hoger ligt dan 40 °C. In de praktijk moet dus een balans gevonden worden tussen efficiënte elektriciteitsproductie en een voldoende hoge watertemperatuur. Per geval moet dan bekeken worden of de totale opbrengst van een PVT-systeem beter is dan een systeem met aparte PV-cellen en thermische collectoren.

Sorptiekoeling

Als er behoefte bestaat aan koeling is de combinatie van een zonneboiler met een sorptiewarmtepomp (zie ook hoofdstuk 8) interessant. De warmte van de zonneboiler wordt dan gebruikt om een sorptiewarmtepomp aan te drijven voor koeling. Deze combinatie is aantrekkelijk omdat in het algemeen de koelvraag groter wordt als de zon harder schijnt. Er is dus een goede koppeling tussen de beschikbaarheid van zonnearmte en de behoefte aan koeling. Voor toepassingen met een grote koelvraag, zoals bijvoorbeeld kantoorgebouwen, is het echter de vraag of met zongedreven absorptiekoeling voldoende koelvermogen geleverd kan worden, gezien de beperkte hoeveelheid beschikbaar dakoppervlak.

Een goed gedimensioneerde combinatie van zonneboiler en absorptiekoeler kan in het voor- en naseizoen en deels in de winter voorzien in de vraag naar warm tapwater. Als de zoninstraling in de zomer groter wordt, is er een overschot aan warmte, waarmee dan de koeling kan worden aangedreven.

De sorptiekoeler wordt aangedreven met warmte op een hoge temperatuur, maar produceert zelf uiteindelijk ook restwarmte op een lager temperatuurniveau. Bij verdere optimalisering van het systeem zou het zelfs mogelijk zijn om deze restwarmte op te slaan in de bodem, om deze vervolgens te gebruiken voor ruimteverwarming in de winter.

De bovenstaande technische combinaties zijn vooral interessant voor nieuwbouwwoningen, waar steeds vaker een koelvraag bestaat en waar een lagetemperatuurafgiftesysteem beschikbaar is. Pas sinds kort zijn zongedreven sorptiekoelers beschikbaar die op zeer kleine schaal koude kunnen leveren. De komende jaren zal blijken of de combinatie van zonnearmte en sorptiekoeling zich in de praktijk kan bewijzen in Nederland.

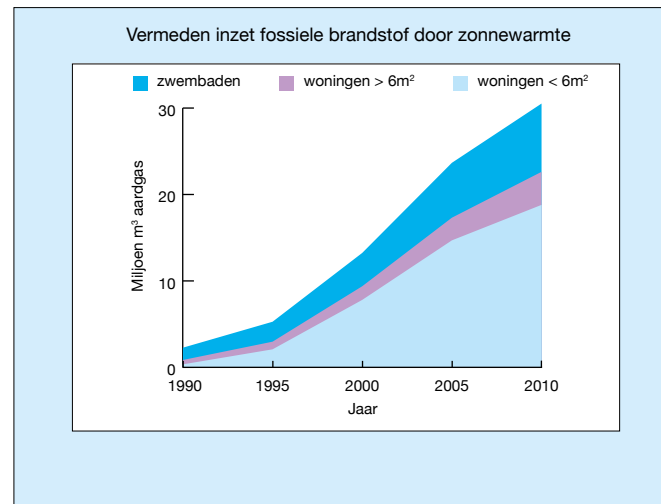
9.4 Marktpositie

Sinds de vroege jaren negentig wordt zonnearmte breed toegepast in Nederland. In de eerste jaren werd zonnearmte vooral gebruikt voor de verwarming van zwembaden door middel van verwarmingsmatten. Het aandeel geavanceerde zonnecollectoren voor de woningbouw is echter gestaag toegenomen. Inmiddels wordt in Nederland ieder jaar het equivalent van 30 miljoen m³ aardgas (bijna 1 PJ) bespaard. Deze besparing wordt gerealiseerd door ruim 100.000 systemen met een totaal collectoroppervlak van circa 800.000 m².

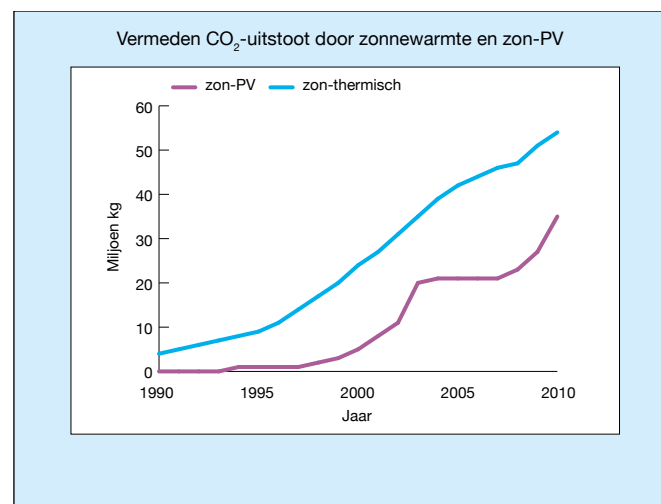
De inzet van zonneboilers leidt tot een significante vermindering van de CO₂-uitstoot in Nederland. In 2010 werd in totaal ruim 50 miljoen kg CO₂-uitstoot vermeden. Daarmee levert zonnearmte een grotere bijdrage aan de inperking van de CO₂-uitstoot dan zon-PV.

9.5 Verwachte ontwikkelingen

De eerste beschikbare vlakkeplaatcollectoren werden al vóór 1900 gebouwd. Sinds de jaren zestig en zeventig is er veel research gedaan op het gebied van zonnearmte



Figuur 13 De jaarlijkse besparing op fossiele brandstof door inzet van zonnewarmte in de woningbouw en in zwembaden. Bron: CBS



Figuur 14 De vermeden CO₂-uitstoot door zonnepanelen en zon-PV. De afgelopen twee decennia is de CO₂-besparing door zonnepanelen continu toegenomen. De bijdrage in de totale energievoorziening is groter dan de bijdrage van elektriciteitsproductie met zonnepanelen (zon-PV). Bron: CBS

[Butti & Perlin, 1980]. Deze ervaring heeft geleid tot betrouwbare en efficiënte oplossingen. Het ontwerp en het materiaal-gebruik zijn in de loop der jaren geoptimaliseerd en moderne systemen hebben nauwelijks onderhoud nodig. Toch zijn verbeteringen nog mogelijk. De toepassing van vacuümbuiscollectoren neemt langzaam toe. Als de vraag naar deze collectoren verder groeit, kan de productie worden opgeschaald en zal de prijs dalen.

In nieuwbouwwoningen is een zonnecollector nu al een kosten-effectieve optie, maar de toepassing is nog niet vanzelfsprekend. In veel nieuwbouwwijken worden al collectoren toegepast, maar een deel van de projectontwikkelaars wil nog niet in zonnecollectoren investeren; die maken immers de prijs van de woning hoger en dat kan negatief zijn voor de verkoopbaarheid. Naar verwachting zal onder invloed van steeds strenger wordende bouwvoorschriften de toepassing van zonnecollectoren in de nieuwbouw wel toenemen: zonnecollectoren kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan een zuinige woning.

De inzet van zonnecollectoren voor ruimteverwarming (in combinatie met ondergrondse warmteopslag of compacte bovengrondse opslagsystemen zoals in hoofdstuk 5 beschreven werden) is nog volop in ontwikkeling. Hoewel enkele succesvolle systemen in bedrijf zijn, is toepassing van zonnecollectoren voor de regeneratie van warmtebronnen nog geen standaardoptie. Er is duidelijk behoefte aan meer kennis over het gebruik van zonnecollectoren voor ruimteverwarming. ■

Hoofdstuk 10

Gebouwgebonden collectieve systemen

Naast een grote meerderheid van woningen met individuele verwarmingsinstallaties kent Nederland ook groepen woningen die voorzien zijn van een collectief verwarmingssysteem. Bij een collectief systeem wordt warmte niet in iedere woning apart opgewekt, maar aangevoerd van buiten de woning. De warmte is afkomstig van een opwekker die meerdere woningen bedient. Vaak is sprake van meergezinswoningen met een gemeenschappelijk verwarmingssysteem.

10.1 Collectieve systemen

Collectieve verwarmingssystemen vinden we met name in de (gestapelde) woningbouw en de zorgsector. De warmtelevering vindt plaats vanuit een extern warmtenet of een collectieve (blok)verwarming. In de woningbouw vinden we blokverwarming vrijwel uitsluitend bij meergezinswoningen (ca. 410.000 woningen [Agentschap NL, 2011]), waarbij een groep woningen vanuit een centrale stookruimte wordt voorzien van ruimteverwarming en vaak ook van warm water. In figuur 1 is een collectieve stookruimte boven op een flatgebouw zichtbaar.

Veel collectieve systemen zijn in de loop der tijd omgebouwd naar individuele cv-installaties. Deze zogeheten 'verketeling' van meergezinswoningen leverde de huurder of eigenaar vaak een aanzienlijk lagere energierekening op. De rendementswinst die met



Figuur 1 Collectieve stookruimte buitenpandig. Foto: BDH

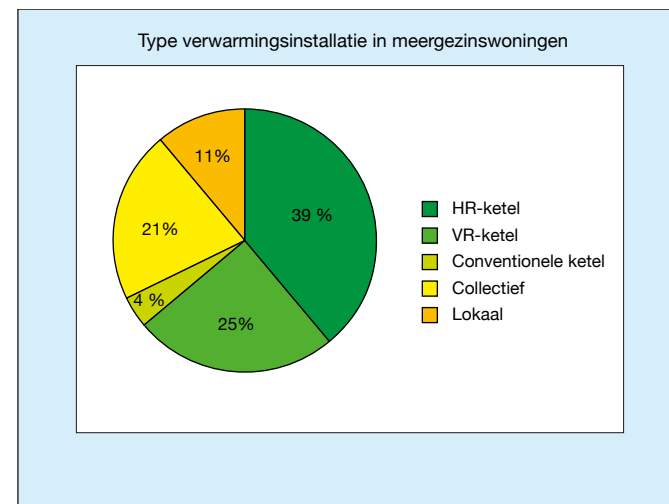
individuele ketels werd gerealiseerd, is in de meeste gevallen toe te schrijven aan de overstap naar moderne HR-keteltechnologie, terwijl het collectieve systeem nog uitgerust was met conventionele keteltechniek. Verketeling werd daarnaast nogal eens ingegeven door ongenoegen bij de gebruikers over de manier van afrekenen (al dan niet op basis van gemeten warmteverbruik) of door comfortklachten.

Uit onderzoek van Liander, het directoraat Wonen, Wijken en Integratie (WWI) van het ministerie van BZK en de Basisregistraties Adressen en Gebouwen (BAG) van het ministerie van VROM blijkt dat de 410.000 woningen met een collectief systeem bediend worden door ongeveer 10.000 installaties. De gemiddelde omvang van een collectief verwarmingssysteem is dus zo'n veertig huishoudens.

In figuur 2 is de verdeling van verschillende typen verwarmingsinstallaties over alle (ruim 2,2 miljoen) meergezinswoningen te zien.

10.2 Collectieve systemen met ketels

Blokverwarming werd aanvankelijk overwegend uitgevoerd met grote, staande, gasgestookte ketels, vooral conventionele ketels en toestellen met verbeterd rendement. De laatste tien tot vijftien jaar zijn veel staande ketels met vermogens van tot 1.000 kW_{th}



Figuur 2 Typen verwarmingsinstallaties in meergezinswoningen. Bron: Agenschap NL 2011

vervangen door in cascade geschakelde HR-gaswandtoestellen, zoals in figuur 3. Dergelijke configuraties bieden een aanmerkelijk hoger rendement en een grotere bedrijfszekerheid, terwijl het afgiftesysteem vaak ongewijzigd kan blijven.

10.3 Collectieve systemen met warmtepompen

Het plaatsen van HR-toestellen in cascade levert, zoals gezegd, een duidelijke verbetering van het rendement op. Nog groter is de rendementswinst wanneer warmtepompen worden geplaatst. Voor blokverwarmingssystemen zijn zowel gasgedreven als elektrische warmtepompen beschikbaar. Beide maken gebruik van duurzame omgevingswarmte. Het voordeel van gasgedreven warmtepompen, zie figuur 4, is dat er geen verzwaring van de elektrische aansluiting nodig is. Toepassing van elektrische warmtepompen vergt vaak wel een hoger aansluitvermogen.

Gaswarmtepompen kunnen vrij eenvoudig in een bestaande situatie worden bijgeschakeld, waardoor het rendement van de totale installatie aanzienlijk toeneemt en het gasverbruik daalt.

Bij de selectie en de installatie van een warmtepomp moet specifiek aandacht worden besteed aan de capaciteit en de ontwerptemperatuur van het afgiftesysteem. Voor warmtepompen geldt algemeen dat ze beter presteren naarmate de aanvoertemperatuur van het afgiftesysteem lager is. In situaties waarin geen aanpassingen aan het afgiftesysteem mogelijk zijn, zijn gasabsorptiewarmtepompen vaak een goede keuze. Zelfs bij een relatief hoge aanvoertemperatuur van 55 tot 60 °C bieden absorptiewarmtepompen toch een aantrekkelijke rendementsverbetering. Wanneer de elektriciteitsvoorziening geen beperkingen oplegt, wordt soms gekozen voor een elektrisch tweetraps warmtepompsysteem, dat ook uit de voeten kan met hogere temperaturen in het afgiftesysteem. Figuur 5 toont een tweetrapsysteem met een grote collectieve warmtepompunit als eerste trap op het dak van het gebouw. Deze eerste trap levert koudemiddel op een verhoogd temperatuurniveau aan de binnenunits. De binnenunits bevatten een kleine tweede warmtepomp, die de energie uit de eerste trap gebruikt als bron voor productie van warmte op een temperatuur die bruikbaar is voor ruimteverwarming en warmwaterproductie. Dergelijke tweetrapsystemen maken de toepassing van warmtepompen technisch haalbaar in gevallen waar geen aanpassingen mogelijk zijn aan het afgiftesysteem, of waar isolerende aanpassingen aan de gebouwschil

moeilijk te realiseren of onevenredig duur zijn. De totaalrendementen van deze systemen, uitgedrukt in de primaire energieratio (PER), zijn bij hoge afgiftetemperaturen echter niet of nauwelijks beter dan die van een cascade met HR-ketels. Tweetraps warmtepompsystemen komen dan ook meestal pas tot hun recht in situaties die ook een koelfunctie verlangen.

In paragraaf 5.5.2 is uiteengezet wat het effect is wanneer een warmtepomp wordt gedimensioneerd om de basislast te leveren. Dit geldt ook voor collectieve systemen met een bijgeschakelde warmtepomp. Bij het selecteren en dimensioneren van een warmtepomp voor de basislast zijn onder meer de volgende aspecten van belang:

a) De plaatsing en de locatie van de opwekkingsinstallatie. De stookruimte van de bestaande installatie moet bouwkundig voldoende mogelijkheden bieden voor plaatsing van een of meer



Figuur 3 Cascade van gaswandtoestellen. Foto: Anita Pantus



Figuur 4 Gasabsorptiewarmtepompen in cascadeopstelling. Foto: Techneco



Figuur 5 Voorbeeld van een collectief systeem met een tweetraps elektrische warmtepomp. Bron: Daikin

10.5 Prestaties van collectieve systemen

De energiestroomdiagrammen in figuur 6, 7 en 8 illustreren de besparingen die met collectieve systemen te behalen zijn. In de diagrammen zijn alle gegevens berekend op basis van één woning. Aangezien appartementen over het algemeen een relatief lage energievraag hebben, is hier uitgegaan van een warmtebehoefte van 20 GJ per jaar voor ruimteverwarming en 5 GJ voor warm water.

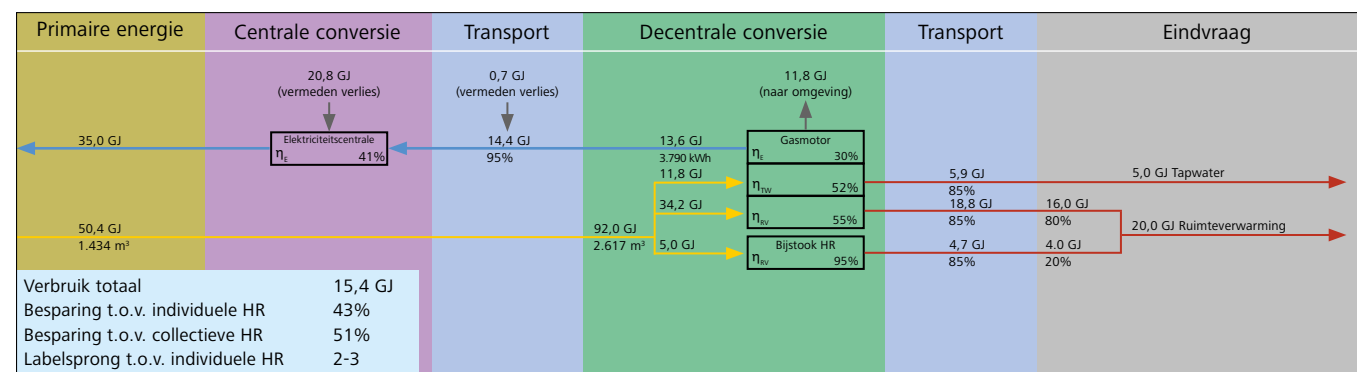
Het eerste diagram (figuur 6 op pagina 133) geeft de situatie voor een collectieve HR-ketel. In vergelijking met individuele ketels is hier sprake van een 'ontsparring'. Er wordt 15% meer energie verbruikt om de woningen van warmte te voorzien. Dit komt door de distributieverliezen in het centrale leidingennetwerk dat door het gebouw loopt. Energetisch gezien is een collectieve voorziening met een HR-ketel daarom minder optimaal dan verwarming met individuele HR-ketels.

Het tweede diagram (figuur 7 op pagina 133) geeft de resultaten voor een collectieve installatie op basis van een gasabsorptie-warmtepomp. Hier wordt een flinke besparing gerealiseerd. Ten opzichte van een collectieve HR-ketel is er een verbetering van 22%. Ook als de leidingverliezen worden meegerekend, de energieprestatie ten opzichte van een situatie met individuele HR-ketels nog altijd 10% beter.

Figuur 8 geeft de situatie weer voor een collectief ingezette gasmotor-wkk. De besparing van dit systeem is ongeveer 50% ten

opzichte van een collectieve HR-ketel en ruim 40% ten opzichte van de situatie met individuele HR-ketels. Deze hoge besparing is het resultaat van twee effecten:

1. Een gasmotor-wkk is zeer goed in staat om tapwater te produceren op een hoog temperatuurniveau. De tapwatervraag hoeft dus niet door een extra HR-ketel te worden ingevuld.
2. De elektriciteit die door de wkk wordt geleverd, wordt niet geproduceerd in een elektriciteitscentrale. Hierdoor worden grote productieverliezen vermeden. Een elektriciteitsproductie van 13,6 GJ (in dit voorbeeld) leidt daardoor tot een besparing van 35 GJ aan primaire energie. ■



Figuur 8 Energystroomdiagram voor een collectieve warmtevoorziening op basis van een gasmotor-wkk.

Hoofdstuk 11

Warmtenetten

We hebben ons in de hoofdstukken 5 tot en met 9 van dit boek beziggehouden met verwarmingssystemen in individuele woningen. In het vorige hoofdstuk zijn gebouwgebonden collectieve systemen bekeken. In dit hoofdstuk gaan we nog een stap verder en bekijken we warmtenetwerken. Na een gestage daling van de populariteit van warmtenetten neemt hun aantal de laatste jaren weer langzaam toe.

11.1 Het principe

De rol van warmtenetwerken is bescheiden in Nederland: circa 4% van de woningen is aangesloten op een warmtenet. In de tweede helft van de twintigste eeuw is het aandeel van warmtenetwerken voor de verwarming van woningen steeds afgenomen, maar de laatste jaren is dit aandeel haast ongemerkt weer gegroeid [Agentschap NL, 2010]. Het is niet ondenkbaar dat dit aandeel nog verder zal groeien. Verschillende gemeenten hanteren een actief stimuleringsbeleid voor warmtelevering. Bovendien kunnen veel energie-efficiënte technieken, zoals wko-systemen (warmte- en koudeopslag in de bodem), geothermie of gasmotor-wkk, gemakkelijker worden toegepast bij groepen van woningen. De rol van warmtenetten is in dergelijke kleinschalige oplossingen essentieel.

Warmtenetten bestaan in verschillende vormen en maten, van de oudste zeer grootschalige stadswarmtenetten tot kleinschalige duurzame oplossingen voor enkele woningen. De tabellen 1 en 2 op pagina 138 geven een overzicht van de Nederlandse warmtenetten, opgesplitst in grootschalige netten (meer dan 5000 aansluitingen) en kleinschalige netten (minder dan 5000 aansluitingen). De meest voorkomende kleinschalige variant betreft de zogeheten blokverwarming. Dit is besproken in hoofdstuk 10.

Grootschalige stadswarmtecentrales

De meeste gebruikers van grootschalige stadswarmte wonen in de steden Rotterdam, Utrecht, Almere, Purmerend en in de regio rond Breda/Tilburg (Amercentrale). Deze stadswarmtecentrales zijn allemaal 'klassieke' centrales: door het verstoken van fossiele brandstof wordt op grote schaal elektriciteit geproduceerd. De warmte die hierbij vrijkomt, wordt ingevoed op een leidingennetwerk dat de warmte verspreidt naar de aangesloten woningen en bedrijven.

Warmtenet	Leverancier	Primaire energiebron ²	Aantal verbruikers (x 1.000)
Almere	Nuon Warmte	Gas	42,9
Almernet	Essentwarmte	Steenkool	31,1
Amsterdam	Nuon Warmte	Gas	7,5
Den Haag - Ypenburg	Eneco Warmte	Gas	8,9
Duiven- Westervoort	Nuon Warmte	Afval	8,7
Enschede	Essent Warmte	Gas	5,2
Helmond	Wamob	Gas	6,4
Leiden	Nuon Warmte	Gas	6,3
Purmerend	SV Purmerend	Gas	24,3
Rotterdam	Eneco Warmte	Gas	43,5
Utrecht - Stad	Eneco Warmte	Gas	41,7
Utrecht - Leidsche Rijn	Eneco Warmte		
Utrecht - Nieuwegein	Eneco Warmte		
Totaal			226,5

Tabel 1 Overzicht van grootschalige warmtenetten in Nederland, stand van zaken 2009. Bron: Energiekamer, 2009

Type	Woning (x 1.000)	Netten
Eeneco	23,4	192
Essent	14,3	72
Nuon	32,8	22-70
Overig	265,3	± 6.600
Totaal	335,8	± 6.900

Tabel 2 Overzicht van kleinschalige warmtenetten in Nederland, stand van zaken 2009. Het betreft hier zowel kleine stads- en wijkverwarming als blokverwarming. Blokverwarming komt verreweg het meeste voor, maar heeft gemiddeld weinig aansluitingen per net. Bron: Energiekamer, 2009

Het primaire net, dat direct van de centrale komt, voert water op hoge temperatuur en druk. De aanvoer- en retourtemperatuur kunnen oplopen tot 130 respectievelijk 110 °C. Via wijkstations wordt met warmtewisselaars de warmte in kleinschaliger wijknetwerken gevoed. De druk en temperatuur van het secundaire netwerk zijn iets lager dan in het primaire netwerk. Vaak zijn op verschillende plekken in het warmtenet tussenstations aangebracht met hulpketels. Bij uitval van de warmtelevering of in geval van zeer grote warmtebehoefte kunnen deze ketels bijspringen om de warmtevoorziening op peil te houden.

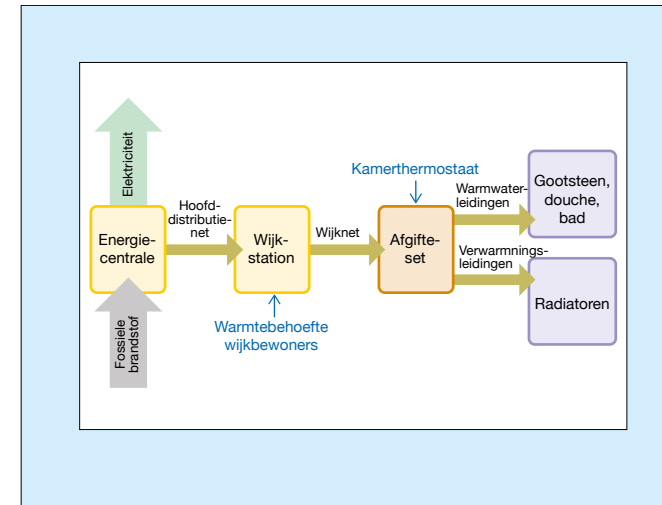
Figuur 2 geeft een schematisch overzicht van de componenten in een grootschalig warmtenet. Iedere gebruiker is met het warmtenet verbonden door middel van een afgifteset. In de afgifteset wordt het warmteverbruik gemeten en geregeld. Het warme water uit het warmtenet loopt meestal direct door de radiatoren in de woning, zonder tussengeschakelde warmtewisselaar. Warm tapwater wordt wel met behulp van een warmtewisselaar gemaakt, omdat het water in het warmtenet natuurlijk niet geschikt is voor huishoudelijk gebruik.

Aangezien in deze standaardconfiguratie zowel tapwater als ruimteverwarming vanuit het warmtenet geleverd wordt, moet de temperatuur van het aangevoerde water het hele jaar door hoog zijn: hierbij wordt doorgaans gewerkt met 90 respectievelijk 70 °C voor aanvoer en retour in het secundaire net.

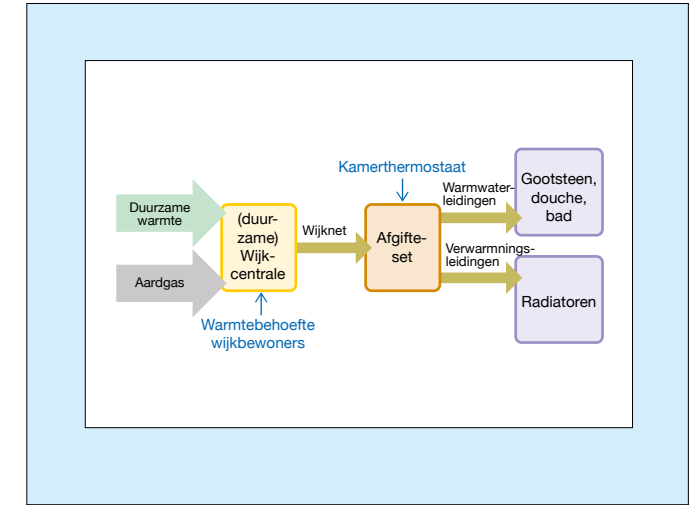
Kleinschalige warmtenetten

Het aantal kleinschalige warmtenetten is groot. Ze zijn van zeer uiteenlopende samenstelling. De kleinere netten variëren van ouderwetse (en inefficiënte) centrale warmtelevering met een traditionele verwarmingsketel tot moderne netten waarin verschillende duurzame technieken worden toegepast.

In de huidige ontwikkeling worden kleinschalige warmtenetten vooral toegepast om duurzaamheid op wijkniveau te realiseren. Sommige duurzame opties zijn namelijk van nature te grootschalig voor individuele woningen, hoewel dit in de toekomst nog kan veranderen. Denk bijvoorbeeld aan diepe geothermie, wko-systemen, wijk-wkk of biomassa.



Figuur 2 Schematische opbouw van een grootschalig warmtenet. Bij de productie van elektriciteit in de centrale komt restwarmte vrij. Deze warmte wordt via distributienetten naar de uiteindelijke warmtegebruiker gebracht.



Figuur 3 Opbouw van een kleinschalig duurzaam warmtenet. Op wijkniveau wordt gebruikgemaakt van duurzame warmte van de zon of uit de bodem. Meestal is als back-up een conventionele ketel op aardgas beschikbaar.



Figuur 1 In Utrecht ligt het oudste stadswarmtenet van Nederland. In 1923 werd het Algemeen Ziekenhuis aangesloten op de elektriciteitscentrale in de Nicolaas Beetsstraat. Archiefphoto stadswarmtenet Utrecht, 1923

buisen. Slechte moffen zijn een veelvoorkomende oorzaak van lekkages. Het is belangrijk lekkages zo veel mogelijk te voorkomen, want als de bodem eenmaal is dichtgemaakt, is het lastig om de bron van een lekkage op te sporen.

Voor kleinschalige warmtenetten wordt vaak gebruikgemaakt van complete kunststofsystemen met een kleine diameter. Deze buizen kunnen gemakkelijker worden gelegd dan de zware stalen systemen en hebben nauwelijks last van uitzetten als er warm water doorheen stroomt. Soms kan zelfs gebruik worden gemaakt van flexibele buizen, wat de aanleg van bochten sterk vereenvoudigt.

11.4 Technische prestaties

De energetische prestaties van een warmtenet zijn sterk afhankelijk van de manier waarop de warmte wordt opgewekt en het temperatuurniveau waarop de warmte geleverd wordt. Hoe hoger de temperatuur in het warmtenet, hoe groter de verliezen zullen zijn. Een lage distributietemperatuur is daarom altijd te verkiezen boven een hoge. Als het opwekkendement van de warmte echter zeer hoog is (bijvoorbeeld bij restwarmtebenutting), kan zelfs met relatief hoge distributieverliezen nog een betere energetische prestatie geleverd worden dan met een conventionele ketel.



Figuur 5 Een warmtenet in aanleg. Foto: Essent, Riesjard Schropp

Figuur 6 geeft een voorbeeld van grootschalige stadsverwarming. De elektriciteitscentrale levert in dit voorbeeld warmte met een rendement van 200%. Dit getal is gebaseerd op de compensatie van gedeerde elektriciteitsproductie: door de warmtelevering neemt immers het elektrisch rendement van de centrale iets af. Het is in het algemeen moeilijk te zeggen hoe groot de invloed van het aftappen van warmte is. Het temperatuurniveau waarop de warmte wordt afgetapt heeft vanzelfsprekend invloed, maar ook speelt de hoeveelheid warmte die wordt afgevoerd een belangrijke rol.

Een berekening met typische getallen voor een stadswarmtecentrale is als volgt:

- 1) Gedeerde elektriciteitsproductie (inclusief bijstook): $0,20 \text{ GJ}_E / \text{GJ}_W$
Voor iedere GJ warmte die geleverd wordt, wordt 0,20 GJ elektriciteit minder opgewekt.
- 2) Elektrisch rendement: 40%
Het elektrisch rendement geldt indien warmte wordt afgetapt.
- 3) Brandstof nodig om gedeerde elektriciteit te compenseren: $0,20 \text{ GJ} / 40\% = 0,50 \text{ GJ}$

We zien dat iedere GJ geleverde warmte 0,50 GJ brandstof kost. Het rendement van de warmteproductie is dus 200%. Hier komen nog distributie- en afgifteverliezen bij, zodat het totale systeemrendement duidelijk lager ligt dan 200%.

In figuur 7 is een rekenvoorbeeld gegeven voor een wijkcentrale. In de figuur is een gasmotor-wkk gebruikt. Deze heeft effectief een hoger rendement dan een HR-ketel, omdat door de elektriciteitsproductie brandstof wordt uitgespaard die anders in een elektriciteitscentrale zou moeten worden verstoekt. Een deel van de energiewinst gaat weer verloren door de transportverliezen, maar de totale energieprestatie is desalniettemin beter dan bij een HR-ketel.

11.5 Economie en beleid

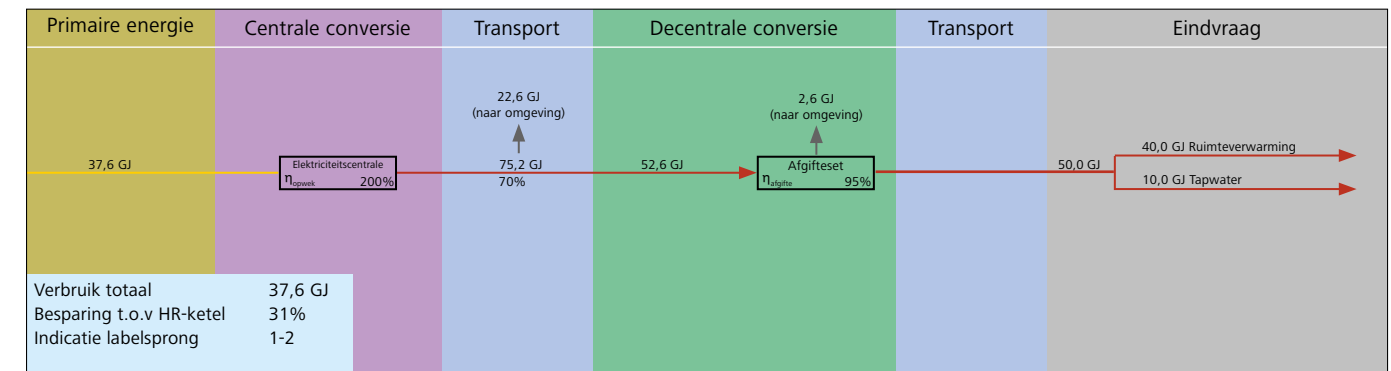
De investering voor een warmtenet is hoog. Als grove indicatie kan worden uitgegaan van circa één miljoen euro voor een kilometer leiding in (vol) bebouwd stedelijk gebied. Gezien de hoge basisinvesteringen moeten warmtenetten voor een zeer lange

periode worden ontworpen en aangelegd. Als het netwerk eenmaal is aangelegd, is vervanging duur en moeizaam, dus de buizen moeten bestand zijn tegen langdurig gebruik en beperkt onderhoud.

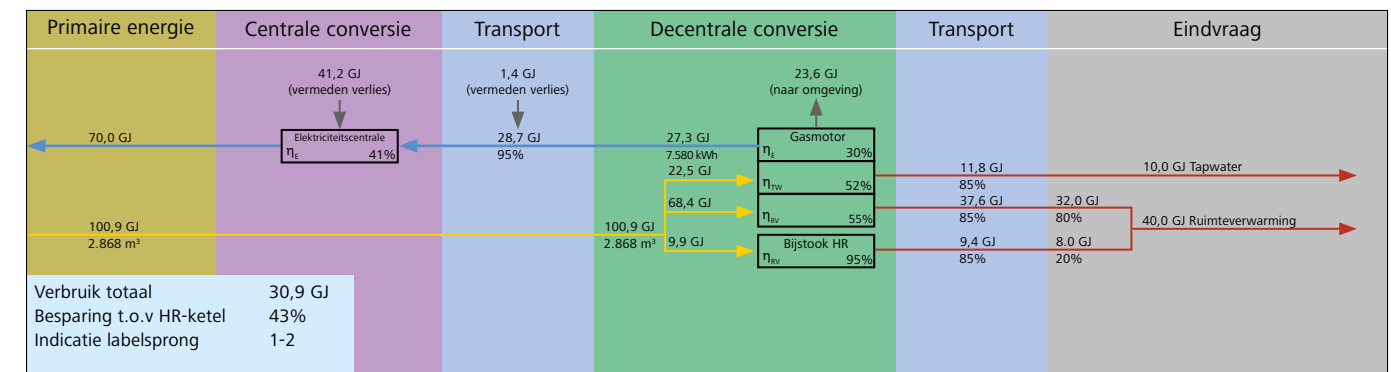
Tezamen maken deze technische en financiële argumenten duidelijk dat de succesvolle exploitatie van een warmtenet een zaak is van de lange termijn. Na een hoge investering kan het tien of zelfs twintig jaar duren voordat een warmtenet compleet is terugverdiend. Een fictief voorbeeld van een cashflowberekening is gegeven in figuur 8 op pagina 144.

Omdat de exploitatie van een warmtenet een zaak is van de lange termijn, is er een wettelijke aansluitplicht voor kleinverbruikers. Als een warmtenet langs een woning (of bedrijf) van een kleinverbruiker wordt aangelegd, is deze verbruiker verplicht om zijn warmte af te nemen van het warmtenet.

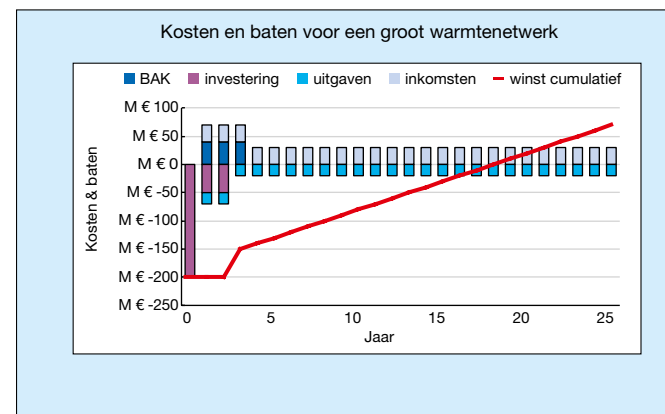
Dit betekent dat gebruikers sterk afhankelijk zijn van de exploitant van het warmtenet, want er is geen mogelijkheid om een andere warmtevoorziening te kiezen. De warmtewet is er dan ook op gericht om kleinverbruikers (consumenten) maximale bescherming te bieden. Dit komt onder meer tot uiting in een



Figuur 6 Energiestroomdiagram van een elektriciteitscentrale met warmtenet. Om op centraal niveau warmte te kunnen onttrekken, moet iets meer energie worden toegevoegd dan voor elektriciteitsproductie alleen. Als transportverliezen worden meegerekend, blijft in dit voorbeeld een verbetering van ruim 30% over ten opzichte van een HR-ketel. De pompenergie is meegenomen in de transportverliezen.



Figuur 7 Energiestroomdiagram van een wijk-wkk met een gasmotor als productie-installatie. Door de korte leidingen is het transportverlies beperkt. De combinatie van warmte- en elektriciteitsproductie in een wkk levert verder voordeel op, zodat de totale besparing in dit voorbeeld boven de 40% uitkomt.



Figuur 8 Kosten en baten voor een warmtenetwerk. In de eerste jaren moet de exploitant flink investeren. De bewoners die worden aangesloten (hier vindt de aansluiting van de klanten verspreid over drie jaar plaats), betalen een éénmalige bijdrage in de aansluitkosten (BAK) en verder betalen zij jaarlijks voor de afgenomen warmte. De kosten voor de exploitant bestaan uit de inkoop van warmte, onderhoud en administratie. Voor het overzicht is in deze voorbeeldberekening de rente niet meegenomen.

maximale tariefstelling, het zogenaamde ‘niet-meer-dan-anders-tarief’ (NMDA-tarief). Het NMDA-tarief wordt vastgesteld door de warmtelevering te vergelijken met een referentiesituatie waarin de warmte zou worden opgewekt door een HR-ketel.

11.6 Verwachte ontwikkelingen

Er zijn verschillende gemeenten die de aanleg van warmtenetten stimuleren. Gezien de grote hoeveelheid restwarmte die nu nog onbenut wordt weggekoeld door de industrie en door elektriciteitscentrales, zijn er nog volop kansen. Hiertegenover staat echter een trend om elektriciteitscentrales vanwege de gewenste beschikbaarheid van grote hoeveelheden koelwater in perifere (kust)regio’s in het land op te stellen (zoals de Maasvlakte en het Eemshavengebied), waardoor warmtebenutting lastig wordt.

Ook op Europees niveau wordt warmtebenutting serieus genomen. Er is Europese wetgeving in ontwikkeling die het gebruik van restwarmte van elektriciteitsproductie verplicht gaat stellen.

In nieuwbouwwijken worden kleinschalige warmtenetten steeds vaker toegepast. Een groot voordeel bij nieuwbouw is het relatieve gemak waarmee een warmtenet kan worden gebouwd. Juist voor grootschalige duurzame opties, zoals diepe geothermie of wko-systemen, is een lokaal kleinschalig warmtenet een essentiële schakel in het systeem. Gezien de steeds strengere eisen aan het energiegebruik van woningen en wijken mag verwacht worden dat dergelijke duurzame opties – en daarmee ook de bijbehorende kleinschalige warmtenetten – vaker zullen worden toegepast.

Daarnaast ligt er ook een kans om de stijgende koelvraag in de woningbouw en de kleine utiliteitsbouw in te vullen met sorptiekoelers, die dan de uiteindelijke warmtevraag in een wijk in de warme maanden doen stijgen. Dit is positief voor de exploitatie van het warmtenet.

Er is echter ook een trend die het toepassen van warmtenetten in de toekomst lastiger kan maken. Doordat de warmtevraag van nieuw gebouwde woningen steeds kleiner wordt, wordt de warmtebehoefte in een wijk eveneens steeds kleiner (dat wil zeggen het aantal GJ dat per wijkoppervlakte nodig is). Het leidingnet dat noodzakelijk is om de wijk van warmte te voorzien, zal echter nog steeds dezelfde lengte hebben en ruwweg dezelfde investering vergen. Een lagere warmtevraag per oppervlakte is dan een financieel risico voor het warmtenet.

In de komende jaren zal blijken welke ontwikkelingen dominant zijn en of de rol van groot- en kleinschalige warmtenetten in de toekomst nog zal groeien. ■



Hoofdstuk 12

Voorbeeldprojecten

In dit hoofdstuk vier voorbeelden van eigentijdse verwarmingsconcepten voor woningen. Aan de orde komen verwarmingssystemen met elektrische warmtepompen, een collectief systeem met gaswarmtepompen en thermische zonne-energie, een woonwijk met micro-wkk en een van de eerste systeemrenovaties met zonne-energie. De volgorde van de voorbeelden is willekeurig.

De Bomenwijk in de Delftse wijk Vrijeban bestaat uit eengezinswoningen en portiekflats uit de jaren vijftig. Bij het moderniseren van deze woningen is gekozen voor warmte- en koudeopslag in de bodem, **elektrische warmtepompen**, individuele en collectieve grondbronnen en **lagetemperatuurverwarming**. In de zomer van 2011 zijn de eerste woningen opgeleverd, met een EPC tussen 0,53 en 0,64.

Negen flatgebouwen in Haarlem stonden op de nominatie om te worden gesloopt. In plaats daarvan koos de eigenaar voor renovatie en grootschalige toepassing van zonne-energie, **gasabsorptiewarmtepompen**, kortetermijnopslag en seizoensopslag. In totaal zijn zestien gasabsorptiewarmtepompen geplaatst met een totaal vermogen van 620 kW. De warmtebron is een aquifer op 115 meter diepte.

In de Apeldoornse wijk Woudhuis zijn 173 woningen voorzien van een **HRe-ketel**. De ketels zijn geplaatst achter één transformatorstation. Daarmee levert het project een uniek inzicht in het effect van zoveel decentrale opwekkers op het gas- en elektriciteitsnetwerk. Netwerkbeheerder Liander heeft het project aangegrepen om de mogelijkheden van **smart grids** te verkennen.

In 1982 was Froukemaheerd, aan de noordoostkant van Groningen, een van de eerste woonwijken waar op grote schaal **zonnecollectoren** werden toegepast. Na 27 jaar is het collectorsysteem vervangen en gemoderniseerd. De bestaande warmteopslag in de bodem is geïntegreerd in het nieuwe systeem. De nieuwe collectoren hebben een hogere opbrengst en zuiniger pompen. Daarnaast is de aansturing verbeterd, zodat onnodig warmte-transport wordt voorkomen.

12.1 Warmtepompen: Bomenwijk, Elzenlaan Delft

De Bomenwijk is een woonbuurt binnen de Delftse wijk Vrijeban. De oorspronkelijke eengezinswoningen en portiekflats zijn gebouwd in de jaren vijftig. Eigenaar Vestia Delft heeft besloten de wijk te vernieuwen en de woningen ingrijpend te moderniseren. In de zomer van 2011 is het eerst deelplan (Elzenbloesem) opgeleverd. Deze eerste fase bevat koopwoningen, huurappartementen en enkele winkelpanden.

Duurzaamheid loopt als een rode draad door het hele project. Voor verwarming, warm water en koeling wordt gebruikgemaakt van warmte- en koudeopslag in de bodem. Het toegepaste klimaatstelsel is gebaseerd op elektrische warmtepompen, individuele of collectieve grondbronnen en laagtemperatuurverwarming.

Projectopzet

De elektrische individuele combiwarmtepompen zijn monovalent: zij leveren de totale warmtevraag voor ruimteverwarming via een vloerverwarmingssysteem. In de badkamers is een klein elektrisch kacheltje opgenomen omdat de vloerverwarming mogelijk niet onder alle omstandigheden de gevraagde ruimtetemperatuur van 24 °C kan bewerkstelligen. Uitsluitend om warmtelevering te garanderen bij storingen is een elektrisch element aanwezig in de

Eigenaar	Woningcorporatie Vestia Delft		
Type woningen	16 rijtjeswoningen	'Elzenborgh' 36 appartementen	'De Witte Linde' 35 appartementen
Eigendomsvorm	Koop	Huur	Huur
EPC-waarde	Hoekwoning 0,56 Tussenwoning 0,53	0,64 (brochure)	0,64 (brochure)
Energie label		A+	A+
Ventilatie	Gebalanceerde mechanische ventilatie met warmterugwinning		
Afgiftesysteem	Vloerverwarming $T_{aanvoer} / T_{retour} = 38 \text{ °C} / 32 \text{ °C}$		
Systeem	Individuele elektrische combi-warmtepomp met individuele bodem-warmtewisselaar	Individuele elektrische combi-warmtepomp met collectieve bodem-warmtewisselaar	Individuele elektrische combi-warmtepomp met collectieve bodem-warmtewisselaar
Functies	Verwarmen, warm water en vrije koeling		

warmtepomp. In principe draagt dit niet bij aan de jaarlijkse warmtelevering.

De warmtepompen gebruiken de bodem als warmtebron. Bij de twee appartementengebouwen is die warmtebron collectief uitgevoerd. Door de warmteonttrekking in de winter is de bodem in de zomer relatief koud. Hiermee kunnen in de zomer de woningen



Figuur 1 De bomenwijk, onder en boven de grond. Links zestien herenhuizen, in het midden woongebouw 'Elzenborgh' en rechts woontoren 'De Witte Linde'. Bron: Vestia Delft

gekoeld worden. Dit gebeurt rechtstreeks, zonder dat de warmtepomp hoeft te draaien, via een warmtewisselaar voor 'vrij koelen' en via de vloerverwarming (zie figuur 2). Doordat in de zomer warmte teruggevoerd wordt naar de bodem, vindt regeneratie van de warmtebron plaats. Aan het begin van het stookseizoen is de bodem dan weer ongeveer op de uitgangstemperatuur.

Regeling

De regeling gaat via een hoofdkamerthermostaat die leidend is en die bepaalt of er in huis gekoeld of verwarmd wordt. In elk vertrek is een naregeling geïnstalleerd.

Warm water

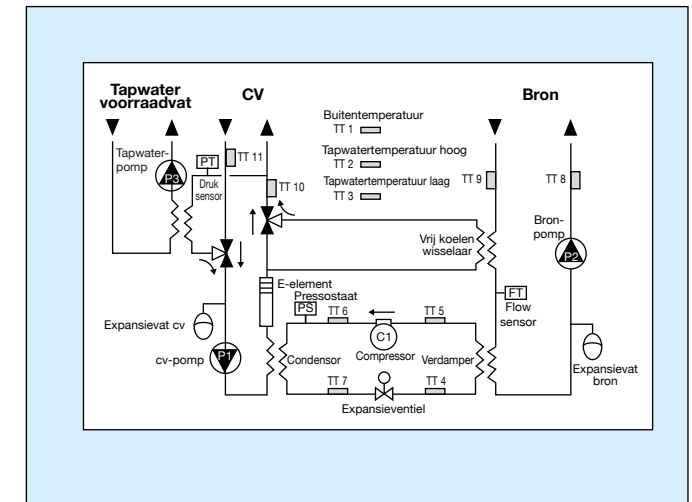
De woningen zijn standaard uitgerust met een boiler van 150 liter, die door de warmtepomp op 60 °C wordt gehouden. Om de goede balans te vinden tussen een hoog opwekkingsrendement en maximaal comfort voor de bewoners (dat zij bovendien zelf kunnen beïnvloeden), kent het warmwatersysteem drie standen:

1. De economische stand. Warm water wordt 's nachts bereid op daluurtarief (nachtstroom) tot een vattertemperatuur van 60 °C.
2. De comfortstand. Regeling zoals in de economische stand, met extra inzet van de warmtepomp overdag, zodra de temperatuur van het getapte water daalt onder 45 °C. De vattertemperatuur wordt dan op 55 °C gebracht.
3. De booster-stand. Voor extra warm water kan een elektrisch element in het boilervat worden ingeschakeld. Dat gebeurt met een knop op de hoofdthermostaat.

Beheersvorm

De 71 appartementen zijn huurwoningen. Hier is Vestia Energie BV de eigenaar van het collectieve bronsysteem. Vestia Delft is eigenaar van de woningen en de binnen-installatie. De huurders betalen op basis van de capaciteit van de warmtepomp in hun woning een vastrecht voor de collectieve warmtebron. Daarin is het energiegebruik van de centrale bronpomp meegenomen. Het onderhoud van het systeem wordt collectief geregeld op kosten van Vestia Energie.

De zestien eengezinswoningen zijn koopwoningen. De eigenaren zijn tevens eigenaar van de individuele bodemwarmtewisselaar en van de warmtepomp. De kopers krijgen vijf jaar garantie op het functioneren van de warmtepomp en de bron, inclusief onderhoud. Daarna krijgen ze de gelegenheid om mee te lopen



Figuur 2 Een Principeschema bij individuele gesloten bronnen. Bij de collectieve systemen met collectieve bron is de bronpomp vervangen door een bronklep en bevindt de bronpomp zich in het collectieve systeem (niet getekend). Bron: Vestia Delft

in het collectieve onderhoudscontract dat Vestia Energie heeft voor de huurwoningen, onder dezelfde condities. Alle bewoners betalen zelf hun elektriciteitskosten.

Ervaringen van gebruikers

De meeste bewoners waren onbekend met de warmtepomptechniek. Er is van tevoren uitgebreid met de bewoners gecommuniceerd over het warmtepompsysteem, zowel over het comfort als over de relatie tussen systeemrendement en bediening. In het algemeen ervaren de bewoners het systeem als comfortabel. Aandachtspunten zijn de beperkte boilerinhoud en de mogelijke hogere elektriciteitskosten wanneer men zich een al te royaal warmwatergebruik veroorlooft.

Monitoring

Monitoring gebeurt op afstand en is uitbesteed aan een gespecialiseerd bedrijf. De warmtepompen worden gemonitord om verschillende redenen:

1. Om inzicht te krijgen in het momentane functioneren van het warmtepompsysteem en om de ontwikkeling ervan op langere termijn te kunnen volgen.
2. Om preventief onderhoud aan te sturen.

3. Om storingen te lokaliseren en op basis daarvan te kunnen ingrijpen. Dat kan eventueel zelfs vóórdat een bewoner zelf iets bijzonders heeft gemerkt. Bij storingen waarschuwt het monitoringbedrijf de installateur van het systeem, die ook verantwoordelijk is voor het onderhoud.
4. Om het systeem te controleren in het licht van de gegeven garanties. De gemeten *seasonal performance factor* (seizoens-gemiddelde COP) moet binnen een bepaalde bandbreedte passen. Zo niet, dan wordt de leverancier of de installateur erbij gehaald.
5. Om de brontemperatuur te volgen. Dit is een zeer belangrijke randvoorwaarde voor het behalen van de berekende systeemrendementen. Met name bij de collectieve bron wordt ook de warmtebalans op lange termijn in de gaten gehouden. Het uitvoerende bedrijf registreert continu de gemeten brontemperaturen en legt deze vast om ze te vergelijken met de brontemperaturen die tijdens de ontwerpfase werden voorspeld.

Het bewaken van de kwaliteit van de bron vindt plaats door:

- Het meten van het vermogen, afgegeven aan de aangesloten warmtepompen, via het monitoringsysteem van de warmtepompen.
- Het meten van het opgenomen vermogen van de bronpompen.
- Het meten van de waterdruk in het bronsysteem.
- het berekenen van het te verwachten temperatuurverloop van de bron.
- Het bepalen van de totaal aan de bron onttrokken en toegevoerde warmte.
- Het controleren of de bron het verwachte temperatuurniveau bereikt.

Het bewaken van ieder warmtepompsysteem omvat het volgende:

- Het meten van de gerealiseerde temperatuur in de woning.
- Het vastleggen van de op de kamerthermostaat ingestelde temperatuur.



Figuur 3 Impressie van Bomenwijk fase 1. Bron: Vestia Delft

- Het meten van de aanvoer- en retourtemperatuur in het afgiftesysteem.
- Het meten van de temperatuur in het boilervat.
- Het berekenen van het afgegeven vermogen van de warmtepomp (uit gemeten temperaturen, drukken en de compressorkarakteristiek).

- Het meten van het elektriciteitsverbruik, uitgesplitst naar verwarmen, koelen en warm water.

Meer informatie

- Vestia Delft – Leaflet ‘Klimaatfolder Lindebloesem’ (www.vestia.nl/Delft/OverVestia/BuurtenEnWijken/Bomenwijk)

Ontwerpfilosofie

Om tot een succesvol project te komen heeft Vestia alle ervaringen gebruikt die in voorgaande jaren zijn opgedaan met warmtepomp-projecten. Hieruit zijn enkele kritische succesfactoren af te leiden, die hieronder kort worden benoemd.

1. Systeemontwerp

- Integraal ontwerpen. Het onderwerp duurzaamheid van meet af aan meenemen in het ontwerp.
- ‘Voorwaarts integreren’ van het bouwproces. Dit betekent dat leverancier, installateur en aannemer zo vroeg mogelijk gezamenlijk aan tafel zitten.
- ‘Achterwaarts integreren’ van het bouwproces. Dit betekent ondermeer dat de installateur niet alleen het warmtepompsysteem realiseert, maar later ook het onderhoud ervan voor zijn rekening neemt.
- Ontwerpen vanuit prestatie-eisen aan de deelsystemen, bijvoorbeeld een COP-eis ten aanzien van de warmtepompen of een maximaal toegestane temperatuurdaling (na 25 jaar) van de bronnen.

2. Inkoop

- Bij de selectie van de warmtepompen is niet alleen de prijs maar ook de kwaliteit, de onderhoudsvriendelijkheid, de service en de monitoring van belang geweest. Hieruit is een shortlist ontstaan van twee Nederlandse leveranciers waarvan één uiteindelijk de vaste leverancier is geworden voor de woningen.
- De schaalgrootte van het project (71 warmtepompen) draagt bij aan gunstige prijzen.
- Voor het onderhoud hanteert Vestia zoveel mogelijk vaste prijzen per warmtepomp per jaar. Alleen installateurs die hierin meegaan zijn acceptabel voor Vestia. Dit geldt met name voor de warmtepompen en de binneninstallaties. Voor het onderhoud van de bronnen zijn vaste prijzen niet haalbaar omdat er grote verschillen zijn in bronconfiguraties.
- Garanties. De warmtepompleverancier geeft een productgarantie; de installateur een systeemgarantie en een garantie op onderhoud.

3. Toezicht

- Continue directievoering en controle tijdens de bouw.
- Toetsing van geleverde bouwkwiteit met behulp van een *blower door* proef, thermografische beelden, enzovoorts.

4. Communicatie met de (aanstaande) bewoners

- Voorlichting over te verwachten systeemprestaties, ruim vóór de oplevering aan optanten en kandidaat-huurders.
- Gerichte uitleg vlak voor oplevering ter plaatse.
- Bij sleuteloverdracht ontvangt de bewoner een beknopte handleiding, een Woonwijzer en een Klimaatbrochure.
- Vier tot acht weken na oplevering wordt de bewoner bezocht om te zien of alles naar wens functioneert en ontvangt hij indien nodig nadere uitleg.
- Gedurende het gehele communicatietraject worden niet alleen de voordelen van het systeem inzichtelijk gemaakt maar ook de beperkingen en aandachtspunten zoals: de traagheid van LTV-systemen, de beperkingen ten aanzien van vloerafwerkingen, het feit dat koken op gas niet mogelijk is en de mogelijke comfortproblemen bij veel ventilatie. Ook het feit dat de hoeveelheid en het debiet bij gebruik van de ecostand beperkt zijn.
- Vestia doet altijd een beroep op de bewoners om mee te werken aan het behalen van de gezamenlijke doelstelling. Vestia kan de kwaliteit van de woningen en installaties (dus het systeemrendement) garanderen, maar het uiteindelijk energiegebruik wordt in hoge mate bepaald door het bewonersgedrag.

5. Betrouwbare partner

- Vestia heeft een onderhoudsverplichting en komt die na. Wanneer er een storing of een defect optreedt, lossen de betrokken installateurs dit binnen de afgesproken tijdslimieten op. Er is een boetclausule bij nalatigheid. Voor huurwoningen geldt dit permanent, voor koopwoningen gedurende de garantieperiode.

12.2 Warmtepompen en zon-thermisch: Schalkwijk, Haarlem

Dit project is een mooi voorbeeld van efficiencyverbetering door renovatie. Negen flatgebouwen uit 1963 in de Haarlemse wijk Schalkwijk stonden aanvankelijk op de nominatie om te worden gesloopt. In plaats daarvan koos de eigenaar voor renovatie en grootschalige toepassing van zonne-energie, gasabsorptiewarmtepompen, kortetermijnopslag en seizoensopslag.

Projectopzet

Per decentrale technische ruimte zijn twee gasabsorptiewarmtepompen opgesteld. Deze warmtepompen worden gebruikt voor het voorverwarmen van tapwater en verwarmingswater. In totaal zijn zestien gasabsorptiewarmtepompen ingezet, met een totaal vermogen van 620 kW. De warmtebron is een aquifer die zich in een zandlaag op 115 meter diepte bevindt. Het aquifersysteem bestaat uit een doublet met een warme en een koude bron voor onttrekking en infiltratie. De warmte die in de zomer wordt ingevangen door de zonnecollectoren, wordt hierin opgeslagen. Het grondwater warmt dan op tot maximaal 45°C. In de wintermaanden verloopt het proces andersom: de warmte uit de warmtebron

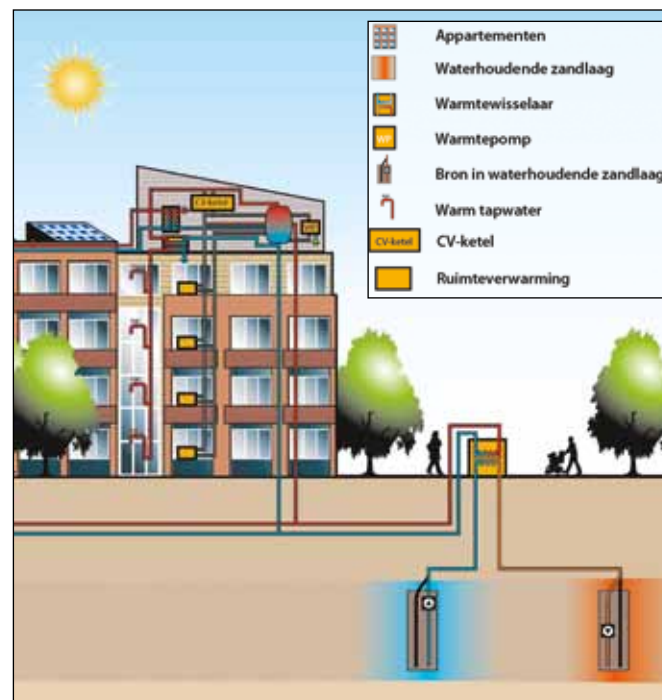
wordt dan via de gasabsorptiewarmtepompen overgedragen aan het warmtedistributienet van het woonblok.

Per woonblok is een buffervat van 9,5 m³ aanwezig. Via een warmtewisselaar en een circulatiesysteem wordt hiermee warm water bereid. De eventueel benodigde naverwarming voor ruimteverwarming en warm water vindt plaats via een HR-ketel voor pieklast.

Gemeten prestaties

Door verbeterde isolatie en de toepassing van zonnepanelen, gasabsorptiewarmtepompen en warmteopslag verbruiken de woningen op jaarbasis gemiddeld per woning 1.350 m³ minder aardgas. Dat is 70 % minder dan in de oude situatie. Het gemiddelde verbruik per woning komt nu uit op 600 m³/jr. Zonder gaswarmtepompen zou het verbruik per woning ongeveer 250 m³/jr

Project	Schalkwijk Haarlem
Gebruik	382 flatwoningen in negen blokken
Locatie	Schalkwijk Haarlem
Omvang gebouw	382 x 80 m ² BVO Circa 1.000 bewoners
Jaar van oplevering	2002
Type installatie	Zestien gasabsorptiewarmtepompen (38 kW elk) in combinatie met 2.850 m ² thermische zonnepanelen
Fabriek	Robur
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Verwarmen in de winter, koelen in de zomer
Capaciteit	620 kW voor verwarming 288 kW voor passieve koeling
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	20 °C
Warmtebron	Warmte- en koudeopslag in aquifer
Afgiftesysteem	Water (radiatoren)
Watertemperatuur	70/45 °C (gasabsorptiewarmtepompen worden gebruikt voor voorverwarming van ruimteverwarming en tapwater)
Gebouwbeheersysteem	Ja
Energieprestaties gemonitord	Ja



Figuur 4 Schema van de installatie met gasabsorptiewarmtepompen en zonneboilers. Bron: DWA Installatie- en energieadvies

hoger zijn. Een voordeel voor de bewoners is dat ze de ruimtemtemperatuur in hun woning zelf kunnen regelen, wat in de oude situatie niet mogelijk was. De gemeten opbrengst van de thermische zonnepanelen is 1.433.000 kWh/jaar (5.160 GJ), ofwel 13,5 GJ per woning.



Figuur 5 Wooncomplex in de Haarlemse wijk Schalkwijk. Bron: Techneco



Figuur 6 Opstelling van twee van de zestien gasabsorptiewarmtepompen. Bron: Techneco

Meer informatie

- www.gaswarmtepompboek.nl
- www.kennishuisgo.nl/voorbeeldprojecten

12.3 Micro-wkk: Smart Power City Apeldoorn

Een micro-wkk²⁸ levert naast warmte voor tapwater en ruimteverwarming ook elektriciteit. Op momenten dat er in de woning wel een vraag is naar ruimteverwarming of warm tapwater maar geen elektriciteitsbehoefte, zal deze elektriciteit aan het openbare elektriciteitsnet worden geleverd. Een belangrijke vraag is wat de impact is van deze decentrale elektriciteitsproductie op het elektriciteitsnet, met name wanneer veel micro-wkk's tegelijk in bedrijf zijn.

Om dit te onderzoeken is in 2009 in Apeldoorn het project Smart Power City van start gegaan. In dit project zijn 173 micro-wkk's geïnstalleerd in één wijk, achter één transformatorstation. Hoofddoel van het project is te bekijken wat de invloed van zo veel micro-wkk's is op het gas- en elektriciteitsnetwerk.

Projectopzet

Het belangrijkste doel van het project was om meer informatie te verkrijgen over de invloed op het elektriciteitsnetwerk van een hoge concentratie micro-wkk's. Daarnaast was Smart Power City Apeldoorn een uitstekende mogelijkheid om de grootschalige toepassing van micro-wkk op basis van Stirlingmotoren te testen.

Aantal woningen	173, waarvan 8 intensief bemeterd	
Locatie	De wijk Woudhuis in Apeldoorn	
Start	Vanaf begin 2009	
Technische specificaties	Type wkk	Stirlingmotor
	Uitvoering wkkk	Als solo- en combitoestel
	Thermisch vermogen	28 kW
	Elektrisch vermogen	1 kW
	Afmeting	90 x 42 x 49 cm
Partners	GasTerra Provincie Gelderland Gemeente Apeldoorn NUON (energieleverancier) Feenstra Verwarming (installatiebedrijf) Liander (netwerkbeheerder) De Woonmensen (woningcorporatie) Ons Huis (woningcorporatie) Remeha (fabrikant micro-wkk) UCPartners (adviesbureau)	
Besparing	Energier rekening tot 25% lager CO ₂ -emissiereductie tot 20%, ofwel 1.000 kg per jaar per woning	

In het project is gekeken naar de ervaringen van de gebruikers, de technische ervaringen met de ketels en ervaringen van de installateurs.

De lokale netwerkbeheerder, Liander, heeft het project aangegrepen om de mogelijkheden van intelligente distributienetten (de zogenaamde *smart grids*) te verkennen. Alle betrokken woningen kregen een digitale meter en ook het elektrische distributiestation is voorzien van extra meet-, regel- en opslagmogelijkheden, waarmee het een 'intelligent distributiestation' (IDS) werd.

Voor dit project is een projectteam geformeerd met verschillende partijen, van GasTerra tot en met woningcorporatie De Woonmensen. Twee medewerkers van de woningcorporatie zijn beschikbaar voor het beantwoorden van vragen van bewoners. Zo zijn de drempels voor informatieoverdracht zo laag mogelijk gehouden. Samen met installatiebedrijf Feenstra Verwarming is een planning voor de plaatsing van de micro-wkk's gemaakt. Direct na de installatie van de apparatuur hebben de bewoners uitleg gekregen over het gebruik van onder andere de kamerthermostaat. Voor een optimaal rendement moeten de bewoners namelijk anders met de thermostaat omgaan dan bij een gewone cv-ketel.



Figuur 7 De feestelijke opening van het Smart Power City project.

Resultaten

Ten tijde van het schrijven van dit boek was de eindrapportage van het project nog niet beschikbaar. De tussenresultaten geven al wel een positief beeld.

De bewoners zijn enthousiast en trots op hun eigen elektriciteitsproductie. Na enkele aanloopproblemen, bijvoorbeeld met het geluid van de toestellen, draaiden alle micro-wkk's al snel naar behoren. De kinderziektes in de technologie zijn zeker verholpen.



Figuur 8 Aan een correcte installatie van de micro-wkk's is veel aandacht besteed.

Uit metingen is onder meer gebleken dat de kwaliteit van de netspanning bij het intelligente distributiestation is toegenomen. Het opstellen van een hoge concentratie micro-wkk's in één woonwijk is dus geen probleem voor het netwerk, en kan zelfs de stabiliteit verbeteren.

Meer informatie

- Smart Power Foundation – Leaflet 'Zelf elektriciteit opwekken in Smart Power City Apeldoorn' (www.smartpowerfoundation.nl)
- Agentschap NL – Leaflet 'Smart Power City Apeldoorn en Intelligent Distributiestation', januari 2011 (www.agentschap-nl.nl)

12.4 Zonnewarmte: Froukemaheerd

In 1982 was Froukemaheerd een van de eerste woningbouwprojecten waarbij duurzame energie uit zonnecollectoren werd toegepast. Voor die tijd was een modern systeem toegepast, dat bestond uit vacuümgezogen buizen waarin koper dienst deed als warmtegeleider naar een waterleiding. Het systeem functioneerde 27 jaar lang goed. In 2009 was het echter toe aan vervanging. Ook nu werd weer gekozen voor een systeem op basis van zonne-energie.

Algemeen

Aantal woningen	96, in negen blokken	
Locatie	Froukemaheerd te Groningen	
Start	Eerste project 1982, renovatie in 2009	
Technische specificaties	Zonnecollectoren	Acht vlakkeplaat-collectoren per woning
	Naverwarming	Geiser voor tapwater in de woningen; collectieve HR-ketel voor ruimteverwarming
	Buffer	110 liter boiler per woning + ondergrondse collectieve opslag van 100 m ³ + verticale bodemwarmtewisselaars
	Zon-PV	515 stuks, totaal 100 kW _{peak}
Partners	De Huismeesters (woningcorporatie) Nefit (leverancier collectoren, naverwarming, boilers) BAM Techniek (aanleg)	
Besparing	60 % van de warmtebehoefte voor tapwater wordt geleverd door de zonnecollectoren. De zonnepanelen leveren samen 85.000 kWh elektriciteit per jaar.	

Projectopzet

Woningcorporatie De Huismeesters heeft er bewust voor gekozen om de 96 woningen opnieuw door middel van duurzame energie te voorzien van warm water en verwarming. In 1982 werd al een uitgebreid systeem voor warmteopslag in de bodem aangelegd. Dat systeem is zeer betrouwbaar gebleken en is nog lang niet afgeschreven, zodat De Huismeesters deze installatie wilde blijven gebruiken.

Het vernieuwde systeem is efficiënter dan het oude. De opbrengst van de collectoren is hoger en door frequentiere-

gelde pompen te gebruiken wordt elektriciteit bespaard. Daarnaast is de aansturing verbeterd, zodat onnodig warmte-transport wordt voorkomen. In de woningen waren alleen op de zolders enkele aanpassingen nodig om de nieuwe apparatuur te kunnen aansluiten.

Het oude systeem

In de oude situatie werd de warmte van de collectoren direct naar het centrale buffersysteem gestuurd. Vanaf hier werd de warmte verdeeld over de woningen. Zo nodig zorgde het centrale ketelhuis voor naverwarming. Iedere woning beschikte over een warmwaterboiler die werd meeverwarmd met de cv. Een geiser zorgde voor de naverwarming van het tapwater.

Dit systeem had twee belangrijke nadelen:

1. Door het heen en weer transporteren van water op een hoge temperatuur ging veel warmte verloren. Dit leidde onder meer tot klachten over de verwarming van de woningen achteraan het distributienet.
2. Voor de werking van het systeem moest een vaste hoeveelheid water worden rondgepompt, wat relatief veel elektriciteit kostte.



Figuur 9 Het oude systeem was aangetast door corrosie en aan vervanging toe. Bron: Nefit

Het nieuwe systeem

De warmte die wordt opgewekt door de collectoren wordt in de huidige situatie eerst gebruikt voor het verwarmen van tapwater in de woning zelf. Wanneer de warmte hier niet gebruikt kan worden, wordt deze per blok verzameld. Deze warmte wordt vervolgens weer verdeeld over het blok voor de verwarming van de woningen. Pas wanneer de warmte nergens in het blok gebruikt kan worden, wordt ze naar het centrale buffersysteem afgevoerd.

Voor de verwarming wordt eerst gekeken of de collectoren van het blok voldoende warmte leveren. Wanneer dit niet het geval is, wordt warmte uit het centrale buffersysteem gehaald. Wanneer ook het centrale buffersysteem onvoldoende warmte kan leveren, wordt per blok bijgestookt met een HR-ketel.

1. Pompgroepen - Per afnemer is een pompgroep opgenomen. De pompen halen de warmte van de collectoren en brengen deze naar de afnemers. **2. Boiler** - In deze boiler wordt het warmwater door het SolarLine-systeem geleid. **3. TSA** - In deze platenwarmtewisselaar wordt de warmte van het SolarLine-systeem overgedragen aan de cv. **4. Driewegklep** - Deze klep wordt aangestuurd door de kamerthermostaat. De klep bepaalt of de woning wel of niet wordt verwarmd. **5. Drukgroep** - Dit is de beveiliging van de installatie. Mocht de druk te hoog oplopen dan wordt het teveel aan vloeistof afgevoerd. **6. Zonneboilerregelaar** - De regelaar bepaalt op basis van temperaturen welke pomp wanneer mag draaien. Warm water heeft voorrang. **7. Geiser** - Wanneer er onvoldoende zon is, warmt de geiser het water op. **8. Mengventiel** - De zonneboiler wordt opgewarmd door de zon tot circa 85°C. Het mengventiel mengt koud water bij zodat er maximaal 62°C kan worden getapt.



Figuur 10 De installaties in de woning. De boiler van 110 liter (links) en de geiser (rechts) zorgen voor warm water. Voor verwarming is per blok een centrale HR-ketel opgesteld. Bron: Nefit

Uitwisseling van warmte in de gehele wijk blijft dus mogelijk, maar in eerste instantie wordt de warmte zo veel mogelijk binnen de woning en binnen het eigen blok ingezet. Minder warmtetransport zorgt voor minder thermische verliezen en een lager elektriciteitsverbruik.

Door de hogere opbrengst van de nieuwe zonnecollectoren blijft er ruimte over op de daken. Deze ruimte is benut om PV-panelen te plaatsen voor elektriciteitsopwekking. Ten opzichte van het oude systeem zijn er vier belangrijke voordelen:

1. Er wordt veel minder water heen en weer getransporteerd en bovendien op een lagere temperatuur. Hierdoor gaat er veel minder warmte verloren en wordt energie bespaard.

2. Bij het nieuwe systeem worden alle pompen op toerental geregeld. De pompen werken alleen hard wanneer dit nodig is. Hierdoor verbruiken ze minder elektriciteit.
3. De naverwarming wordt per blok verzorgd. Hierdoor krijgen alle woningen voldoende warmte; comfortproblemen behoren tot het verleden.
4. De nieuwe pompen verbruiken veel minder elektriciteit. Bovendien produceren de nieuwe PV-cellen duurzame elektriciteit.

Bronnen

- Nefit – persbericht 'Opnieuw zonne-energie voor Groningse huizen', 2009
- Nefit – informatiefolder 'Opslagsysteem zonne-energie – Uitleg bewoners', 2009
- www.zonne-energieinnederland.nl/project_froukemaheerd



Figuur 11 Vanuit de lucht is de nieuwe situatie goed herkenbaar. Op de daken zijn de zonnecollectoren (de brede onderste strook op de daken) en de PV-panelen (de smalle bovenste strook op de daken) te herkennen. Onder het ronde grasveld is de centrale warmteopslag geplaatst.

Hoofdstuk 13

Thermodynamica in vogelvlucht

Dit boek gaat over verwarmen. Het behandelt verschillende technische oplossingen om aan de vraag naar ruimteverwarming en warm water te voldoen. Hoe verschillend de technische oplossingen ook zijn, ze kunnen allemaal worden begrepen aan de hand van enkele fysische uitgangspunten. Deze fysische wetten vormen samen de thermodynamica. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste begrippen uit de thermodynamica besproken. Dit maakt duidelijk wat er gebeurt in machines waarin arbeid (beweging, elektriciteit enzovoort) en warmte een rol spelen.

13.1 Energie, arbeid, warmte en efficiency

Energie is een lastig te definiëren begrip uit de natuurkunde. Een veelgebruikte definitie luidt:

Energie is het vermogen om arbeid te verrichten.

Deze definitie brengt ons echter niet veel verder, want nu moeten we nog begrijpen wat arbeid is. Een andere mogelijke definitie is:

Energie is het vermogen om een verandering tot stand te brengen.

Aan de hand van enkele voorbeelden blijkt dat deze definitie meer duidelijkheid schept.

- Zwaartekrachtenergie kan een object in beweging brengen:

als een steen vanaf een bepaalde hoogte wordt losgelaten, valt hij steeds sneller naar beneden.

- De warmte van een object kan worden gebruikt om een ander object op te warmen: brandend aardgas kan gebruikt worden om warm water te produceren en het warme water kan op zijn beurt weer een verkleumde bewoner onder de douche opwarmen.
- Chemische energie kan gebruikt worden om warmte te produceren: in buskruit reageren verschillende stoffen met elkaar waarbij een enorme hoeveelheid warmte vrijkomt. Zoveel en zo snel zelfs dat dit een ontploffing veroorzaakt.
- Bewegingsenergie kan gebruikt worden om elektriciteit te maken: de stroming van de wind kan via de wieken en de generator van een windmolen worden omgezet in een elektrische stroom.

Er zijn nog talloze andere vormen te bedenken van energie en verandering. Het is duidelijk dat in alle gevallen een omzetting plaatsvindt. Zwaartekrachtenergie wordt beweging, warmte van hoge temperatuur (een gasvlam) wordt warmte van een lagere temperatuur (warm water), chemische energie wordt warmte en beweging (opwarming en volumevergroting tijdens de ont-ploffing), beweging wordt elektriciteit.

De apparaten die in de hoofdstukken 7 (micro-wkk) en 8 (warmte-pompen) worden besproken, zijn voorbeelden van warmtemachines.

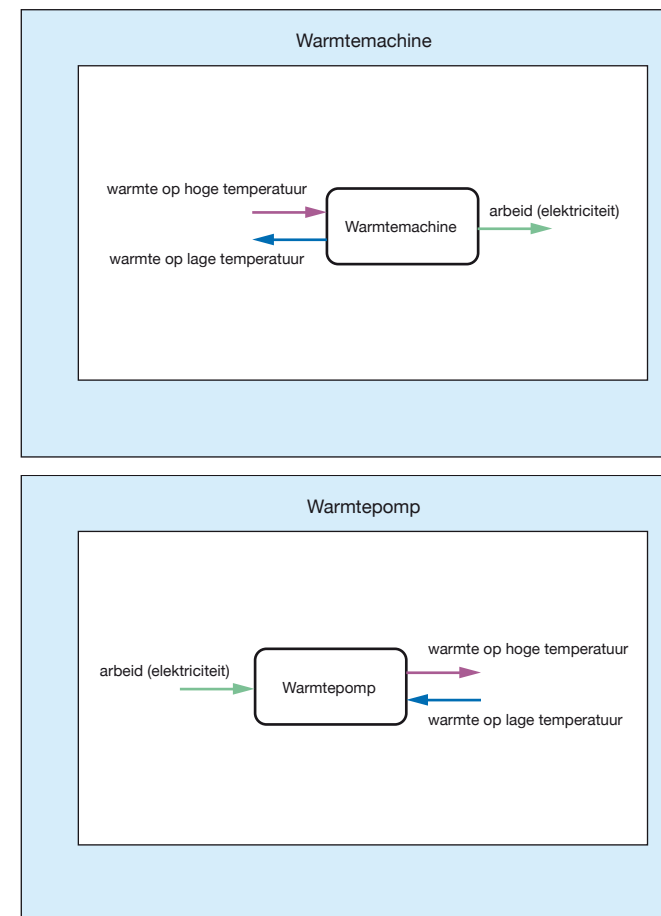


Figuur 1 In een achtbaan wordt zwaartekrachtenergie omgezet in beweging.

In een wkk-eenheid wordt warmte omgezet in arbeid (in de vorm van elektriciteit) en in een warmtepomp gebeurt het omgekeerde: elektriciteit wordt omgezet in warmte. Iets preciezer gezegd:

Een warmtemachine maakt uit een temperatuurverschil arbeid.

Een warmtepomp maakt uit arbeid een temperatuurverschil.



Figuur 2 Een warmtemachine maakt arbeid uit een temperatuurverschil. Een warmtepomp doet het omgekeerde en verplaatst warmte (ofwel: maakt een temperatuurverschil) door middel van arbeid.

Het begrip temperatuurverschil is van groot belang. Warm of koud is immers alleen van betekenis in relatie tot een andere temperatuur. Alleen als er een temperatuurverschil bestaat, kan warmte stromen van hoge naar lage temperatuur. Een warmtemachine of warmtepomp heeft dan ook altijd een 'hete kant' (waar bijvoorbeeld aardgas wordt verbrand) en een 'koude kant' (met bijvoorbeeld koelwater uit een rivier).

13.1.1 De efficiency van een warmtemachine

De twee temperaturen (de hete en de koude kant) bepalen gezamenlijk hoeveel arbeid met de machine gemaakt kan worden. Het is natuurlijk logisch dat een hogere temperatuur aan de hete kant zorgt dat er meer arbeid geleverd kan worden. Maar ook een zo laag mogelijke temperatuur aan de koude kant is van belang. De efficiency is simpelweg de verhouding tussen de hoeveelheid arbeid die geleverd wordt (Q_{arbeid}) en de hoeveelheid warmte die hiervoor wordt gebruikt (Q_{warmte}). Langs theoretische weg kan worden afgeleid wat de maximale efficiency (η) is van een warmtemachine.

$$\eta_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{arbeid}}}{Q_{\text{warmte}}} = \frac{T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}}}{T_{\text{hoog}} + 273}$$

Deze vergelijking staat bekend als de wet van Carnot, genoemd naar de Franse wiskundige Sadi Carnot (1796-1832). De wet geldt voor alle processen waarbij warmte wordt omgezet in arbeid. De term 273 is nodig om de temperatuur om te rekenen van absolute temperatuur (Kelvin) naar graden Celsius.

Laten we als voorbeeld een elektriciteitscentrale op aardgas bekijken. Als de verbrandingstemperatuur 1.250 °C is en de temperatuur van het koelwater 15 °C, dan vinden we voor de maximale efficiency

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1250 - 15}{1250 + 273} = 81\%$$

In de praktijk valt de efficiency altijd lager uit. De allerbeste gasgestookte centrales behalen momenteel een rendement van bijna 60% op bovenwaarde. Dit betekent dat voor iedere 100 MJ energie die in de centrale wordt verbrand in de vorm van aardgas, er 60 MJ elektriciteit wordt opgewekt. De overige 40% komt vrij in de vorm van restwarmte. Van de

60 MJ elektriciteit gaat nog een deel verloren tijdens het transport.

Het Carnotrendement bepaalt de limiet op de hoeveelheid arbeid (ofwel elektriciteit) die geproduceerd kan worden. De restwarmte die vrijkomt, kan nog wel benut worden. Het gelijktijdig benutten van de geproduceerde elektriciteit én de vrijkomende warmte is het wkk-principe. De totale efficiency van een wkk-centrale kan zeer hoog worden en is in de praktijk meestal duidelijk hoger dan het Carnotrendement.

13.1.2 De efficiency van een warmtepomp

Een warmtepomp doet het omgekeerde van een warmtemachine. Arbeid (meestal in de vorm van elektriciteit) wordt gebruikt om energie te creëren uit een temperatuurverschil, ofwel om warmte te 'verpompen' van een lage temperatuur naar een hoge temperatuur.

De efficiency van een warmtepomp wordt meestal beschreven als *coefficient of performance* (COP). Dit getal geeft de verhouding aan tussen de hoeveelheid warmte die verplaatst is van lage naar hoge temperatuur en de hoeveelheid arbeid die daarvoor nodig is. Het is van belang op te merken dat een warmtepomp dus niet een puur verwarmingstoestel is. Aan de warme kant levert het apparaat warmte, maar aan de koude kant onttrekt het juist warmte: er wordt gekoeld.

De wet van Carnot is ook van toepassing op warmtepompen. We willen nu echter niet weten hoeveel arbeid geleverd wordt uit een gegeven temperatuurverschil, maar we willen weten hoeveel warmte theoretisch maximaal²⁹ verplaatst kan worden bij een gegeven arbeid. We schrijven daarom de wet van Carnot als volgt:

$$COP_{\text{max koelen}} = \frac{Q_{\text{(warmte, verplaatst)}}}{Q_{\text{arbeid}}} = \frac{T_{\text{laag}} + 273}{T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}}}$$

Het subscript 'koelen' geeft aan dat we hier spreken van de hoeveelheid warmte die van de koude kant naar de warme kant wordt verplaatst, ofwel de hoeveelheid koeling die geleverd wordt. Zie ook figuur 3 op pagina 164.

Aan de warme kant van de warmtepomp wordt deze hoeveelheid warmte afgeleverd. Echter, de hoeveelheid arbeid die in de

warmtepomp is gestopt, komt óók aan de hogetemperatuurkant vrij als warmte (zie figuur 3). De nuttige warmte is dus de som van de verpompte warmte en de arbeid. Voor verwarmen is de COP daarom

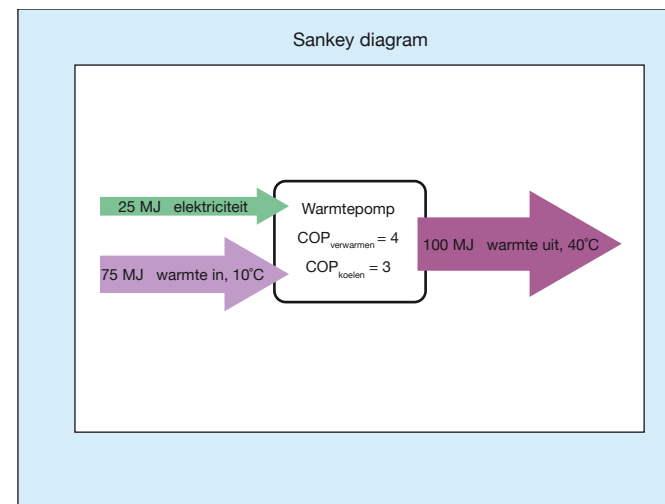
$$COP_{\text{max, verwarmen}} = \frac{Q_{\text{warmte, verplaatst}} + Q_{\text{arbeid}}}{Q_{\text{arbeid}}} = COP_{\text{max, koelen}} + 1 = \frac{T_{\text{hoog}} + 273}{T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}}}$$

Uit de vergelijkingen voor de COP zien we dat deze groter wordt als het verschil tussen de hoge en lage temperatuur kleiner wordt. Warmte verpompen tussen twee temperaturen die niet al te ver van elkaar liggen, is dus efficiënter dan grote temperatuur-sprongen overbruggen.

Twee voorbeelden:

- Een koelkast ($T_{\text{laag}} = 5 \text{ °C}$ en $T_{\text{hoog}} = 20 \text{ °C}$) heeft een maximale theoretische $COP_{\text{koelen}} = 18,5$
- Een warmtepomp ($T_{\text{laag}} = 10 \text{ °C}$ en $T_{\text{hoog}} = 40 \text{ °C}$) heeft een maximale theoretische $COP_{\text{verwarmen}} = 10,4$

In werkelijkheid haalt een warmtepomp het Carnotrendement



Figuur 3 De instroom van energie in een warmtepomp is gelijk aan de uitstroom. Met behulp van 25 MJ elektriciteit wordt in dit voorbeeld 100 MJ warmte gemaakt: een COP van 4. Aan de inputkant wordt 75 MJ warmte onttrokken. Als deze warmtepomp voor koeling wordt ingezet, is de COP dus $75/25 = 3$.

niet. Een zeer goede warmtepomp die goed onderhouden wordt, perfect is ingeregeld en onder goede omstandigheden draait, kan rond de 50 à 60% van dit maximale theoretische rendement halen. In de praktijk komt de jaargemiddelde COP vaak uit op ongeveer 40% van het Carnotrendement uit.

13.2 De gaswet en de warmtecyclus

De vorige paragraaf behandelde de theoretische efficiency van warmtemachines en warmtepompen. Deze paragraaf gaat in op de vraag hoe zulke apparaten eigenlijk werken.

13.2.1 Theorie van de warmtewet

In de meeste gevallen maken warmtemachines en warmtepompen gebruik van een gasvormig 'werkmedium'. Om de omzetting-processen te begrijpen, beginnen we daarom bij de ideale gaswet. Deze natuurkundige wet stelt dat het product van druk en volume van een gas gelijk is aan een vaste constante maal de temperatuur van het gas. In formulevorm:

$$P \cdot V = \text{Constante} \cdot (T + 273)$$

waarbij P de druk is, V het volume en T de temperatuur (gemeten in °C). Aan de formule is te zien dat het aanpassen van één van de variabelen (P , V of T) leidt tot veranderingen in de andere variabelen. Bijvoorbeeld:

- We kunnen de temperatuur verhogen bij constant volume ($T \uparrow$, V constant). De druk zal dan hoger worden ($P \uparrow$).
- We kunnen het volume verkleinen bij constante temperatuur ($V \downarrow$, T constant). De druk zal ook in dit geval hoger worden ($P \uparrow$).
- We kunnen de druk verhogen en de temperatuur verlagen ($P \uparrow$, $T \downarrow$). Het volume zal dan afnemen ($V \downarrow$).

Ondanks dat het woord 'ideaal' suggereert dat de gaswet alleen onder theoretische omstandigheden geldig is, beschrijft de ideale gaswet toch opmerkelijk goed het gedrag van reële gassen. In de praktijk zijn er maar kleine afwijkingen, die zich uiten in energieverlies.

Een vierde grootheid speelt hierbij een rol van betekenis. Naast druk, volume en temperatuur hebben we het begrip 'entropie' nodig, meestal weergegeven door het symbool S . De entropie is

een maat voor de hoeveelheid wanorde in een systeem. Zo heeft een gecomprimeerde hoeveelheid gas een lagere entropie dan dezelfde hoeveelheid gas in een groter volume. En een rustig stromend gas heeft een lagere entropie dan een wervelende gasstroming. Een ongecontroleerde toename in de entropie gaat altijd gepaard met energieverlies.

We hebben nu dus vier grootheden: druk, volume, temperatuur en entropie. Als we beschrijven hoe deze vier grootheden veranderen, weten we wat er gebeurt in een warmtemachine of warmtepomp. Ieder proces waarbij één van de vier variabelen constant blijft, heeft een eigen naam:

isobaar	de druk blijft constant;
isochoor	het volume blijft constant;
isotherm	de temperatuur blijft constant;
isentrop	de entropie blijft constant.

Een isentroop proces komt in de praktijk neer op een proces waarbij geen warmte wordt uitgewisseld met de omgeving. Dit heet ook wel een adiabatisch proces.

13.2.2 Het Carnotproces

Carnot onderzocht wat er gebeurde als je een systeem (bijvoorbeeld een gas in een cilinder) via een aantal stappen bij de beginsituatie vandaan brengt en daarna weer in een aantal andere stappen terugbrengt in de beginsituatie. De zogeheten Carnotcyclus gaat als volgt:

1. Een gas wordt in een cilinder door een zuiger samengedrukt, terwijl er geen warmte-uitwisseling met de omgeving is (isentrop/adiabatisch). Hierdoor stijgt de druk in de cilinder en wordt het gas warmer.
2. Het gas wordt nu op deze temperatuur gehouden (isotherm, bijvoorbeeld door een gasvlam), terwijl de zuiger wordt losgelaten. Door de hoge druk zet het gas uit en neemt het volume toe, terwijl de druk steeds lager wordt. De energie die door het samenpersen uit stap 1 in het gas gestopt is, wordt omgezet in beweging van de cilinder. Om het gas op temperatuur te houden, moet dus energie van buiten worden toegevoerd.

Na deze twee stappen bevindt het gas zich in een andere toestand dan aan het begin (andere druk, volume, temperatuur en entropie). In de volgende twee stappen brengen we het gas weer terug in de uitgangssituatie.

3. We voeren geen warmte meer toe, maar laten het warme gas verder uitzetten, zonder warmte-uitwisseling met de omgeving (isentrop/adiabatisch). Hierdoor neemt de druk af. Ook de temperatuur zal dalen en we laten het gas uitzetten totdat het weer dezelfde temperatuur heeft als vóór stap 1.

4. Als laatste stap drukken we het gas weer samen, waarbij we de temperatuur constant houden (isotherm). De druk zal toenemen en om te voorkomen dat de temperatuur ook toeneemt, moeten we in deze stap warmte afvoeren uit de cilinder, bijvoorbeeld door het gas in contact te brengen met koud water.

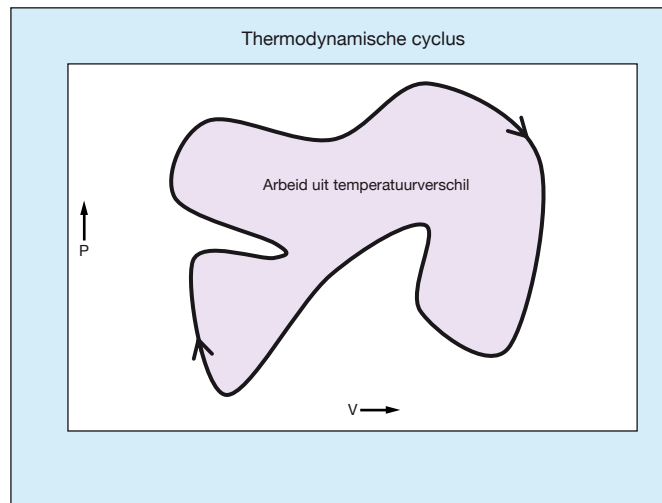
Aan het eind van de cyclus bevindt het gas zich weer in de begintoestand.

Het lijkt alsof we niets gepresteerd hebben. We hebben het gas samengedrukt en laten expanderen (stap 1 en 3) en we hebben warmte toe- en afgevoerd (stap 2 en 4). De stappen 1 en 3 zijn echter niet helemaal elkaars tegenovergestelde. We hebben het gas samengedrukt op een lage temperatuur en weer laten expanderen op een hoge temperatuur. Bij de expansie is daarom meer energie vrijgekomen dan er nodig was om het gas op lage temperatuur samen te drukken. Het temperatuurverschil tussen de gasvlam en het koude water is omgezet in beweging van de zuiger: arbeid!

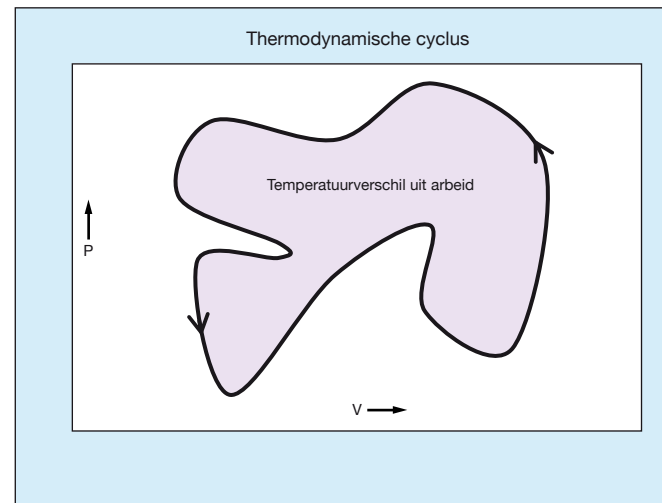
13.2.3 Een rondreis door het PV-diagram

Het interessante aspect van de Carnotcyclus is dat het mogelijk is een 'rondje te lopen' langs verschillende waarden van P , V , T en S , waarbij we op verschillende tijdstippen arbeid of warmte toevoegen of onttrekken. Als we aan het eind van de ronde weer bij ons uitgangspunt terugkomen, hebben we echter netto meer warmte toegevoegd dan we onttrokken hebben en is er meer arbeid verricht dan er nodig was in het proces. Met andere woorden: we hebben een warmtemachine gemaakt.

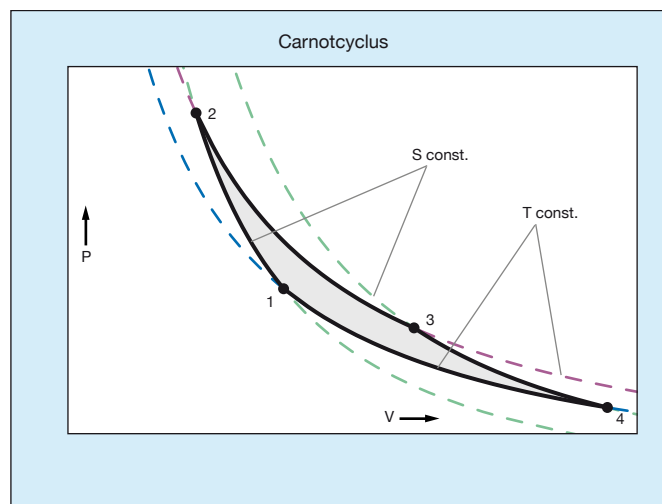
Figuur 4 op pagina 166 geeft een rondreis weer door te kijken naar wat er gebeurt met de druk en het volume. De rondreis brengt ons van het beginpunt met een omweg via andere waarden van P en V weer terug bij het begin. Carnot ontdekte dat de totale netto arbeid die geleverd wordt door deze cyclus, gelijk is aan de oppervlakte binnen de cyclus.³⁰



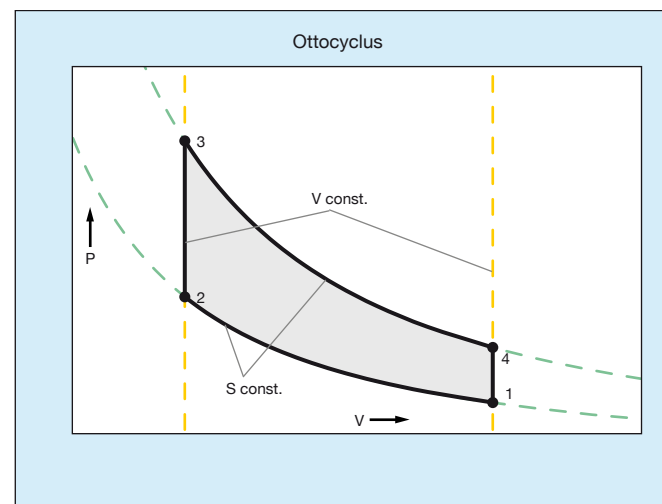
Figuur 4 Een rondreis door het PV-diagram. De oppervlakte binnen de cyclus is gelijk aan de geleverde arbeid.



Figuur 5 Een rondreis door het PV-diagram tegen de klok in levert warmte op uit arbeid.



Figuur 6 Het PV-diagram van een Carnotcyclus.



Figuur 7 Het PV-diagram van een Ottocyclus.

Als we deze cyclus in omgekeerde richting doorlopen (tegen de klok in), is het resultaat juist omgekeerd (figuur 5). Er is nu arbeid nodig om de cyclus te doorlopen en er wordt netto warmte afgegeven op een hoge temperatuur. De omgekeerde cyclus is dus een warmtepomp.

13.2.4 De praktijk

Warmtemachines en warmtepompen uit de technische praktijk kunnen worden beschreven door cycli in het PV-diagram. In de realiteit zal de theoretisch optimale cyclus nooit precies gevolgd worden, maar om te begrijpen wat er in een warmtemachine of warmtepomp gebeurt, is het nuttig om de optimale cyclus te bekijken. In de onderstaande paragrafen bekijken we enkele veelvoorkomende warmtemachines en een compressiewarmtepomp.

Carnotcyclus

De Carnotcyclus hebben we hierboven al beschreven. Figuur 6 geeft het bijbehorende PV-diagram weer.

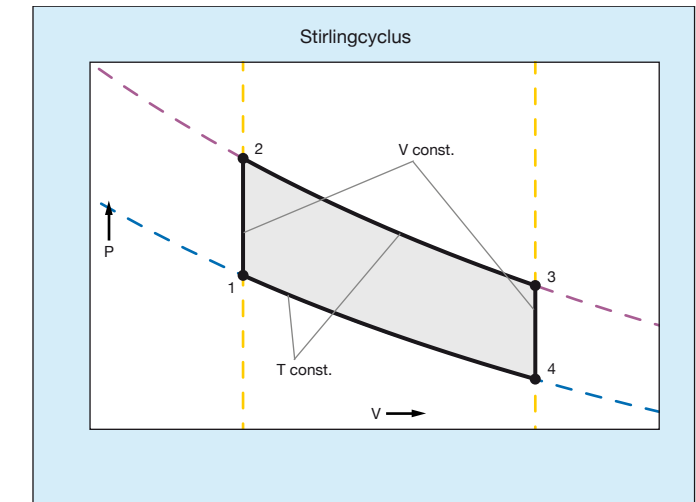
- De stappen zijn als volgt:
- 1 → 2 adiabatische compressie
 - 2 → 3 isotherme warmtetoevoer
 - 3 → 4 adiabatische uitzetting
 - 4 → 1 isotherme warmteafvoer

Hoewel de Carnotcyclus theoretisch in detail bestudeerd is, is er ironisch genoeg geen enkele echte fysische realisatie van deze cyclus die in de praktijk gebruikt wordt.

De Ottocyclus (gasmotor)

Een gasmotor kan beschreven worden met de Ottocyclus, die in figuur 7 is weergegeven.

- De stappen zijn als volgt:
- 1 → 2 adiabatische compressie
Een mengsel van lucht en aardgas wordt in de cilinder samengedrukt door de beweging van de krukas.
 - 2 → 3 isochore warmtetoevoer
Het lucht/gasmengsel wordt ontstoken. De verbranding vindt zo snel plaats dat de druk toeneemt, terwijl het volume constant blijft.



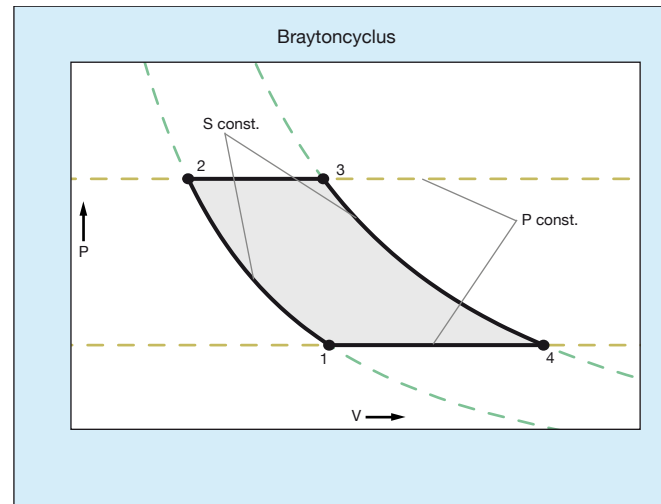
Figuur 8 Het PV-diagram van een Stirlingcyclus.

- 3 → 4 adiabatische expansie
De hete gassen in de cilinder zetten uit en drijven via een zuiger de krukas aan. Er is nauwelijks uitwisseling van warmte met de omgeving.
- 4 → 1 isochore warmteafvoer
De nog warme gassen worden afgevoerd uit de cilinder en een nieuw gasmengsel wordt geïnjecteerd. Het volume van de uitgestoten gassen is gelijk aan het volume van de geïnjecteerde gassen.

Stirlingcyclus

Een Stirlingmotor kan beschreven worden met de Stirlingcyclus, die in figuur 8 is weergegeven.

- De stappen zijn als volgt:
- 1 → 2 isotherme compressie
Een gas (vaak wordt helium gebruikt) wordt in een cilinder samengedrukt door de beweging van de krukas. Hierbij wordt dit deel van de zuiger op een constante lage temperatuur gehouden (bijvoorbeeld door retourwater van het verwarmingssysteem). Er wordt daardoor warmte afgevoerd.



Figuur 9 Het PV-diagram van een Braytoncyclus.

- 2 → 3 isochore warmtetoevoer
Het gas wordt van het koude deel van de cilinder naar het warme deel van de cilinder verplaatst. Het gas wordt hierdoor op bij constant volume. De druk neemt toe.
- 3 → 4 isotherme expansie
In het warme deel van de cilinder zet het gas uit door de hoge druk. Het gas wordt hierbij op temperatuur gehouden (bijvoorbeeld door een gasvlam) en daardoor wordt warmte toegevoerd.
- 4 → 1 isochore warmteafvoer
Het gas wordt nu weer van het warme deel van de cilinder naar het koude deel gepompt. Daardoor koelt het gas bij constant volume af en zal de druk dalen.

Braytoncyclus (gasturbine)

Een gasturbine kan beschreven worden met de Braytoncyclus, die in figuur 9 is weergegeven.

De stappen zijn als volgt:

- 1 → 2 adiabatische compressie
Aardgas wordt aan de voorkant in de turbine gebracht en samengeperst door een compressor die wordt aangedreven door de turbine-as. Er is geen warmte-uitwisseling.
- 2 → 3 isobare warmtetoevoer
Het gas wordt verbrand bij constante druk.
- 3 → 4 adiabatische expansie
Het hete gas zet uit en drijft de schoepen van de turbine-as aan.
- 4 → 1 isobare warmteafvoer
Het gas wordt aan de achterkant van de turbine uitgestoten, waarbij de druk gelijk is aan de omgevingsdruk.

In een gasturbine vinden deze processen niet in een cyclus in de tijd plaats, maar alle tegelijkertijd. De processen vinden wel allemaal in een ander deel van de turbine plaats. Er is een continue gasstroom door de turbine die de stappen 1 tot en met 4 doorloopt.

Koelcyclus (compressiekoelmachine)

We zullen nu de cyclus laten zien die een compressiekoelmachine beschrijft. Figuur 10 geeft het PV-diagram weer. Op de achtergrond is met een kleur ook aangegeven of het werkmedium in de vloeibare fase is (klein volume, hoge druk) of in de gasvormige

fase (groot volume, lage druk). Bij zeer hoge druk gaan de vloeibare en de gasvormige fase vloeïend in elkaar over, maar bij normale drukken is er een gebied waarin de vloeibare fase en de gasvormige fase naast elkaar bestaan.

De stappen in het diagram zijn als volgt:

- 1 → 2 adiabatische compressie
Het werkmedium wordt in de gasvormige fase samengedrukt door een compressor. Hierdoor neemt de temperatuur toe.
- 2 → 3 isobare warmteafvoer
Bij gelijkblijvende druk wordt de warmte afgegeven aan de retourleiding van het verwarmingssysteem. Doordat de temperatuur van het werkmedium afneemt, zal het geheel condenseren.
- 3 → 4 snelle expansie
Het vloeibare werkmedium wordt door een reductieventiel geleid, waardoor de druk plotseling sterk afneemt. Hierdoor zal direct een groot deel van het werkmedium verdampen.
- 1 → 2 isobare warmtetoevoer
Bij gelijkblijvende lage druk zal ook de rest van het werkmedium verdampen. Hierbij wordt warmte toegevoerd vanuit de omgeving (bijvoorbeeld water uit een bodemopslagsysteem), die hierdoor zal afkoelen.

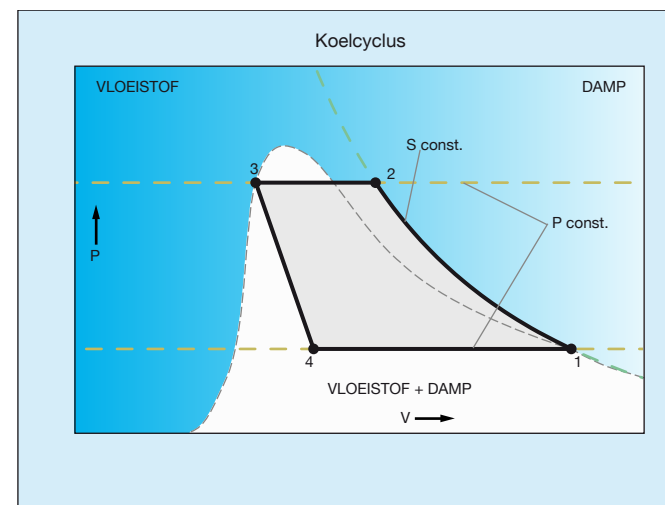
De rondreis door dit PV-diagram verloopt tegen de klok in. Er is dus arbeid nodig (om de compressor aan te drijven) en het systeem levert warmte op een hoog temperatuurniveau. Bij de andere cycli die hierboven beschreven werden, was juist netto warmte nodig en werd netto arbeid geleverd.

13.3 Temperatuurverschil

In deze appendix zijn enkele fundamentele fysische principes beschreven die gelden voor alle warmtemachines en warmtepompen. Deze principes volgen direct uit de fysische wetten van de thermodynamica en het gedrag van gassen. Er bestaat dus geen manier om een warmtemachine of warmtepomp te bouwen die beter presteert dan hier beschreven. Dit is de reden dat in de energiewereld temperatuurverschillen zo'n belangrijke rol spelen. Het beschikbare temperatuurverschil voor een warmtemachine en de temperatuurlift die een warmtepomp moet leveren, bepalen

direct de maximale efficiency. Voor warmtemachines moet het temperatuurverschil zo groot mogelijk zijn; voor warmtepompen is een kleine temperatuurlift juist gunstig.

Voor processen die géén gebruik maken van een temperatuurverschil om arbeid op te wekken, geldt het maximale Carnotrendement niet. Een brandstofcel wekt bijvoorbeeld elektriciteit op via een chemische reactie en kan dus in theorie efficiënter zijn dan een warmtemachine. ■



Figuur 10 Het PV-diagram van de koelcyclus.

Noten

1. Een uitzondering vormen strikt lokale verwarmingssystemen, zoals een gaskachel of een elektrisch verwarmingselement.
2. Hypocaustum is afgeleid van de Griekse woorden hypo = onder en kaiein = vuur aansteken.
3. Een belangrijk aspect bij het ontwerpen van opslagvaten is de verhouding tussen oppervlakte en inhoud. Hoe groter het vat, des te gunstiger de inhoud/oppervlakteverhouding. Die verhouding staat voor de verhouding tussen opslagvermogen en warmteverliezen. Een grote buffer verliest dus naar verhouding minder warmte naar de omgeving dan een kleine buffer. Dit is een belangrijke reden dat het project Ackermannbogen gebouwd kon worden.
4. Smelten en stollen van een materiaal vinden plaats bij een constante temperatuur of binnen een relatief klein temperatuurtraject. De smelt- en stoltemperatuur zijn gelijk. Hetzelfde geldt voor de faseovergang (*phase change*) tussen de vloeibare en gasvormige fase: verdampen en condenseren gebeuren bij dezelfde constante temperatuur.
5. Een bekend PCM is natriumacetaat, dat gebruikt wordt in handenwarmers. Deze handenwarmers bestaan uit een kunststof zakje waarin vloeibaar natriumacetaat zit. Door een mechanische schok kan een begin worden gemaakt met het kristalliseren (vast worden) van de vloeistof, waarbij hitte vrijkomt om de handen mee te warmen. Door het zakje in kokend water te leggen, wordt de inhoud weer vloeibaar. Voor gebouwtoepassingen worden meer exotische materialen gebruikt, zoals TME (een mengsel van trimethylolethaan en water) of mangaan(II)nitraat hexahydraat.
6. Het verschil tussen onder- en bovenwaarde wordt besproken in Hoofdstuk 6.
7. Er is veel discussie mogelijk over de prestaties van de Nederlandse elektriciteitsopwekking. Is het bijvoorbeeld noodzakelijk om duurzame productie mee te nemen bij het bepalen van de efficiency? Hoe groot zijn de transportverliezen? Moeten we nog onderscheid maken tussen daluren (veel kolencentrales) of plateau-uren (meer gascentrales)? De scope van dit boek is te beperkt om uitgebreid op deze discussie in te gaan. Er is pragmatisch gekozen voor 39% op bovenwaarde voor de gemiddelde efficiency van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Dit is inclusief een netverlies van 5%. De efficiency van de centrale zelf is dus gemiddeld 41,1% en op weg naar de klant gaat 5% hiervan (2,1 procentpunt) verloren, zodat uiteindelijk 39% overblijft.
8. Bij 20 °C is de energie-inhoud (enthalpie) van vloeibaar water 83,9 kJ/kg, van water in dampvorm is het 2.537,3 kJ/kg. Het verschil tussen die twee is de condensatie- of verdampingswarmte.
9. De standaardeis is 11 liter/minuut. Voor het opwarmen van dit debiet van 10 °C tot 37 °C is een vermogen nodig van 21 kW.
10. De EN 677 werkt op basis van de calorische onderwaarde. De waarden op bovenwaarde (vijfde kolom in tabel 1) zijn daaruit afgeleid.
11. Belangrijk is ook de rol die warmte voor de consument speelt. Nederlanders vinden de verwarmingsinstallatie in het algemeen niet erg interessant; die installatie draagt ook niet bij aan de status van een woning. Consumenten zijn dan ook niet bereid om flink te betalen voor de verwarmingsinstallatie. In een land als Duitsland ligt dat anders. Bij een woningbezichtiging wordt daar niet alleen de badkamer en de keuken aangedaan, maar ook het souterrain met de verwarmingsinstallatie. In Duitsland ligt de prijs van verwarmingssystemen veel hoger (soms wel twee maal zo hoog als in Nederland), eenvoudigweg omdat klanten daar bereid zijn om meer te betalen.
12. Door het aftappen van warmte neemt het elektrische rendement wel iets af.
13. De term micro-wkk staat in Nederland voor systemen tot enkele kW elektrisch vermogen. In Europese context worden systemen tot een (elektrisch) vermogen van 50 kW micro-wkk genoemd. Een andere veelvoorkomende benaming is 'HRe-ketel'. De afkorting HRe is een Gaskeur (zie kader op pagina 65/66) en staat voor HR-ketel met elektriciteitsproductie. Een HRe-ketel is dus simpelweg een door EPK gekeurde micro-wkk met een gegarandeerd minimaal rendement.
14. De aansturing van de micro-wkk is warmtevolgend.
15. Organische stoffen bestaan uit moleculen die koolstofketens bevatten. Deze groep omvat een grote diversiteit aan vaste, vloeibare en gasvormige stoffen met uiteenlopende chemische en fysische eigenschappen.
16. Net als bij de Stirlingmotor zal het thermisch vermogen te groot zijn in goed geïsoleerde (nieuwbouw)woningen of in kleine woningen.
17. Voor een gemiddelde Nederlands huishouden sluit een elektrisch vermogen van 1 kW redelijk aan bij de basislast van het elektriciteitsverbruik. Uit de verhouding tussen thermisch en elektrisch rendement volgt dan automatisch het thermisch vermogen (ca. 5 kW). Daarnaast sluit een elektrisch vermogen van 1 kW aan bij de elektrische aansluitnorm NEN 1010.
18. Zie ook paragraaf 5.5.
19. Verder besproken in hoofdstuk 10.
20. In dit geval: inkomende energie = uitgaande energie.
21. Warmte- en koudeopslagsysteem. Voor woningen meestal (ook in dit geval) uitgevoerd als een gesloten systeem in de bodem (verticale bodemwarmtewisselaar). Zie ook volgende paragraaf.
22. Het is ook mogelijk om een zonnegascombi te gebruiken. Dit is een systeem met zonnecollector, HR-ketel en boiler. Dit systeem beschikt echter over een vrij kleine opslagcapaciteit en kan niet gebruikt worden als een flink deel van de ruimteverwarming door zonnewarmte gedekt moet worden.
23. Aan de andere kant kan natuurlijk gesteld worden dat voor de regeneratie van een bodemsysteem eenvoudige collectoren met een laag rendement al volstaan. Dit maakt een flinke kostenreductie van de investering mogelijk.
24. In het voorbeeld van de wijk Ackermannbogen in München (zie 5.3.1) wordt de zonnewarmte opgeslagen in een reusachtige opslagtank. Voor deze tank gelden geen wettelijke beperkingen ten aanzien van de opslagtemperatuur en daarom kan de zonnewarmte direct op een hoog temperatuurniveau worden bewaard.
25. Het prijsverschil tussen de door de bewoners ingekochte elektriciteit en de elektriciteit die door de wkk wordt geleverd, bestaat voornamelijk uit energiebelasting en btw. Deze belastingen worden geheven over de ingekochte elektriciteit, maar gelden niet voor de geleverde elektriciteit.
26. Als restwarmte wordt ingezet in een stadswarmtenet, loopt wel het elektrisch rendement van de centrale iets terug. De warmte is daarom niet helemaal gratis. De retourtemperatuur van het warmtenet (vaak 90 °C of meer) bepaalt immers hoe efficiënt de centrale zijn elektriciteit kan produceren. Zonder warmtelevering heeft het koelwater in het algemeen een temperatuur van onder de 20 °C. Zoals we in bijlage A zien, zorgt een lagere koeltemperatuur voor een beter elektrisch rendement.
27. Blokverwarming wordt in hoofdstuk 10 besproken.
28. Wanneer een micro-wkk voldoet aan de eisen van het Gaskeur-HRe, is sprake van een HRe-ketel. Alle micro-wkk's in het project Smart Power City Apeldoorn zijn in feite HRe-ketels.
29. In de praktijk wordt dit theoretisch maximale rendement niet gehaald.
30. In Carnot keek niet naar het PV-diagram, maar naar het TS-diagram, waar temperatuur en entropie tegen elkaar worden uitgezet. Dit maakt voor de conclusie niets uit.

Conversietabellen

SI-eenheden

Symbol	Naam	Eenheid
v	Snelheid	m/s (meter per seconde)
m	Massa	kg (kilogram)
a	Versnelling	m/s ² (meter per seconde in het kwadraat)
F	Kracht	N (Newton)
P	Druk	Pa (Pascal)
G	Gewicht	N (Newton)
E	Energie	J (Joule)
P	Vermogen	W (Watt)

Bron: Agenschap NL

Afgeleide eenheden

Naam	Eenheid
Snelheid	v = afgelegde weg / tijd [m/s]
Versnelling	a = snelheid(versandering) / tijd [m/s ²]
Kracht	F = massa * versnelling = m*a [N] 1 N = 1 kgm/s ² 1 kgf = 9,81 N = 9,81 kgm/s ²
Druk	1 Pa (pascal) = 1 N/m ² = 1 kg/(m.s ²)
Arbeid	Arbeid = kracht * weg 1 kgm/s ² * m = 1 kgm ² /s ² 1 J = 1 Nm = 1 kgm ² /s ²
Vermogen	Vermogen = arbeid / tijd 1 W = 1 J/s = 1 kgm ² /s ³ = 1 Nm/s
Energie	1 kcal = 4,19 * 10 ³ J = 4,19 kJ 1 kWh = 1000 Wh = 1000 * 3600 Ws (1 uur = 3600 s) = 1000 x 3600 J/s * s = 3.6000.000 J = 3,6 MJ (Megajoule)

Bron: Agenschap NL

Voorvoegsels

Veelvoud	Voorvoegsel	Symbol
10 ¹²	tera	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	mega	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hecto	h
10	deca	da
10 ⁻¹	deci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	milli	m
10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ⁻¹⁸	atto	a

Omrekenvoorbeelden energie-eenheden

Energie-eenheden
1 EJ = 10 ¹⁸ J
1 TWh = 10 ¹² Wh = 10 ⁹ kWh
1 MJ = 0,278 kWh
1 EJ = 278 TWh
1 kWh = 3,6 MJ
1 tep (ton equivalent petroleum) = ± 11.600 kWh
1 Mtep = 10 ⁶ tep
1 b (barrel) = 159 liter aardolie = 140 kilo aardolie = 1.700 kWh
1 Gb = 0,14 Gton

Omreken tabel naar aardgasequivalenten

Hierbij staat Nm³ voor 'normaal kubieke meters' aardgas, dat wil zeggen gemeten bij standaard temperatuur (0 °C) en standaarddruk (1 atmosfeer). Het energiebedrijf rekent het gasverbruik van iedere gebruiker af op basis van deze normaal kubieke meter. Voor het omrekenen van de verschillende energievormen naar Nm³ aardgasequivalent (a.e.) gelden de volgende omrekenfactoren:

Energievorm	=	Aardgasequivalent
1 kWh elektriciteit	=	0,26 Nm ³ a.e.
1 liter huisbrandolie	=	1,2 Nm ³ a.e.
1 ton stookolie	=	1.300 Nm ³ a.e.
1 ton steenkool	=	925 Nm ³ a.e.
1 liter vloeibaar propaan	=	0,73 Nm ³ a.e.
1 liter LPG	=	0,95 Nm ³ a.e.
1 liter diesel	=	1,13 Nm ³ a.e.
1 liter benzine voor wegvervoer	=	1,04 Nm ³ a.e.
1 m ³ niet-Gronings aardgas	=	X' Nm ³ a.e.
1 kg gasvormig H ₂	=	4,0 Nm ³ a.e.
1 ton gasvormige O ₂	=	104 Nm ³ a.e.
1 ton vloeibare O ₂	=	260 Nm ³ a.e.
1 ton gasvormige N ₂	=	65 Nm ³ a.e.
1 ton vloeibare N ₂	=	208 Nm ³ a.e.
1 ton vloeibare CO ₂	=	49 Nm ³ a.e.

* De factor X volgt uit de onderste verbrandingswaarde in MJ/Nm³ van het ingezette aardgas gedeeld door 31,65 MJ/Nm³.

Bron: Agenschap NL

Emissies per eenheid brandstof

Brandstof/ketel	Eenheid	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	SO ₂ (g)	Zuureenheid (ze)
Gas (conventioneel)	m ³	1,780	2,00	0,016	0,04450
Gas (low NO _x)	m ³	1,780	0,55	0,016	0,01260
Huisbrandolie	liter	2,700	2,90	6,000	0,25000
Elektriciteit	kWh	0,574	0,15	0,425	0,01648

Bron: EIA regeling 2003, Agenschap NL

Omrekenfactoren brandstoffen

Brandstof	Eenheid	Aardgas Equivalent (Nm ³)
Elektrische energie (incl. verdiscontering verlies in de centrale)	kW	0,26
Huisbrandolie	liter	1,20
Stookolie	liter	1,30
Steenkool	kg	0,93
Vloeibaar propaan	liter	0,73
LPG (wegvervoer)	liter	0,95
Diesel	liter	1,13
Benzine	liter	1,04
Waterstofgas	kg	4,00
Droog hout	kg	0,48

Bron: EIA regeling 2003, Agenschap NL

Nederlandse energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren

Hoofdgroep	Eenheid	Stookwaarde	CO ₂ -emissiefactor (kg/GJ)
Vloeibare fossiele primaire brandstoffen			
Ruwe aardolie	kg	42,7	73,3
Aardgascondensaat	kg	44,0	63,1
Vloeibare fossiele secundaire brandstoffen			
Motorbenzine	kg	44,0	72
Kerosine luchtvaart	kg	43,5	71,5
Petroleum	kg	43,1	71,9
Leisteenolie	kg	36,0	73,3
Gasolie / dieselolie	kg	41,7	74,3
Zware stookolie	kg	41,0	77,4
LPG	kg	45,2	66,7
Ethaan	kg	45,2	61,6
Nafta's	kg	44,0	73,3
Bitumen	kg	41,9	80,7
Smeeroliën	kg	41,4	73,3
Petroleumcokes	kg	35,2	100,8
Raffinaderijgrondstoffen	kg	44,8	73,3
Raffinaderijgas	kg	45,2	66,7
Chemisch restgas	kg	45,2	66,7
Overige oliën	kg	40,2	73,3
Vaste fossiele primaire brandstoffen			
Antraciet	kg	26,6	98,3
Cokeskolen	kg	28,7	94,0
Cokeskolen (cokesovens)	kg	28,7	95,4
Cokeskolen (Basismetalaal)	kg	28,7	89,8
(Overige bitumeuze) steenkool	kg	24,5	94,7

Hoofdgroep	Eenheid	Stookwaarde	CO ₂ -emissiefactor (kg/GJ)
Sub-bitumeuze kool	kg	20,7	96,1
Bruinkool	kg	20,0	101,2
Bitumeuze leisteen	kg	9,4	106,7
Turf	kg	10,8	106,0
Vaste fossiele secundaire brandstoffen			
Steenkool- en bruinkoolbriketten	kg	23,5	94,6
Cokesoven/gascokes	kg	28,5	111,9
Cokesovengas	MJ	1,0	41,2
Hoogovengas	MJ	1,0	247,4
Oxystaalovengas	MJ	1,0	191,9
Fosforovengas	Nm ³	11,6	149,5
Gasvormige fossiele brandstoffen			
Aardgas	Nm ³	31,7	56,8
Koolmonoxide	Nm ³	12,6	155,2
Methaan	Nm ³	35,9	54,9
Waterstof	Nm ³	10,8	0,0
Biomassa			
Biomassa vast	kg	15,1	109,6
Biomassa vloeibaar	kg	39,4	71,2
Biomassa gasvorming	Nm ³	21,8	90,8
RWZI biogas	Nm ³	23,3	84,2
Stortgas	Nm ³	19,5	100,7
Industrieel fermentatiegas	Nm ³	23,3	84,2
Andere brandstoffen			
Afval (niet biogeen)	kg	34,4	73,6

Bron: Agentschap NL 2007

Bronverwijzing en literatuur

[Agentschap NL, 2010]

Agentschap NL, *Warmte in Nederland*, publicatienummer 2NECW1003, 2010.

[Agentschap NL, 2011]

Brochure Voorbeeldwoningen bestaande bouw 2011, *NL Energie & Klimaat*, Publicatienummer 2KPWB1034, Sittard 2011

[Butti & Perlin, 1980]

Butti, K., J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, Cheshire Books, 1980.

[CBS, 2010]

Centraal Bureau voor de Statistiek; *Statline*, www.cbs.nl

[Claus 1979]

Claus, J., *Energiebesparingsonderzoek vroeger en nu*, Verwarming en Ventilatie, mei 1979, p. 327-336.

[Decentrale Gastoepassingen, 2010]

Werkgroep Decentrale Gastoepassingen i.s.m. Smart Power Foundation en Cogen Nederland, *Micro-wkk: meer rendement uit aardgas*, Werkgroep Decentrale Gastoepassingen/Agentschap NL, 2010.

[ECN, 2010]

Energieonderzoek Centrum Nederland, *Referentieramingen energie en emissies 2010-2020*, Petten, 2010

[ECN, 2011]

Energieonderzoek Centrum Nederland, *Beleidsstudie naar wkk en warmtepomptechnologieën*, Petten, 2011

[Ecofys, 2007]

Harmen, R., M. Harmelink, *Duurzame warmte en koude 2008-2020; potentiën, barrière en beleid*, Ecofys, 2007.

[EHPA, 2010]

EHPA European Heat Pump Association, *Outlook 2010 – European Heat Pump Statistics*, (waarin het hoofdstuk over Nederland gebaseerd is op CBS-gegevens), EHPA, 2010.

[Energiekamer, 2009]

Schepers, B., M. van Valkengoed (CE Delft), *Warmtenetten in Nederland*, Energiekamer NMA, 2009.

[Energiezaak 2011]

De Energiezaak, *Energie in Nederland 2011*, Arnhem, augustus 2011.

[Energy Matters, 2011]

Energy Matters i.s.m. BDH en ECN, *Energiebesparing en CO₂-emissiereductie in de utiliteitsbouw en collectieve woningbouw door gaswarmtepompen en mini-wkk*, Platform Nieuw Gas/Agentschap NL, 2011.

[GasTerra, 2008]

GasTerra, *Warmte en Kracht*, Groningen, GasTerra, 2008.

- [GasTerra 2009]
GasTerra, *Onzichtbaar Goud*, Groningen, GasTerra, 2009.
- [GasTerra, 2010]
GasTerra, *Gaswarmtepompen*, Groningen, GasTerra, 2010.
- [Gasunie, 1980]
NV Nederlandse Gasunie, *Basisgegevens aardgassen*, Gasunie, 1980.
- [Overbeeke 2001]
Overbeeke P. van, *Kachels, geisers en fornuizen - Keuzeprocessen en energieverbruik in Nederlandse huishoudens 1920-1975*, Proefschrift TU Eindhoven, juni 2001.
- [TNO, 2010]
Thijssen, T., H. van Wolferen, *EPA Labelstappen met lucht-naar-waterwarmtepompen*, TNO-rapport 034 APD-2010-00337, september 2010.
- [TNO, 2011]
TNO Bouw en Ondergrond, *Kwaliteitsverklaringen warmtepompen op website*, www.tno.nl.
- [Verwarming en Ventilatie, 1979]
Redactioneel, *Presentatie nieuwe generatie cv-ketel*, Verwarming en Ventilatie, maart 1979, p. 152-157.
- [VHK, 2008]
Van Holsteijn & Kemna, *Studie Huishoudelijk Energiegebruik*, VHK 2008
- [Wagenaar, 1981]
Wagenaar E.J., *De productie van Economaten is in volle gang*, Verwarming en Ventilatie, december 1981, p. 1062-1064.
- [WoON 2009]
Ministerie van BZK, *Het wonen overwogen – Resultaten van het WoonOnderzoek Nederland 2009*, Ministerie van BZK, 2010.

Overige literatuur

[ISSO]
ISSO Publicatie 72
Ontwerpen van individuele en kleine elektrische warmtepompsystemen voor woningen
www.ISSO.nl

ISSO Publicatie 80
Handboek integraal ontwerpen van collectieve installaties met warmtepompen in de woningbouw
www.ISSO.nl

Websites

www.agentschapnl.nl
www.cbs.nl
www.statline.cbs.nl/statweb/
www.gasterra.nl
www.isso.nl
www.kiwagastechnology.com
www.micro-wkk.nl
www.milieucentraal.nl
www.miniwkk.info
www.tno.nl

Register

- aandrijven 37, 93
aankoop 40
aansluiting 19, 22, 37, 48, 93,130, 137,141,144
aanvoer 36, 58, 64, 77, 84, 85, 138, 140, 141, 151
aanvoertemperatuur 63, 64, 111, 130, 132
aanwezigheidsdetectie 14
aardgas 1,3-5, 8, 9, 14, 21, 22, 24, 37, 43-52, 55, 64-66, 68, 71-73, 77, 78, 81, 82, 85, 87-92, 94, 100, 101, 107, 124, 125, 139, 140, 152, 161, 163, 167, 173, 175, 184
aardgasbaten 43
aardgasgebruik 75
aardgasnet 21, 51
aardgasprijs 52
aardgastechnologie 9, 50, 73
aardgasverbruik 44, 51, 58, 89
aardolie 8, 45, 49, 172, 173
absorber 101, 105, 118, 125
absorptiewarmtepomp 101, 130, 183
actieve koeling 37, 107
adiabatisch 165
adviseur 40
afgiftesysteem 5, 14, 56-60, 73, 74, 76, 99, 100, 103, 106, 107, 109, 111, 113, 130, 132, 151
afgiftetemperatuur 60, 64, 100, 105, 109, 124
afvalhout 14
- afvoer 36, 37, 181
Agentschap NL 4, 12, 13, 27, 28, 31, 51, 129, 130, 137, 155, 172-175
airconditioning 37, 106
allergie 36
antraciet 19
appartement 92, 134, 148, 149
arbeid 7, 85, 86, 99, 161-167, 169, 172
architect 13
back-up 15, 51, 139
badkamer 23, 32, 36, 56, 111, 148, 171
balansventilatie 37
balansventilatiesysteem 37
basislast 52, 66, 106, 131, 171
beddenpan 19
begane grond 40
beheerder 132, 133
belasting 93, 105
beleidsmaker 13, 49
bemetering 132
besparingsmaatregel 34
besparingspotentieel 31, 105
besparingsprogramma 44, 51
bestaande bouw 23, 40, 47, 48, 51, 105, 107, 108, 114, 175
bestaande woning 12, 14, 32, 40, 48, 73, 77, 88, 91, 92,107, 119
bestaande woningvoorraad 27

- bevolking 27, 28
 bewonersgedrag 38, 76, 77, 94, 151
 bijstook 37, 50, 66, 89, 90, 101, 105, 107, 113, 114, 124, 142
 bijstookketel 90, 105
 binnenklimaat 37, 60, 117
 bio-wkk 48
 biomassa 8, 14, 35, 50, 52, 138
 biomassakachel 48
 bivalent 66, 103, 105
 bivalente warmtepomp 102, 107, 183
 blok- of wijkverwarming 24, 35
 blokverwarming 129, 132, 133, 137, 138
 bodem/water-warmtepomp 106, 108, 110-112
 bodemwarmte 35, 55, 106
 boilervat 55, 56, 60, 61, 82, 83, 90, 122, 132, 149, 151, 171
 boring 49
 bouw 23, 38, 40, 47, 48, 51, 62, 73, 105, 107, 108, 114, 151, 175
 bouwkundige aanpassing 33
 bouwperiode 13, 27, 31, 33
 bouwvergunning 40
 bovenwaarde 35, 51, 66, 68, 72, 73, 76, 86, 91, 101, 163, 170
 brandstofcel 6, 67, 86-88, 91, 92, 94, 169
 Braytoncyclus 168
 bruinkool 50
 bruinkoolbriket 17, 19, 174
 btw 77, 171
 buffer 55, 56, 63, 91, 106, 118, 120, 132, 170
 buffervat 61, 118, 120, 133, 152
 calorische bovenwaarde 72
 calorische onderwaarde 71, 170
 calorische waarde 47
 Carnot 87, 99, 100, 163, 165, 171, 183
 Carnotcyclus 165-167
 Carnotrendement 163, 164, 169
 cascade 130, 131
 centrale verwarming 35, 55, 57, 58
 chemicaliën 49
 circulatiepomp 73, 75, 76, 106, 109
 CO₂ 8, 14, 40, 44, 48-52, 67, 87, 94, 114, 115, 125, 126, 140, 154, 173, 175
 CO₂-emissie 14, 49, 52
 CO₂-reductie 14, 40
 CO₂-uitstoot 8, 40, 49, 94, 125, 126, 140
 coefficient of performance (COP) 97, 113, 163
 cokes 19
 collectief 48, 108, 124, 129-131, 134, 147-149
 collectief systeem 124, 129-132, 134, 147
 collectoroppervlakte 122, 124
 comfort 4, 13, 22, 49, 56, 60, 62, 64, 76, 109, 111, 114, 132, 149, 151
 comfortklacht 130
 comfortklasse 76, 111
 comfortkoeling 37
 compacte zonneboiler 120
 compressor 37, 97-101, 107, 108, 113, 168, 169
 condenseren 46, 71-77, 98, 169, 170
 condensvorming 73, 107
 convectie 58
 conventioneel 52, 73, 173
 conversie 55, 67, 77, 88, 90, 92, 102-105, 123, 133, 134, 143
 conversierendement 50
 conversietabel 15, 172
 COP 67, 97, 100, 102-104, 106, 107, 109, 111, 113, 114, 150, 151, 163, 164
 cryogeentanker 46
 cv-ketel 5, 12, 14, 35, 37, 48, 66, 73, 78, 89, 120, 121, 132, 154, 176
 cv-zonneboiler 121
 dakisolatie 34
 decentraal 38, 57, 105
 deellast 74, 76
 demografische ontwikkeling 28
 desorber 101
 diepe geothermie 48, 138, 144
 distributiesysteem 12, 64
 doelstelling 11, 14, 40, 49, 107, 151
 douche 17, 22, 23, 36, 76, 82, 111, 119, 161
 duurzaam 11, 50, 51, 61, 94, 124, 139
 economie 8, 43, 49, 51, 142
 economische ontwikkeling 32
 efficiency 7, 8, 56, 60, 64-68, 86, 87, 89-91, 94, 111, 122, 123, 132, 133, 161, 163, 164, 169, 170
 eigenaar 33, 40, 129, 147, 149, 152
 eigenaar-bewoner 40
 eigendom 29, 30, 33
 eigendomssituatie 33, 40
 eigendomsvorm 33, 148
 elektriciteit 6, 14, 15, 22, 38, 45, 48, 51, 52, 55, 56, 65, 67, 77, 81-93, 97, 99, 101, 105, 106, 125, 132-134, 138-142, 152, 154-156, 158, 161-164, 169, 171, 173
 elektriciteitsopwekking 15, 44, 52, 83, 157, 170
 elektriciteitsproductie 5, 14, 45, 51, 52, 68, 81, 83-87, 89-91, 93, 94, 125, 134, 140, 142-144, 155, 170, 171
 elektrisch apparaat 57
 elektrisch vervoer 38
 elektrische auto 93
 elektrische bijstook 37
 elektrische boiler 35, 38
 elektrische warmtepomp 6, 14, 37, 98, 100, 101, 103-107, 111, 130, 131, 147, 148
 emissiereductie 14, 114, 115, 154, 175
 energetisch 30, 91, 92, 107
 energie-index 31, 38, 40
 energiebelasting 171
 energiebeleid 14
 energiebesparing 12, 14, 23, 24, 32, 35, 40, 81, 91, 92, 103, 107, 114, 115
 energiebron 14, 43, 50, 55, 184
 energiehuishouding 93
 energiekwaliteit 40
 energielabel 23, 28-31, 38, 40, 107
 energielabelsystematiek 40
 energieneutraal 51
 energiepaal 106
 energieprestatie 14, 23, 30, 38, 40, 68, 133, 134, 142
 energieprestatiecoëfficiënt (EPC) 23, 36, 111, 114, 147, 148
 energierekening 109, 114, 129
 energiestroomdiagram 67, 76, 101, 114, 124, 134
 energietarief 14
 energietransitie 4, 5, 9, 11-13, 15, 43, 45, 47, 49-53
 energietransitiemodel 13
 energievoorraad 24
 energievoorziening 5, 8, 9, 11-13, 43, 48-52, 126, 184
 energiezuinig 40, 61
 Energy Performance Building Directive (EPBD) 11
 entropie 164, 165, 171
 EPBD 11
 EPC 23, 36, 111, 114, 147, 148
 Europa 4, 11, 44-46, 49, 65, 84, 86
 Europese doelstelling 49, 107
 expansieventiel 101
 fabrikant 37, 111, 154
 fijnstof 44, 49
 flatwoning 28, 30, 152
 flow 132
 fossiel 15, 50, 65
 gas 5, 9, 14, 15, 19, 21, 22, 38, 43, 45-51, 64, 71, 72, 74, 85, 86, 94, 111, 141, 147, 151, 154, 164, 165, 167, 168,
 gas-to-liquid 45
 gasabsorptiewarmtepomp 6, 100, 101, 104, 105, 110, 111, 130, 132-134, 147, 152, 153
 gasfase 71
 gasgedreven warmtepomp 12, 47, 48, 50, 78, 100, 108, 111, 130, 147, 152, 175
 gasinfrastructuur 14, 49
 Gaskeur 65, 171
 Gaskeur HR107 65
 Gaskeur HRe 65
 gasmotor 85, 86, 92-94, 100, 105, 132-134, 137, 142, 143, 167
 gasmotor-wkk 85, 134, 137, 142
 gasmotorwarmtepomp 6, 100, 103, 105
 gasmunt 19
 gasturbine 86, 168
 gasvormige fase 168-170
 gasvormige toestand 46, 47
 gaswandketel 37
 gaswarmtepompen 12, 47, 50, 78, 100, 108, 111, 147, 152, 175
 gaswet 7, 164
 gebalanceerde ventilatie 23, 36, 37, 107
 gebouwde omgeving 4, 9, 11, 13-15, 24, 35, 40, 47, 49, 51, 88
 gebouweigenschap 38
 gebouwgebonden 37, 129, 137
 gebouwschil 37, 130
 gebruikers 13, 14, 24, 37, 56, 63-65, 76, 77, 82, 83, 87, 107, 111, 114, 130, 132, 138, 143, 149, 154, 173
 gebruikersgedrag 38
 geiser 21, 35, 36, 65, 73, 156, 157
 geleiding 58
 geluid 37, 50, 77, 111, 155
 generator 84-86, 101, 161
 geopolitiek 11
 geothermie 35, 48, 124, 137, 138, 144
 gescheiden opwekking 132
 gevel 22, 34, 40, 120
 gevelkachel 22
 gezin 32

- gezondheid 34
 groen gas 14, 15, 48-51
 groene stroom 14, 15, 51
 grondgebonden 37
 grondstoffen 49
 grondstoffenprijs 49, 52
 hernieuwbaar 8, 14, 15, 44, 46, 48-52, 107
 hernieuwbare energie 14, 15, 44, 46, 49, 51, 52, 107
 hoekwoning 27-31
 hoofdbewoner 32, 33
 hoog rendement (HR) 35, 81
 hout 19, 21, 73, 173
 houten vloer 28, 59
 HR 4, 5, 9, 14, 15, 18, 23, 34, 35, 48, 64-67, 71-79, 82, 88-92, 101-109, 111, 113, 119, 123, 124, 130, 131, 133, 134, 140, 142-144, 152, 156, 157, 171
 HR-combiketel 35, 75, 101
 HR-ketel 5,9, 14, 15, 23, 34, 35, 48, 64-67, 71-79, 82, 88-92, 101-109, 111, 119, 123, 124, 131, 133, 134, 140, 142-144, 152, 156, 157, 171
 HR100 35, 65
 HR107 35, 65, 71, 72, 75-77
 HR107-ketel 71, 72, 76, 77
 HRe 40, 56, 65, 120, 147, 171
 HRe-ketel 40, 56, 147, 171
 huiseigenaar 14, 40
 huishoudelijk apparaat 37, 38
 huishouden 32, 34, 37, 44, 58, 61, 66, 89, 122, 171
 hulpenergie 71, 75, 113, 114
 hulpstook 102-105
 huursegment 33
 huurwoning 40, 149, 151
 hybride 12, 40, 48, 50, 107, 113, 114
 hybride warmtepomp 12, 48, 50, 107
 hydraulische berekening 141
 hydraulische inpasbaarheid 132
 hydraulische schakeling 109
 hypocaustum 57
 industrie 11, 14, 144
 informatie 13, 40, 151, 153-155
 installatie 6, 17, 23, 24, 35, 37, 38, 47, 56, 63, 64, 66, 73, 77, 89, 92-94, 103-106, 109, 118, 120-122, 124, 125, 129-134, 140, 143, 149, 151, 152, 154-157, 170
 installatiebedrijf 13, 154
 instelling 33
 isolerende beglazing 35, 40, 105
 interne warmtelast 37
 investering 40, 52, 58, 107, 108, 113, 142-144, 171
 investeringskosten 77, 88, 133
 isentrop 165
 isobaar 165
 isochoor 165
 isolatie 14, 28, 32, 34, 40, 47, 49, 51, 61, 88, 105, 109, 118, 119, 132, 140, 141, 152
 isolatiegraad 27, 37, 40
 isolatiewaarde 37
 isoleren 32, 34, 36, 92
 isotherm 165
 jaarbelastingduurkromme 66
 kamerthermostaat 55, 63, 82, 119, 150, 157
 kanaal 37, 141
 kantoorpand 37
 keteltype 35
 keuken 17, 32, 35, 56, 65, 76, 97, 111, 171
 keukenboiler 57
 kierdichtheid 37
 klimaattechniek 15
 klimaatverandering 47
 koelapparaat 37
 koelbedrijf 37
 koelcapaciteit 37, 107
 koelcyclus 168
 koelfunctie 98, 131
 koeling 11, 14, 37, 48, 57, 62, 98, 106, 107, 125, 148, 152, 163, 164
 koelkast 97-99, 101, 164
 koken 18, 19, 22, 34, 36, 151
 kolencentrale 14, 51, 170
 kolenkachel 13, 21, 65
 kooldioxide (CO₂) 50, 71, 87
 koolmonoxide (CO) 50
 koolstofarm 49
 koopsector 33
 koper 40, 105, 156
 kostenbesparing 24, 94
 krachtcyclus 99
 kunststof 141, 170
 labels 4, 14, 31, 38, 40, 65
 labelstap 40, 114
 labelverbetering 40
 lagetemperatuurverwarming (LTV) 60, 147, 148
 leeswijzer 15
 levensduur 12, 14, 38, 78, 101
 leverancier 13, 51, 91, 114, 140, 150, 151, 156
 LNG 46, 47, 52
 LNG-installatie 47
 LTV 99, 100, 107, 109, 111, 113, 151
 lucht/water-warmtepomp 37, 107, 108, 110, 111, 114, 132
 luchtvermaat 73, 74, 107, 108, 114
 maatregel 119
 maisonnette 28, 30
 mechanische afvoer 37
 medicijnen 49, 101
 meergezinswoning 27, 28, 30, 32, 33, 36, 38, 40, 129, 130
 methaan 50, 87
 micro-organismen 50
 micro-wkk 6, 12, 14, 15, 50, 51, 65, 66, 78, 81-85, 87-94, 132, 147, 154, 155, 162, 171, 176
 mijnbouw 49
 milieueffect 49
 milieuvulling 46
 mobiliteit 11
 moduleren 83
 modulerend bedrijf 74, 75, 77
 monovalent 102, 103
 muntgasmeter 21
 na-isolatie 132
 naverwarming 65, 120, 132, 140, 152, 156, 158
 netbeheerder 91, 114
 niet-meer-dan-anders (NMDA) 144
 nieuwbouw 14, 23, 47, 48, 77, 91, 105-108, 114, 126, 144, 171
 nieuwbouwwoningen 11, 36, 37, 47, 48, 64, 91, 92, 125, 126
 NMDA 144
 NO_x 49, 65, 74
 olieprijs 52
 omgevingswarmte 14, 47, 97, 130
 onderhoud 37, 40, 55, 78, 91, 101, 126, 143, 144, 149-151
 onderwaarde 65, 71, 72, 170
 onderwijs 50
 onderzoek 37, 50, 65, 130
 ontwerp 37, 58, 77, 109, 126, 141, 151
 ontwerptemperatuur 111, 130
 opleiding 33
 opwekker 66, 83, 129, 132
 opwekkingsrendement 14, 101, 149
 ORC 83, 84,
 Organic Rankine Cycle (ORC) 84
 Ottocyclus 166, 167
 oververhitting 117, 120
 oververhittingsberekening 37
 oxidator 50
 passieve koeling 107, 152
 passieve zonnewarmte 117
 PCM 62, 63, 170
 PEM-brandstofcel 87, 88
 penetratiegraad 34, 36, 37
 petroleumkachel 21
 phase change material (PCM) 62
 pieklast 37, 66, 92, 105-107, 152
 piekvraag 56, 132, 133
 prijsontwikkeling 52
 primaire energie 6, 67, 72, 76, 77, 90-92, 101-105, 111, 123, 133, 134, 143
 primaire energiedrager 37
 productieverlies 134
 prognose 4, 27
 publicatie 27
 PV-diagram 7, 165, 169, 171
 pyrolyse 14
 radiator 12, 56-60, 64, 76, 109, 132, 138, 152
 reductie 14, 38, 40, 71
 regeling 14, 56, 57, 63, 64, 75, 93, 101, 118, 132, 149, 173
 regeneratie 124, 126, 149, 171
 rendement 35, 50, 51, 57, 65, 71-78, 81, 86, 88, 90-94, 97-101, 105, 109, 111, 130, 132, 133, 142, 154, 163, 164, 171, 175
 rendementsverbetering 94, 130
 rendementswinsten 129, 130
 renovatie 40, 48, 107, 147, 152, 156
 reserve/productieratio 45, 46
 retourtemperatuur 64, 109, 151, 171
 rookgascondensatie 73, 74
 rookgascondensator 74
 rookgas 22, 57, 71-75, 77, 94, 100

- ruimteverwarming 6, 14, 19, 22, 27, 35, 37, 38, 47, 48, 55, 56, 61, 66, 67, 71, 75-77, 82, 86, 88-91, 98, 101, 103, 105, 106, 111, 113, 114, 117-119, 121, 124, 126, 129, 130, 133, 134, 138, 1490, 148, 152, 154, 156, 161, 171
- schaliegas 45, 46
- scheiding 33
- seasonal performance factor (SPF) 113, 150
- shale gas 45, 46
- Slochteren 21, 43, 65
- smart grid(s) 15, 38, 45, 48, 147, 154
- smoorventiel 98
- SO₂ 49, 173
- sociale huursector 30
- SOFC-brandstofcel 87, 88
- soortelijk gewicht 47
- SPF 112-114
- split incentive 40
- spouwmuur 28
- stadsverwarming 35, 60, 101, 142
- stadsverwarmingscentrale 138
- stadswarmtenet 60, 81, 119, 137, 139, 140, 171
- steenkool 8, 19, 44, 49, 51, 52, 73, 138, 173
- STEG-centrales 51
- Stichting Groen Gas 15, 51
- Stirlingcyclus 167
- Stirlingmotor 6, 67, 84, 85, 88-90, 92-94, 132, 154, 167, 171
- stookgedrag 47
- stooklijn 63-74
- stookruimte 57, 129, 131, 132
- stooktemperatuur 47
- stoom 50, 84, 86
- stoommotor 84, 86
- straling 58, 94
- studentenhuus 32
- tapwater 15, 17, 23, 35, 48, 56, 67, 73, 75-77, 81-83, 86, 88-92, 101, 105, 108, 113, 117, 120, 124, 125, 132, 134, 138, 152, 154, 156, 157
- tapwatervraag 89, 90, 105, 134
- technische levensduur 12
- teerzandolie 46
- temperatuurlift 99-101, 109, 113, 132, 169
- temperatuurniveau 56
- temperatuurverschil 64, 74, 99, 113, 141, 162, 163, 165, 169
- terminal 47
- thermische massa 60, 62, 89
- thermische zonne-energie 14, 15, 47, 147
- thermochemische 62, 101
- thermodynamica 15, 83, 100, 161, 169
- thermokoppel 73
- tocht 36
- transitiescenario 13
- transmissieberekening 132
- trend 21, 24, 28, 34, 37, 44, 77, 144
- Trias Energetica 34, 35
- twee-onder-een-kapwoning 27-29
- Tweede Wereldoorlog 27, 30, 44, 65
- tweetraps warmtepomp 130, 131
- tweetrapsysteem 130
- vacuumbuiscollector 119
- ventilatie 14, 23, 36, 37, 65, 107, 108, 148, 151
- ventilatie-unit 37
- ventilatiekanaal 37
- ventilatioerosters 37
- ventilatiesysteem 36, 37, 107
- ventilatievoorziening 36
- ventilator 75, 101, 109, 113
- verbeterd rendement (VR) 35, 73, 130
- verbrandingswaarde 5, 68, 71, 72, 173
- verdelers 132
- verduurzaming 9, 11, 13, 14, 40, 49, 51
- vergassing 14, 19, 50
- vergiftiging 14, 50
- vergroening 94
- verhuurders 40
- verketeling 129, 132
- verlichting 19 37
- verpleeghuis 33, 34
- verwarmingsapparaat 12, 13
- verwarmingsketel 15, 65, 71, 73, 88, 138
- verwarmingsmarkt 15, 65
- verwarmingsstelsel 5, 15, 55-57, 59, 61, 63-66, 67, 69, 73, 77, 83, 105, 111, 120, 124, 129, 130, 132, 147, 167, 169-171
- verwarmingstechnologie 14
- verwarmingstoestel 21, 65, 163
- verzorgingstehuis 33, 86
- vlaakplaatcollector 119, 122, 124, 125
- vloeibare fase 168, 169
- vloerisolatie 34, 40
- vloeroppervlak 29-31, 34
- vloerverwarming 14, 56, 57, 60, 107, 109, 148, 149
- vocht 36
- voorbeeldprojecten 15, 147, 153
- voorschrift 37
- VR 5, 23, 35, 73,
- VR-ketel 5, 23, 35, 73
- vraagreducerend 14
- vrije koeling 37, 148
- vrijstaand 30
- waakvlam 21, 73, 75
- warmtemachine 162-165, 167, 169
- wandverwarming 56, 57, 59, 60, 64, 107
- warm water 6, 11, 12, 14, 22, 23, 34, 35, 37, 55-58, 60, 62, 63, 65-67, 73, 75, 76, 82, 111, 119-125, 129, 132-134, 140-142, 148, 149, 151, 152, 156, 157, 161, 162
- warmte- en koudeopslag (wko) 48, 62, 106, 137, 147, 148
- warmtebehoefte 56, 57, 61, 89, 91, 122, 123, 134, 140, 156
- warmtebron 55, 67, 73, 84-86, 98-100, 102-106, 108, 109, 111, 113, 114, 126, 147-149, 152
- warmtecyclus 7, 164
- warmtekrachtkoppeling 7, 23, 81, 132
- warmtenet 7, 15, 81, 119, 129, 137-144, 171
- warmteopwekker 14, 97, 124
- warmtepomp 6, 7, 12, 14, 15, 23, 36, 37, 48, 50, 51, 55, 57, 64-67, 90, 92, 93, 97-114, 120, 123, 124, 130-132, 140, 147-152, 162-165, 167, 169
- warmtepomp - absorptiewarmtepompen 101, 130
- warmtepomp - bivalente warmtepomp 102, 107
- warmtepomp - bodem/water-warmtepomp 106, 108, 110-112
- warmtepomp - elektrische warmtepomp 6, 14, 37, 98, 100, 101, 103-107, 111, 130, 131, 147, 148
- warmtepomp - gasgedreven warmtepomp 48, 130
- warmtepomp - gasmotorwarmtepomp 6, 100, 103, 105
- warmtepomp - hybride warmtepomp 12, 48, 50, 107
- warmtepomp - lucht/water-warmtepomp 107, 108, 110, 111, 114
- warmtepomp - monovalente warmtepomp 102
- warmtepomp - warmtepompboiler 112-115
- warmtepomp - water/water-warmtepompen 108, 112
- warmtepompboiler 112-115
- warmtepompsysteem 6, 101, 105, 106, 109, 113, 124, 130, 132, 149-151
- warmteterugwinning 23, 36, 37, 107, 109
- warmtevraag 14, 23, 34, 37, 47, 48, 58, 60, 61, 64, 66, 76, 77, 82, 83, 89, 91-93, 103, 105, 106, 109, 119, 121-123, 132, 133, 140, 144, 148
- warmtewisselaar 36, 37, 73-75, 84, 94, 98, 106, 113, 132, 138, 148, 149, 152
- warmwaterbereiding 37, 57, 132
- wasdroger 37, 38
- wasmachine 38
- water/water-warmtepompen 108, 112
- waterstof 50, 51, 71, 87, 88, 94
- watervoerend 57
- weersafhankelijke 63
- weerstandverwarming 37, 103, 105
- welvaart 21, 49
- welvaartsontwikkeling 28, 43
- wet van behoud van energie 97, 99
- wet van Carnot 87, 163
- wet- en regelgeving 87, 163
- windenergie 35, 50, 51, 105
- windmolenpark 52
- wkk 6, 7, 12, 14, 15, 47, 48, 50, 51, 65, 66, 78, 81-95, 99, 105, 124, 132-134, 137, 138, 140, 142, 143, 147, 154, 155, 162, 163, 171, 175, 176
- wko 62, 104, 106-108, 137, 138, 140, 144
- Woning Waardering Stelsel (WWS) 40
- woningareaal 27
- woningbouwcorporatie 30
- woningcorporatie 40, 44, 107, 148, 154, 156
- woningmarkt 32, 33
- woningsector 11
- woningstype 13, 14, 28, 29, 31, 33, 38
- woningvoorraad 4, 15, 27, 32, 33
- wooncarrière 33
- WWS 40, 107
- zon-PV 40, 51, 52, 93, 105, 106, 125, 126
- zon-thermisch 7, 92, 117, 152
- zonneboiler 40, 64, 65, 92, 105, 119-126, 152, 157
- zonneboilercombi 121
- zonnelcollector 101, 118, 119, 121-126, 152, 156-158, 171
- zuurstof 50, 71, 72, 87, 106

Corporate statement GasTerra

GasTerra is een internationaal opererende handelsonderneming in aardgas. De onderneming is werkzaam op de Europese energiemarkt en heeft een belangrijk aandeel in de Nederlandse gasvoorziening. Daarnaast biedt GasTerra aan de gashandel gerelateerde diensten aan. De onderneming heeft een sterke inkooppositie en meer dan veertig jaar ervaring met de in- en verkoop van aardgas.

GasTerra vervult een publieke taak met betrekking tot de uitvoering van het kleineveldenbeleid van de Nederlandse overheid. Dit beleid is gericht op het bevorderen van de productie van Nederlands aardgas uit de kleinere gasvelden. Vanuit een klantgerichte houding streeft GasTerra naar bestendige relaties met marktpartijen en naar verkoopovereenkomsten waarin de marktwaarde van het aardgas en bijgeleverde diensten tot uiting komt.

GasTerra zet in op duurzame ontwikkeling als fundament voor strategie en acties. De economische waarde en het maatschappelijk belang van aardgas als energiebron geven de onderneming een belangrijke rol in de benutting van de binnenlandse gasvoorraad en de energievoorziening in Nederland en de Europese Unie (EU). GasTerra bevordert een veilige en doelmatige inzet van aardgas en is actief in de ontwikkeling van verdere toepassingen. Het bedrijf onderkent het grote belang van het transitietraject naar een duurzame energievoorziening en initieert projecten in dit kader.

GasTerra's handelen is gebaseerd op een gedragscode, waarbij de waarden integriteit en respect de leidraad vormen.