

Gaswarmtepompen

Efficiënt verwarmen en koelen met aardgas



De wereld van aardgas

Gaswarmtepompen

Efficiënt verwarmen en koelen met aardgas



De wereld van aardgas

Gaswarmtepompen

Efficiënt verwarmen en koelen met aardgas

GasTerra / Castel International Publishers
Groningen, The Netherlands

Dit boek is samengesteld en deels geschreven door Business Development Holland b.v. te Harderwijk. BDH is een expertorganisatie op het gebied van strategieontwikkeling en marketingcommunicatie voor utiliteit-, woningbouw- en energiesector.

Auteurs: Ernst-Jan Bakker (ECN), Jeroen van der Garde (KIWA Gastechology), Kees Jansen (KIWA Gastechology), Roberto Traversari (TNO Bouw & Ondergrond), Peter Wagener (Business Development Holland)

Redactie: Margot van Gastel (Cogen Projects), Peter Oostendorp (HR Advies)

Eindredactie: Henk Ensing (GasTerra), Benne Holwerda (Holwerda & Holwerda), Peter Wagener (BDH)

Redactie GasTerra: Anton Buijs, Henk Ensing, Hans Overdiep

Figuren en illustraties: Business Development Holland, Cogen Projects, ECN, Gasengineering, KIWA GasTechnology, TNO Bouw en Ondergrond, Vital Fitness Centre, CE Delft, Ecofys, Anita Pantius, GEA Polacel, Itho, ICE, EnergieNed, Techneco, Remeha, Orfeokliniek Zoetermeer, Genie, Sportfondsen Nederland, Stratus, Endex, GasTerra, Ariston, Universität Dortmund, Thermax, Broad, Sonnenklima, Solarnext, Warwick University, Nyteknik, GEA Grasso, Alfa Laval

Concept en realisatie: Castel International Publishers

Vormgeving: Eldad Groenman, Antoon van Son en Susanna Kuiper (Castel Mediaproducties)

© 2010 GasTerra / Castel International Publishers

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, 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 10 6

NUR 600

www.bdho.nl

www.castel.nl

www.gasterra.nl

Ten geleide	8		
Voorwoord	10		
Hoofdstuk 1 Aardgas en de energietransitie	13		
1.1 Nederland en aardgas	13		
1.2 De voordelen van aardgas	14		
1.3 Energietransitie	14		
1.4 De beschikbaarheid van aardgas	15		
1.5 Andere gassen	16		
Hoofdstuk 2 Gaswarmtepompen in de gebouwde omgeving	19		
2.1 Aardgas voor verwarmen en koelen	19		
2.1.1 De utiliteitsbouw	19		
2.1.2 Ontwikkeling van de utiliteitsbouw in Nederland	21		
2.1.3 Ontwikkeling van verwarming in de utiliteitsbouw	21		
2.1.4 Ontwikkeling van koeling in de utiliteitsbouw	22		
2.2 Werking van de warmtepomp	23		
2.2.1 Werkingsprincipe	23		
2.2.2 Gasmotorwarmtepompen	24		
2.2.3 Gasabsorptiewarmtepompen	27		
2.2.4 Betrouwbaarheid	27		
2.3 Milieu-effecten van gaswarmtepompen	28		
2.4 Het potentieel voor gaswarmtepompen	29		
2.4.1 Nieuwbouw	30		
2.4.2 Bestaande bouw	31		
2.4.3 Realiseerbaar potentieel	33		
2.4.4 Kleine collectieve systemen	34		
2.5 Gaswarmtepompen en regelgeving	35		
2.5.1 CE-markering	35		
2.5.2 Gaswarmtepomp keurmerk	35		
2.5.3 Besluit Energieprestatie Gebouwen	36		
2.5.4 Gaswarmtepompen en de EPN	37		
Hoofdstuk 3 Technologie van warmtepompen	39		
3.1 Warmtepompen en rendementen	39		
3.2 Arbeidgedreven warmtepompen met gasmotor	41		
3.2.1 Gasmotorgedreven compressiewarmtepomp	41		
3.2.2 Gasmotorgedreven compressiewarmtepomp, multi-split type	43		
3.3 Arbeidgedreven warmtepomp met externe verbranding	44		
3.3.1 De Stirlingcyclus	44		
3.3.2 Stirling-Stirling	46		
3.3.3 Thermo-akoestische systemen	47		
3.3.4 Vuilleumier	51		
3.4 Thermisch gedreven warmtepompen	53		
3.4.1 De thermisch gedreven sorptiewarmtepomp	53		
3.4.2 Vloeistofsorptiesystemen	55		
3.4.3 Ammoniak-watersystemen	55		
3.4.4 Lithiumbromide-watersystemen	57		
3.4.5 ASUE gasabsorptiewarmtepomp	58		
3.5 Vastestof-sorptiewarmtepomp	59		
3.5.1 Silicagel-wateradsorptiewarmtepomp	59		
3.5.2 Zeoliet-waterwarmtepompen	62		
3.6 Alternatieve vastestof-sorptiesystemen	63		
3.6.1 Vastestof-ammoniak	63		
3.6.2 LiCl-H ₂ O	64		
Hoofdstuk 4 Ontwerpaspecten en toepassing in gebouwen	67		
4.1 Elektrisch of gasgedreven?	67		
4.2 Ontwerpen in nieuwbouw en bestaande bouw	70		
4.3 De zorgsector	73		
4.3.1 Nieuwbouw	73		
4.3.2 Bestaande bouw	74		
4.4 Kantoren	74		
4.4.1 Nieuwbouw	74		
4.4.2 Bestaande bouw	74		
4.5 Hotel- en recreatiebranche	75		
4.5.1 Nieuwbouw	75		
4.5.2 Bestaande bouw	76		
4.6 Retailsector	76		
4.6.1 Nieuwbouw	77		
4.6.2 Bestaande bouw	77		
4.7 Ontwerpaspecten	77		
4.7.1 Afgiftesystemen	79		
4.7.2 Buffers	80		
4.7.3 Bronnen	82		
4.7.4 Inpassing van een gaswarmtepomp	84		
4.7.5 Gebruikaspecten	84		

Hoofdstuk 5 Wärmtepompsystemen en -componenten	87		
5.1 Rendementen	87		
5.2 De gasmotorwärmtepompe	89		
5.2.1 Systeemoverzicht	90		
5.2.2 Gasmotor	92		
5.2.3 Compressor	94		
5.2.4 Expansieventiel	96		
5.2.5 Wärmtewisselaars	98		
5.2.6 Gasmotorwärmtepompen in Nederland	102		
5.3 De absorptiewärmtepompe	106		
5.3.1 Kleinschalige absorptiewärmtepompen	106		
5.3.2 Grootschalige absorptiewärmtepompen	107		
5.4 Optimalisatie van wärmtepompsystemen	108		
5.4.1 Ontwerp gasmotorwärmtepompen	108		
5.4.2 Ontwerp absorptiewärmtepompen	109		
5.5 Regeling	109		
5.5.1 Hoofdregeling	109		
5.5.2 Stooklijn	110		
5.5.3 Koelcapaciteit	112		
5.6 Het huidige productaanbod	113		
Hoofdstuk 6 Economische analyse	115		
6.1 Economische analyse	115		
6.1.1 Investeringskosten en -baten	115		
6.1.2 Economische haalbaarheid	116		
6.1.3 Onderhoud en beheer	117		
6.1.4 De energieprijis	117		
6.1.5 Financiële en fiscale regelingen	120		
6.2 Total cost of ownership	121		
6.2.1 Kosten voor aardgas	122		
6.2.2 Kosten voor elektriciteit	123		
6.2.3 Belastingen	124		
6.2.4 Exploitatieberekening	124		
6.3 Financiering	127		
Hoofdstuk 7 Voorbeeldprojecten	131		
7.1 Bioscoop CineMagnus, Schagen	132		
7.2 Orfeokliniek, Zoetermeer	134		
7.3 Vital Centre, Raalte	136		
7.4 Flatgebouwen Schalkwijk, Haarlem	138		
		7.5 Kinderdagcentrum De Lotusbloem, Aalsmeer	140
		7.6 Sportfondsenbaden	142
		7.7 Winkelcentrum, Geleen	144
		7.8 Natuurcentrum, Ameland	146
		7.9 Adviesbureau Genie, Grootebroek	148
		Bijlage	151
		Rekenen aan gaswärmtepompen	
		Definities	156
		Conversietabellen	160
		Lijst van afkortingen en symbolen	163
		Literatuurlijst	164
		Register	166
		Corporate Statement GasTerra	170

Ten geleide

GasTerra is van mening dat aardgas wereldwijd nog tot diep in deze eeuw een hoofdrol zal spelen in de energievoorziening. Deze mening is gebaseerd op feiten en prognoses. Het is een feit dat de fossiele brandstoffen momenteel voor 90% of meer in de primaire energiebehoefte voorzien. Het is ook een feit dat van deze fossiele brandstoffen aardgas relatief de beste eigenschappen heeft, met de minste belasting voor het milieu.

De gasvoorraden strekken tot ver in deze eeuw. In het transitietijdperk naar duurzamere vormen van energie winnen de hernieuwbare bronnen aan betekenis. Prognoses op basis van de huidige kennis van zaken wijzen uit dat duurzame bronnen halverwege deze eeuw een significante bijdrage aan de totale energievoorziening zullen leveren. Toch is het duidelijk dat aardgas in deze eeuwhelpt samen met kolen en olie, zelfs als het verduurzamingsproces versnelt, een belangrijke energiebron zal zijn.

Dit legt een dubbele verantwoordelijkheid op onze schouders. We moeten het aandeel van aardgas minstens op het huidige hoge peil houden. Tegelijkertijd zullen we de transitieperiode naar een echt duurzame energie-economie moeten zien te verkorten.

GasTerra kijkt als expert op aardgasgebied naar aardgasgerelateerde transitiemogelijkheden: wat kan zuiniger, schoner en doelmatiger? De onderneming acht het bovendien haar plicht kennis op dit terrein te delen en het maatschappelijk debat te bevorderen. Ontwikkelingen op energiegebied raken immers iedereen. De informatiebehoefte blijkt groot. Daarom publiceert GasTerra een reeks boeken die in deze behoefte voorzien.

Dit boek beschrijft hoe gaswarmtepompen de efficiëntie van het energiegebruik in utiliteitsgebouwen en appartementencomplexen kunnen verbeteren. De inhoud is samengesteld en geschreven door Business Development Holland b.v., in nauwe samenwerking met TNO Bouw en Ondergrond, KIWA GasTechnology en ECN. GasTerra heeft als opdrachtgever gefungeerd en heeft buiten dit 'Ten geleide' geen inhoudelijke bijdrage geleverd, maar kan zich met de inhoud verenigen. We zijn de auteurs erkentelijk voor dit gedegen overzicht, dat bijdraagt aan de kennis over en toepassing van efficiënt energiegebruik.

Eerder verschenen in deze boekenserie 'De wereld van aardgas' delen over aardgas en energietransitie, warmtekrachtkoppeling en de geschiedenis van aardgas. Voor de komende jaren staan boeken op stapel over ruimteverwarming en groen gas. De reeds verschenen delen zijn op aanvraag verkrijgbaar.

Anton Buijs
Manager Communicatie GasTerra B.V.

Voorwoord



Het lijkt op het intrappen van een open deur, maar er is geen schonere energie dan ongebruikte energie. Dit simpele feit verliezen degenen die aan een duurzame energie-economie willen bouwen nog wel eens uit het oog. We komen er (nog) niet met hernieuwbare bronnen zoals wind, zon en biomassa. Energie-efficiëntie moet daarom. Want door het verstoken van fossiele brandstoffen te beperken, verminderen we direct de uitstoot van CO₂.

Aardgastoepassingen met hoge rendementen kunnen hier de helpende hand bieden. Aardgas is de schoonste fossiele brandstof en flexibel inzetbaar. Bovendien leent het zich goed voor innovatieve energie-efficiënte oplossingen in de transitiefase naar een volledig duurzame energie-economie.

GasTerra heeft een eigen energietransitieprogramma met veelbelovende projecten op het gebied van slimme, lees efficiënte aardgastoepassingen. Een illustratief resultaat van ons actieve transitiebeleid is de opvolger van de HR-ketel voor centrale verwarmingsystemen, de HRe-ketel. Die e staat voor elektriciteit. Eigenlijk is het een micro-uitvoering van een warmtekrachtcentrale. Die produceert immers ook warmte en stroom en heeft daardoor een fors hoger rendement dan een conventionele elektriciteitscentrale. Per saldo zou een grootschalige inzet van HRe-ketels daardoor een significante vermindering van CO₂-emissies opleveren.

Ook op het gebied van gaswarmtepompen is onze onderneming actief. Deze warmtepompen hebben ten opzichte van elektrische versies het voordeel dat ze relatief eenvoudig inpasbaar zijn in de huidige energie-infrastructuur. Verzwaring van het elektriciteitsnet is bijvoorbeeld niet nodig. Gaswarmtepompen kunnen op termijn ook gevoed worden met een mengsel van aardgas en groen gas, waardoor het aandeel van duurzame energie nog verder toeneemt. We verwachten dat gaswarmtepompen in de bestaande bouw (utiliteitsbouw en collectieve systemen) een belangrijke transitietechnologie zullen worden.

We hopen dat dit boek aan deze vernieuwing zal bijdragen.

Gertjan Lankhorst
CEO GasTerra B.V.

Hoofdstuk 1

Aardgas en de energietransitie

In het proces van geleidelijke overgang naar een duurzame energievoorziening (de zogeheten energietransitie) zijn fossiele energiebronnen onmisbaar. Van het trio aardgas, aardolie en steenkool heeft aardgas een aantal grote voordelen: een hoge efficiency, de laagste CO₂-uitstoot en een goede regelbaarheid. Daarnaast beschikt Nederland over eigen voorraden en een uitstekende gasinfrastructuur. Vooral in de gebouwde omgeving kan door de efficiënte inzet van aardgas ruimte ontstaan voor de ontwikkeling van nieuwe duurzame energieopties. Op die manier kan aardgas het transitieproces krachtig ondersteunen. De Nederlandse gasvoorraden zijn groot genoeg om de vraag tijdens de transitieperiode te dekken.

1.1 Nederland en aardgas

In de eerste helft van de twintigste eeuw was de energievoorziening in Nederland grotendeels gebaseerd op steenkool. In 1959 werd bij het Groningse dorp Slochteren een gasveld ontdekt dat tot de grootste velden van Europa behoort. De vondst van dit gasveld bracht grote veranderingen teweeg in de energievoorziening. Vanaf de vroege jaren zestig werd steenkool op grote schaal vervangen door aardgas.

De vondst van het aardgas heeft ontegenzeggelijk invloed gehad op de Nederlandse economie. In de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw kwam relatief veel energie-intensieve bedrijvigheid tot ontwikkeling, zoals de glastuinbouw en de kunstmest- en aluminiumproductie.

Tussen 1965 en 1980 groeide aardgas uit tot de belangrijkste primaire energiebron van Nederland. In de gebouwde omge-

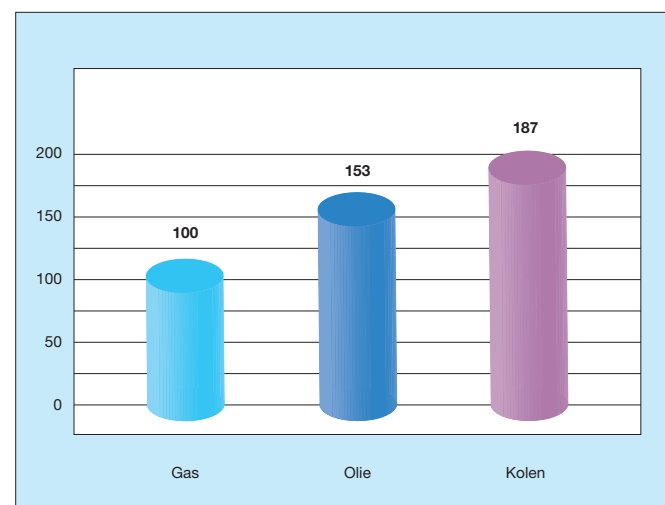
ving wordt tegenwoordig voor verwarming vrijwel uitsluitend aardgas toegepast. Elders in Europa is dat veel minder het geval. In Nederland voorziet aardgas momenteel in ongeveer vijftig procent van de totale landelijke energievraag. Ook wordt bijna de helft van alle elektriciteit in Nederland opgewekt met behulp van aardgas.

De populariteit van aardgas heeft in de eerste plaats te maken met de eigen voorraden en met de goede transportinfrastructuur, maar wordt daarnaast ook ingegeven door de relatief lage uitstoot van stikstofoxiden bij verbrandingsprocessen en de afwezigheid van zwavel. Door de relatief gunstige koolstof/waterstofverhouding is bij verbranding van aardgas de uitstoot van CO₂ lager dan bij alle andere fossiele brandstoffen.

1.2 De voordelen van aardgas

In vergelijking met andere fossiele energiedragers heeft aardgas een aantal voordelen.

- **Lage emissies** - Van alle fossiele brandstoffen heeft aardgas de gunstigste chemische samenstelling. Aardgas bestaat voor het grootste deel uit methaan (CH_4), met per molecuul één koolstofatoom op vier waterstofatomen. Andere fossiele brandstofsoorten hebben langere en meer complexe koolstofketens. Dankzij de gunstige koolstof/waterstofverhouding van aardgas is de CO_2 -emissie per eenheid energie het laagst. Figuur 1 toont de CO_2 -emissies bij verbranding van de verschillende brandstofsoorten. Het verschil met de CO_2 -emissie van steenkool is bijna een factor twee. Ook de emissies van fijnstof, SO_2 en NO_x zijn bij aardgastoepassingen aanmerkelijk lager dan bij de inzet van steenkool of aardolie. Emissies van fijnstof zijn te verwaarlozen, evenals die van SO_2 , omdat aardgas geen noemenswaardige hoeveelheden zwavel bevat. De vorming van NO_x (dat ontstaat in het verbrandingsproces) kan met geavanceerde technieken aanzienlijk worden gereduceerd.
- **Zuinige technologie** - Warmte of elektriciteit produceren uit aardgas kan met een zeer hoog rendement. Aardgas-technologie is dus relatief zuinig.

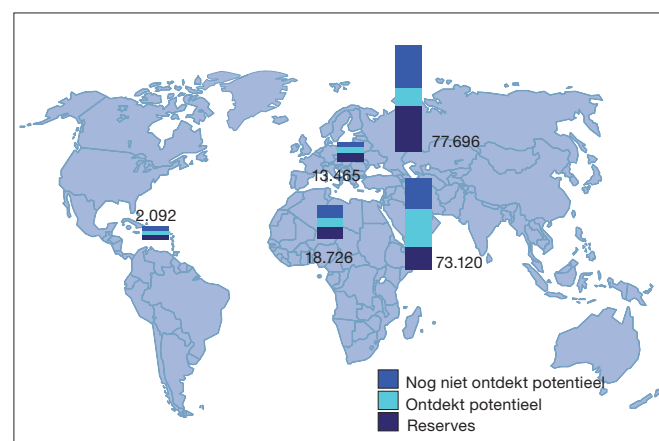


Figuur 1 Specifieke CO_2 -emissies van aardgas, aardolie en steenkool.

- **Ondersteuning van duurzame bronnen** - Duurzame energiebronnen zoals windenergie (op land of op zee), zonne-energie en biomassa moeten in de toekomst een steeds groter deel uitmaken van de energievoorziening. Met name bij wind- en zonne-energie is de beschikbaarheid een belangrijk aandachtspunt. Het aanbod van deze energievormen loopt zelden synchroon met de vraag. Bij de elektriciteitsvoorziening is de balans tussen vraag en aanbod cruciaal. Elektriciteitsproductie op basis van aardgas heeft het voordeel dat het snel en direct regelbaar is. Bovendien kan de technologie op bijna iedere schaalgrootte ingezet worden. Daarmee is aardgas een uitstekende back-up voor kleinschalige of grootschalige toepassing van hernieuwbare bronnen. Het feit dat er een back-upvoorziening is, maakt de inpasbaarheid van hernieuwbare energie eenvoudiger.

1.3 Energietransitie

In lijn met langetermijndoelen van de Europese Unie heeft de Nederlandse overheid de ambitie geformuleerd om de energievoorziening in Nederland volledig duurzaam te maken. De overgang van de huidige situatie (waarin fossiele energiedragers dominant zijn) naar een duurzame energievoorziening vraagt tijd en grote investeringen. Daarom is het cruciaal dat het proces geleidelijk verloopt.



Figuur 2 Bewezen reserves, voorraden en vermoede voorraden aan aardgas in de wereld (in miljard m^3/jr).

De Nederlandse overheid heeft in haar beleid ambitieuze tussendoelen geformuleerd ten aanzien van energiebesparing en emissiereductie. Die houden in dat de uitstoot van broeikasgassen (met name CO_2) in 2020 dertig procent lager moet zijn dan in 1990. Verder moet het tempo van de energiebesparing verdubbelen naar twee procent per jaar en moet het aandeel duurzame energie in 2020 twintig procent zijn van het totale energiegebruik. De afname in CO_2 -emissie geldt daarbij als een indicatie voor de mate van duurzaamheid van de energiehuishouding. Daarnaast vragen ook de emissies die schadelijk zijn voor de luchtkwaliteit, zoals NO_x en fijnstof, om een transitie van de energievoorziening.

Op Europees niveau zijn doelen geformuleerd om de emissie van CO_2 vérgaand te reduceren en het aandeel van hernieuwbare energie evenredig te vergroten. Momenteel is de trend van energieconsumptie door particulieren en bedrijven (met name het gebruik van elektriciteit) echter nog stijgend. Door de toenemende welvaart en de stijgende vraag naar comfortkoeling is deze trend moeilijk om te buigen. De verwachte toename van de energieconsumptie wordt in het beste geval gecompenseerd door isolatiemaatregelen en door toepassing van efficiëntere apparaten en installaties. De vraag naar elektriciteit zal naar verwachting niet noemenswaardig dalen. Desondanks willen de lidstaten van Europa in 2050 nog maar twintig procent van de CO_2 -emissies van 2005 uitstoten. Die reductie moet voor het grootste deel gerealiseerd worden door de inzet van hernieuwbare energiebronnen, gecombineerd met de schone inzet van fossiele energie en CO_2 -opslag.

Aardgas als transitiebrandstof

De komende veertig jaar spelen fossiele brandstoffen naar verwachting nog een belangrijke rol in de energievoorziening. Ook Europa kan voorlopig niet zonder aardolie, steenkool en aardgas. Aardgas is van de drie fossiele brandstoffen de meest aantrekkelijke energiedrager. In de meeste transitie-scenario's vormt de inzet van aardgas dan ook de basis voor de verandering naar duurzaamheid.

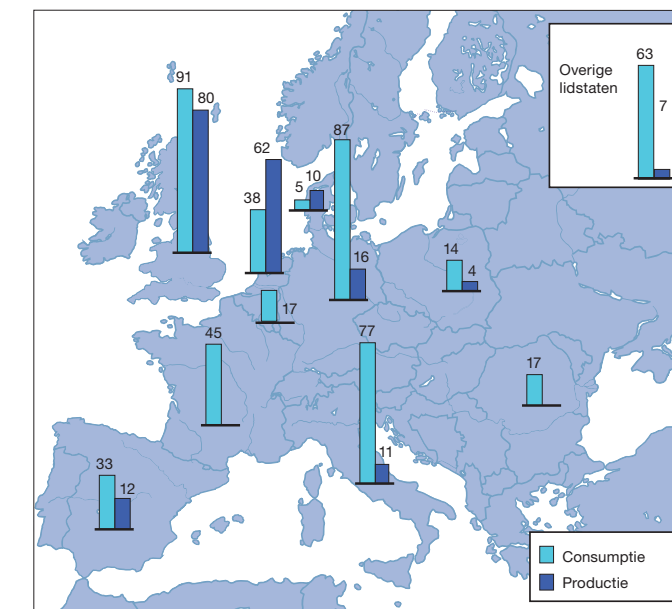
1.4 De beschikbaarheid van aardgas

Mondiaal gezien zijn er nog grote hoeveelheden aardgas beschikbaar in bewezen voorraden. De grootste reserves (ongeveer de

helft van de wereldgasvoorraad) bevinden zich in Rusland. Naast Rusland zijn ook Iran, Qatar en West-Siberië landen of regio's met grote bewezen gasvoorraden.

De landen van de Europese Unie gebruiken ongeveer 500 miljard kubieke meter aardgas per jaar (niveau 2005). Hiervan wordt ongeveer 40% gedekt door de productie van landen binnen de Unie. De overige 60% is afkomstig van import via pijpleidingen en LNG-schepen (LNG: Liquefied Natural Gas oftewel vloeibaar aardgas). Ongeveer 260 miljard kuub komt uit Noorwegen en Rusland; 60 miljard kuub is afkomstig uit met name Nigeria en Algerije en wordt aangevoerd in de vorm van LNG (cijfers 2005).

Nederland en Denemarken zijn de enige landen in de Europese Unie die meer gas winnen dan dat ze zelf verbruiken. Nederland heeft binnen de Unie de grootste reserves. In Noorwegen (geen EU-lid) bevinden zich de grootste reserves van de regio. Het binnenlands gebruik van Noorwegen is laag, wat het land tot een belangrijke exporteur van aardgas maakt.



Figuur 3 Europese aardgasconsumptie en -productie in 2005 (in miljard m^3/jr). Bron: CE Delft/ECN 2007

Gebied	Bewezen reserves	Ontdekt en nog niet ontdekt potentieel	Totaal
Noorwegen	2.890	4.000	6.890
Nederland	1.350	600	1.950
Duitsland	160	400	560
Groot-Brittannië	480	1.500	1.980
Ierland	28	100	128
Denemarken	80	0	80
Oostenrijk	24	25	49
Frankrijk	8	0	8
Italië	160	200	360
Hongarije	73	100	173
Polen	100	200	300
Roemenië	630	400	1.030

Tabel 1 Bewezen reserves, voorraden en vermoede voorraden aan aardgas in Europa (miljard m³). Bron: OGP (2003) en BP (2007)

Binnen Europa ambieert Nederland de positie van ‘gasrotonde’, waarbij het Nederlandse aardgastransportnet als knooppunt fungeert voor het importeren, bufferen en exporteren van grote gasstromen. In dat kader worden in Nederland twee LNG-terminals gebouwd, zodat daarmee ook de gasstromen uit bijvoorbeeld Algerije en het Midden-Oosten op het rotonde-concept aansluiten. Aanvoer van aardgas over dergelijke afstanden is alleen in vloeibare vorm (LNG) rendabel.

Uitgaande van de huidige kennis en inzichten zijn de bewezen Nederlandse gasvoorraden nog ruim voldoende voor veertig jaar binnenlandse vraag. De ervaring leert dat overal waar gas gewonnen wordt, er meer gas aanwezig is dan tot nu toe is aangetoond. Door diversificatie en een gestaag groeiend aandeel van hernieuwbare energie zal het gebruik van aardgas bovendien geleidelijk afnemen. Voor de periode van transitie naar een volledig duurzame energiehuishouding (veertig tot vijftig jaar, waarbij het gasverbruik geleidelijk afneemt) heeft Nederland dan ook ruimschoots voldoende eigen gasvoorraden.

1.5 Andere gassen

In het proces van energietransitie zullen naast aardgas ook andere gasvormige energiedragers een rol spelen. Dit kunnen schone fossiele gassen zijn (zoals kolengas in combinatie met CO₂-opslag), maar ook gassen uit biomassa en andere hernieuw-

bare energiebronnen. Deze laatste categorie wordt meestal aangeduid als ‘groen gas’. Groen gas staat momenteel volop in de belangstelling. Op wereldschaal is concurrentie met de voedselproductie wel een punt van aandacht. Om druk op de voedselproductie te vermijden komt te nadruk steeds meer te liggen op het vergassen van restmateriaal van landbouwprocessen.

Groen gas of biogas wordt op bescheiden schaal geproduceerd door middel van vergisting of vergassing. Als het geproduceerde gas van voldoende kwaliteit is, kan het via bijmenging op beperkte schaal in de bestaande gasinfrastructuur worden gebruikt.

Met stortgas en gas van lokale vergistingsinstallaties heeft de energiesector intussen al enige ervaring opgedaan. Het opwekken van biogas tot voldoende droog en schoon groen gas is in principe mogelijk; dit is in de praktijk afdoende bewezen. Wel zullen aan biogas in de toekomst aanvullende kwaliteitseisen worden gesteld.

Vergassing van steenkool (kolenvergassing) biedt mogelijkheden om op industriële schaal syngas te produceren met volumes van 380 tot 400 miljoen kubieke meter per jaar. Dit is alleen zinvol als de vrijkomende CO₂ afgevangen en opgeslagen kan worden. Het gas dat bij kolenvergassing ontstaat, moet nog worden bewerkt voordat het met aardgas gemengd kan worden.

Europa heeft grote ambities voor groen gas. Dat geldt ook voor Nederland. De commissie-Cramer heeft aanbevelingen gedaan om een certificatiesysteem op te zetten voor groen gas, zoals dat nu al voor groene stroom geldt.

De transitiewerkgroep Groen Gas (onder regie van Agentschap NL, voorheen bekend als SenterNovem) gaat ervan uit dat voorlopig maximaal vier procent van het aardgas vervangen kan worden door biogas (vooral uit vergisting). Met een aardgasverbruik volgens het Global Economy scenario van 1542 PJ in 2020 bedraagt het potentieel voor groen gas dus 62 PJ. Dit cijfer wordt door andere inschattingen onderbouwd. Na 2020 voorziet de werkgroep Groen Gas een sterke groei van het aandeel biovergassing, oplopend naar twaalf procent van het aardgasverbruik in 2030. ■

Hoofdstuk 2

Gaswarmtepompen in de gebouwde omgeving

Aardgas is in Nederland verreweg de meest ingezette energiedrager voor verwarming van gebouwen. Aangejaagd door de uitstekende gasinfrastructuur is in de gebouwde omgeving de technologie van de condenserende HR-ketel inmiddels standaard. Warmtepompen dienen zich nu aan als een volgende reële stap in efficiencyverbetering. Warmtepompen op aardgas ontlasten het elektriciteitsnet en hebben als voordeel een laag primair energiegebruik. Het potentieel voor gaswarmtepompen in de gebouwde omgeving in Nederland is dan ook aanzienlijk.

2.1 Aardgas voor verwarmen en koelen

Alle sectoren van de Nederlandse economie gebruiken aardgas. Figuur 1 op pagina 20 laat zien hoe het totale gasverbruik van Nederland in 2006 was verdeeld over de diverse sectoren.

In Nederland speelt aardgas een prominente rol in de gebouwde omgeving. Nagenoeg alle bestaande gebouwen hebben een gasaansluiting. Aardgas wordt met name ingezet voor ruimteverwarming en voor het verwarmen van tapwater.

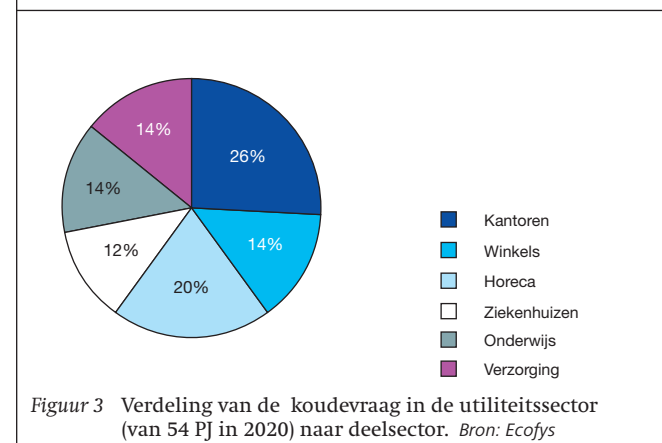
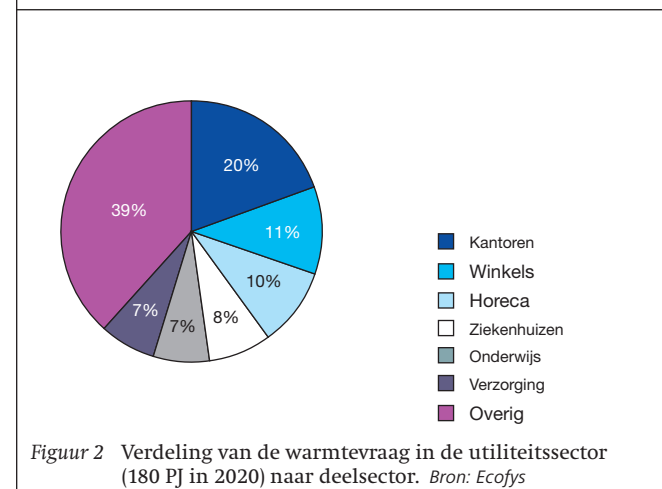
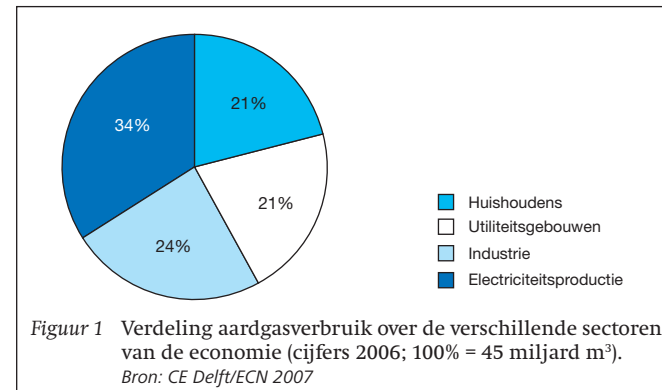
De gebouwde omgeving bestaat uit de sectoren woningbouw en utiliteitsbouw. In dit boek beperken we ons voornamelijk tot de utiliteitsbouw; in een enkel geval wordt de woningbouw ook aangehaald. De utiliteitsbouw omvat alle gebouwen die gebruikt en geëxploiteerd worden vanuit een bedrijfsmatig perspectief:

kantoren, winkels, hotels, ziekenhuizen, scholen, recreatiegebouwen en gebouwen voor de zorgsector. Industriële processen en bouwnijverheid zijn in dit boek niet meegenomen.

2.1.1 De utiliteitsbouw

De utiliteitsbouw is een zeer heterogene sector. Gelet op het totale energiegebruik zijn kantoren, gezondheidszorg en de detailhandel de belangrijkste deelsectoren. Wanneer we alleen de warmtevraag bezien, zijn de gezondheidszorg en de horeca toonaangevend. De totale warmtevraag in de utiliteitsbouw neemt de komende jaren licht af tot naar schatting 180 PJ in 2020.

In de utiliteitsbouw en de woningbouw daalt de warmtevraag geleidelijk. Het grootste deel van de warmtevraag is bestemd voor ruimteverwarming. Alleen bij verzorgingstehuizen, zwembaden en

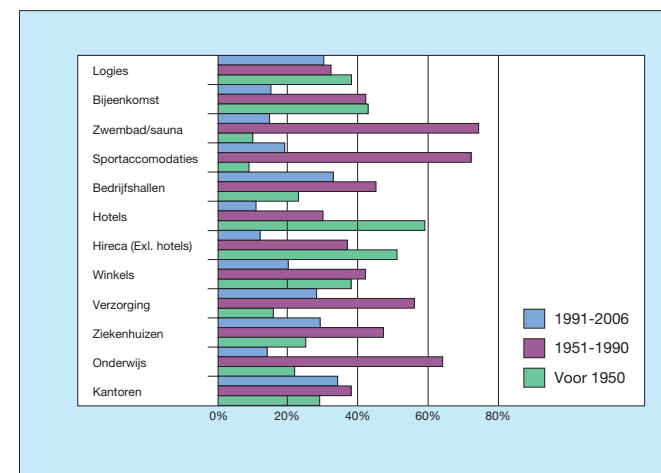


specifieke instellingen is de warmtevraag voor het verwarmen van water dominant. De gebruikte technieken zijn in de utiliteitssector in principe niet anders dan in de woningbouw, alleen liggen de capaciteiten aanzienlijk hoger.

De behoefte aan koeling laat het omgekeerde beeld zien. De trend is dat het belang van koelen in de totale energievraag van de utiliteitssector geleidelijk toeneemt. Deze trend zal naar verwachting de komende jaren doorzetten en de energievraag voor koeling zal die voor verwarming gaan overstijgen. Geschat wordt dat het aandeel in de energievraag dat bestemd is voor koeling zal stijgen van zo'n tien procent in 2009 (circa 19 PJ) naar dertig procent in 2020 (circa 54 PJ). De toename van de vraag naar koeling komt vooral voor rekening van kantoren, de zorgsector en de detailhandel.

Bestaande utiliteitsbouw

Nederland kan met zijn uitstekende gasinfrastructuur, eigen gasvoorraden en een geavanceerde verwarmingsindustrie op een efficiënte en relatief schone manier voorzien in de vraag naar ruimteverwarming in de gebouwde omgeving. Dat geldt ook voor de utiliteitsbouw. Hierdoor was Nederland lange tijd koploper in efficiënte verwarmingstechnologie. In de bestaande bouw zien we nu de keerzijde van deze positie: de sector loopt niet erg



Figuur 4 Ontwikkeling van de bouwvolumes in de utiliteitsbouw in de loop der jaren.

warm voor systeemveranderingen. De overgang van de bestaande stand der techniek naar duurzame warmtebronnen (met onder meer zonneboilers en warmtepompen) gaat langzaam. Het hanteren van een energieprestatienormering, zoals opgelegd door de *Energy Performance Building Directive* (EPBD, zie paragraaf 2.5) kan de overgang naar meer duurzame technologie wel enigszins versnellen. De markt zal uiteindelijk bepalen welke technologieën het meest succesvol zullen zijn.

Marktsegment utiliteit	Aantal gebouwen	Opmerking
Kantoren	60.000	81% verhuur
Onderwijs	13.700	
Ziekenhuizen	128	
Verpleging en verzorging	1.300	
Winkels	144.000	79% verhuur
Bedrijfshallen	101.000	
Overdekte zwembaden/ combizwembaden	490	36% in beheer gemeenten
Hotels/conferentieoord	2.400	
Restaurants	9.585	
Overdekte sportaccommodaties	2.160	46% in beheer gemeenten

Tabel 1 Aantal gebouwen in de Nederlandse utiliteitsbouw, zie ook hoofdstuk 4. Bron: Ecofys 2007

Nieuwbouw in de utiliteitssector

Dankzij de hoge leveringsbetrouwbaarheid, de goede beschikbaarheid op lange termijn en de fijnmazige infrastructuur is aardgas ook voor nieuwbouw een interessante energiedrager, maar dan bij voorkeur in combinatie met innovatieve technologie, zoals warmtepompen en warmtekrachtkoppeling (WKK). Als gevolg van de vereiste energieprestatie voor nieuwbouwprojecten behoren warmtepompen hier inmiddels tot de standaardopties. Afhankelijk van de locatie, het type pand en de gebruiksfuncties kunnen dat warmtepompen zijn met grondbron of met de buitenlucht als bron.

De gebouwde omgeving is een sector die aan het einde van de transitieperiode zonder economische schade volledig kan draaien op hernieuwbare energie. Door verdere verhoging van de efficiency van de huidige gastechnologie zal het energiegebruik voor verwarming geleidelijk dalen. Op de lange termijn kan de rol van

aardgas in de utiliteitsbouw geleidelijk worden overgenomen door groen gas.

2.1.2 Ontwikkeling van de utiliteitsbouw in Nederland

Kwalitatief was de utiliteitssector in het midden van de twintigste eeuw van een heel andere opbouw dan tegenwoordig, zoals onder meer te zien is in figuur 4. De zorgsector, de recreatie- en verblijfsindustrie en de kantorenbouw moesten zich nog grotendeels ontwikkelen. De jaren vijftig tot en met zeventig van de vorige eeuw gelden als de grote bouwperiode in de utiliteitssector.

2.1.3 Ontwikkeling van verwarming in de utiliteitsbouw

De vondst van aardgas in de jaren vijftig van de vorige eeuw heeft de energievoorziening in de utiliteitssector in Nederland aanzienlijk beïnvloed. Tot de komst van het aardgas was de sector aangewezen op steenkool en in mindere mate op stadsgas en stookolie. Utiliteitsgebouwen waren voornamelijk middelgrote bedrijfsgebouwen in een stedelijke omgeving, die centraal werden verwarmd. Koeling was onbekend, op een enkele uitzonderlijke situatie na.

Snel na de ontdekking van de grote gasvoorraad bij Slochteren besloot de Nederlandse regering om een complete infrastructuur aan te leggen voor aardgas. De N.V. Nederlandse Gasunie, opgericht na de gasvondst in Slochteren, was de aanjager van deze grootscheepse ontwikkelingen. In iedere straat en op elk bedrijventerrein kwam aardgas beschikbaar. In de jaren zestig zijn steenkool, stookolie en stadsgas snel uitgefaseerd, ten faveure van aardgas. De standaardverwarming in woonhuizen en bedrijfsmatig gebruikte gebouwen werd al snel een gasgestookte installatie. De meeste installaties waren gebaseerd op één grote ketel in een centraal geplaatst ketelhuis. Het rendement van die grote CV-ketels lag destijds niet boven de 60 tot 70%. Premix branders (waarbij gas en lucht voor intrede in de brander geforceerd worden gemengd) waren er nog niet.

De standaard voor gasgestookte CV-ketels was tot het eind van de jaren tachtig een staande gietijzeren ketel, met daarbij voor de warmwatervoorziening een indirect gestookte boiler of een geiser. De commerciële afdeling van Gasunie (nu GasTerra B.V.) nam eind jaren 70 samen met de Nederlandse verwarmingsindustrie het initiatief tot het ontwikkelen van een nieuwe generatie ketels.

Het resultaat was de condenserende hoogrendementsketel, die begin jaren negentig op de markt kwam. Deze HR-ketel zorgde in de jaren daarna voor ingrijpende veranderingen op de markt voor CV-toestellen. De staande ketels verdwenen als eerste uit de woningbouw. Later won de HR-wandketel ook terrein in de utiliteitsbouw, ten koste van de conventionele ketel. De grootste HR-gaswandketels hebben tegenwoordig een vermogen van tot 100 kW. Grotere vermogens zijn eenvoudig te realiseren door meerdere ketels in cascade te schakelen en ze te voorzien van moderne regelektronica.

2.1.4 Ontwikkeling van koeling in de utiliteitsbouw

Comfortkoeling was tot en met de jaren tachtig in Nederland iets uitzonderlijks. Afgezien van enkele grote utiliteitsgebouwen die door middel van koeltorens of droge koelers werden gekoeld, was comfortkoeling in de utiliteitsbouw geen reële optie.

De ontwikkeling van de mechanische compressietechnologie in Amerika en Japan heeft de basis gelegd voor de huidige wereldwijde airconditioningindustrie. In de loop van de jaren negentig was de technologie redelijk volwassen en brachten de Amerikaanse en Japanse leveranciers hun toestellen wereldwijd op de markt. Door de ontwikkeling van de welvaart ontstond met name in Zuid-Europese landen een markt voor comfortkoeling. De laatste jaren neemt ook in Noordwest-Europa (en ook in Nederland) de vraag naar klimaatsystemen voor de utiliteitsbouw snel toe.

In de jaren negentig waren het vooral koudwatersystemen die in middelgrote en grote utiliteitgebouwen voor koeling zorgden. In het koude jaargetijde leverde dan een gewone ketelinstallatie de gevraagde warmte. Onder invloed van het aanbod uit vooral Japan begonnen echter de directe-expansiesystemen snel aan marktaandeel te winnen, nog steeds met een CV-ketel voor het invullen van de warmtevraag.

Opmerkelijk is dat de verwarmingsinstallateur hier lange tijd niet bij betrokken was. Het waren namelijk vooral koeltechnici die op grond van hun ervaring met technische koelinstallaties ook comfortkoeling leverden. De markten voor comfortkoeling en verwarming zijn in Nederland lange tijd twee gescheiden markten geweest. Daar begint nu verandering in te komen. Sinds een paar jaar voert de airconditioningindustrie apparatuur voor



Figuur 5 Voorbeeld van een staande HR-ketel.
Bron: Anita Pantius



Figuur 6 Drie HR-wandketels in een cascadeopstelling.
Bron: Anita Pantius

comfortkoeling meestal uit als warmtepomp. Daardoor krijgen de installaties in principe een dubbele functie: ze kunnen koelen en verwarmen. Ook laten ze zich op een meer complementaire manier combineren met CV-ketels en de bijbehorende afgiftesystemen.

Intussen doet de utiliteitssector in Nederland nu de eerste ervaringen op met grote en kleine gasgestookte absorptie-warmtepompen. Gasmotorwarmtepompen zijn anno 2010 nog grotendeels onbekend in Nederland, in tegenstelling tot onder meer Japan en Italië, waar deze apparaten al op grote schaal worden toegepast.

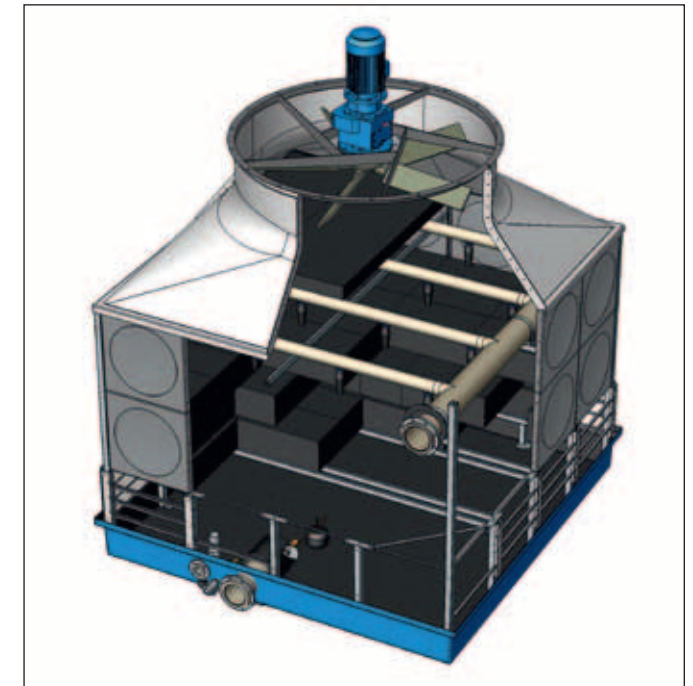
2.2 Werking van de warmtepomp

Voor een goed begrip van het vervolg van dit hoofdstuk beschrijft deze paragraaf in het kort de werking van gaswarmtepompen en de belangrijkste technische aspecten. De hoofdstukken 3, 4 en 5 bevatten een uitgebreide en meer gedetailleerde uiteenzetting van de techniek.

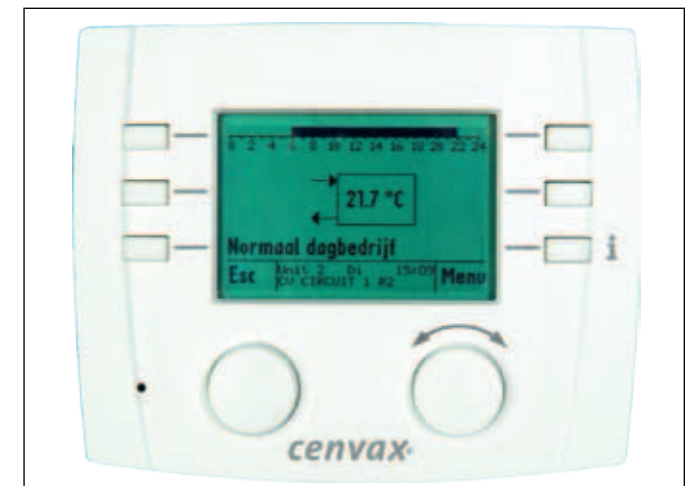
2.2.1 Werkingsprincipe

Een warmtepomp werkt in principe als een koelkast. Het is een machine die warmte verplaatst van de ene naar de andere ruimte en van een onbruikbaar naar een bruikbaar temperatuurniveau. De compressor in een koelkast voert warmte uit de geïsoleerde kast naar buiten. Een warmtepomp transporteert met behulp van een compressor warmte van buiten naar binnen. Binnen de geïsoleerde schil van het gebouw wordt de warmte dan op het gewenste temperatuurniveau afgegeven.

De warmtepomp leidt de warmte die aan de omgeving wordt onttrokken langs een vloeistof die bij lage temperatuur verdampt. Bij het verdampen neemt de vloeistof warmte op. De warmtepomp comprimeert vervolgens de damp, waardoor de temperatuur en de druk toenemen. De vloeistof wordt daarna langs een condensor gevoerd, waar hij weer condenseert en de eerder opgenomen warmte afgeeft. Aan de condensor is meestal een afgiftesysteem gekoppeld (bijvoorbeeld met radiatoren) dat de warmte verder in het gebouw distribueert.



Figuur 7 Voorbeeld van een koeltoren voor toepassing in de utiliteitsbouw. Bron: GEA Polacel



Figuur 8 Bedieningspaneel van een standaard universele cascade-regeling. Bron: Itho

De beschikbare varianten van gaswarmtepompen en elektrische warmtepompen zijn weergegeven in figuur 12. In de aanduiding van een warmtepomptype wordt steeds eerst het medium van de bron genoemd en daarna het medium van het afgiftesysteem.

2.2.2 Gasmotorwarmtepompen

Warmtepompen voor de utiliteitsbouw waren aanvankelijk uitgerust met een bodembron en een afgiftesysteem met water. Ze waren relatief kostbaar en vertoonden regelmatig kinderziektes. De directe-expansiewarmtepomp zorgde voor een doorbraak. Dit toestel, met een luchtbron en warmteafgifte naar lucht (de zogeheten lucht/luchtwarmtepomp), is in korte tijd snel populair geworden. De lucht/luchtwarmtepomp onttrekt warmte aan de buitenlucht. Deze warmte wordt binnen afgestaan in een binnenunit (de zogeheten directe-expansie-unit of DX-unit) met een warmtewisselaar, een ventilator en een regeling. Lucht/lucht systemen worden meestal gekozen met het oog op hun functie als airconditioning, maar ze kunnen met behulp van een omkeerklep ook als verwarming dienen. De investeringskosten zijn relatief laag.

Aanvankelijk werden lucht/luchtwarmtepompen alleen in kleinere installaties toegepast en waren ze elektrisch aangedreven. Toen de capaciteiten groter werden en de zogeheten VRF-systemen beschikbaar werden, kwamen ze ook op de markt met gasmotor-aandrijving. VRF staat voor *Variable Refrigerant Flow*, wat aangeeft dat de hoeveelheid koudemiddel binnen het systeem (en daarmee de capaciteit) kan variëren. Een VRF-systeem bestaat uit één of meerdere buitenunits en meerdere binnenunits. De binnenunits zijn voorzien van een elektronisch expansieventiel,

waardoor het afgegeven vermogen van elke unit apart regelbaar is. VRF-systemen kunnen verwarmen én koelen; ze combineren hoog comfort met een relatief laag energieverbruik.

Een lucht/luchtwarmtepomp haalt op papier niet het thermisch rendement dat mogelijk is met een water/water- of een bodem/waterwarmtepomp. In de praktijk is het rendementsverschil vaak klein en is de lucht/luchtvariant doorgaans beduidend goedkoper dan de andere varianten. Daarnaast is er in de bestaande utiliteitsbouw soms te weinig ruimte voor de aanleg van een bodembron. Gasgedreven lucht/luchtwarmtepompen zijn vaak gebaseerd op standaard VRF-systemen van Japanse makelij, waarvoor een enorme verscheidenheid aan binnendelen leverbaar is. Deze systemen bieden daarom veel ontwerpvrijheid. Daarnaast kunnen lucht/luchtwarmtepompen als zogeheten drie-pijpsysteem worden uitgevoerd, waardoor ze binnen één gebouw tegelijkertijd kunnen koelen én verwarmen. Bij panden met een uitgesproken noord-zuidoriëntatie kan dit een efficiënte oplossing zijn.

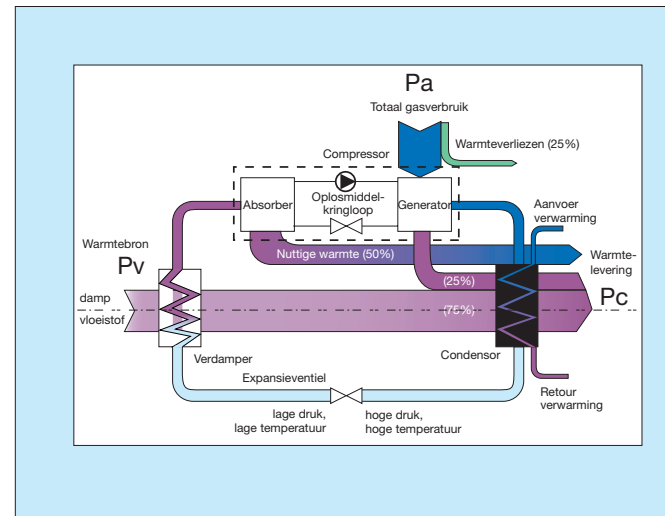
Lucht/water

Een variant op de lucht/luchtwarmtepomp is de lucht/waterwarmtepomp. Zo'n systeem ontstaat wanneer een gasmotorgedreven VRF-systeem wordt gekoppeld aan een hydromodule of wanneer de warmtepomp een watergekoelde condensor heeft.

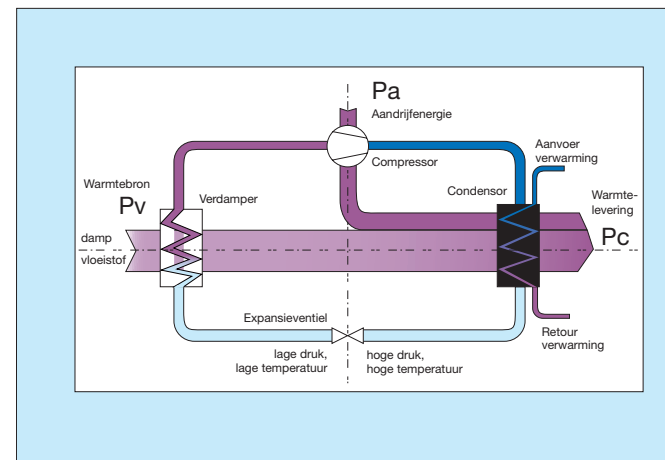
De hydromodule draagt de warmte aan de afgiftekant over op een watervoerend systeem. Zo ontstaat een warmtepompinstallatie met lucht als bron en een watervoerend afgiftesysteem dat zowel kan koelen als verwarmen. Sommige uitvoeringen kunnen tegelijk een hydromodule en een aantal DX-binnenunits van energie voorzien. Zo'n installatie kan bijvoorbeeld een gecombineerd systeem van betonkernactivering en luchtbehandeling (voor de fijnregeling per vertrek) voorzien van warmte of koude. De verhouding tussen koelen en verwarmen is in deze configuratie (figuur 13) volledig variabel.

Water/water

Gasmotorwarmtepompen in water/wateruitvoering zijn een recente ontwikkeling. De verwachting is dat met deze configuratie hoge rendementen haalbaar zijn. In het meest optimale geval, als alle energiestromen op zowel hoge als lage temperaturen benut kunnen worden, is een rendement van meer dan 200% haalbaar.



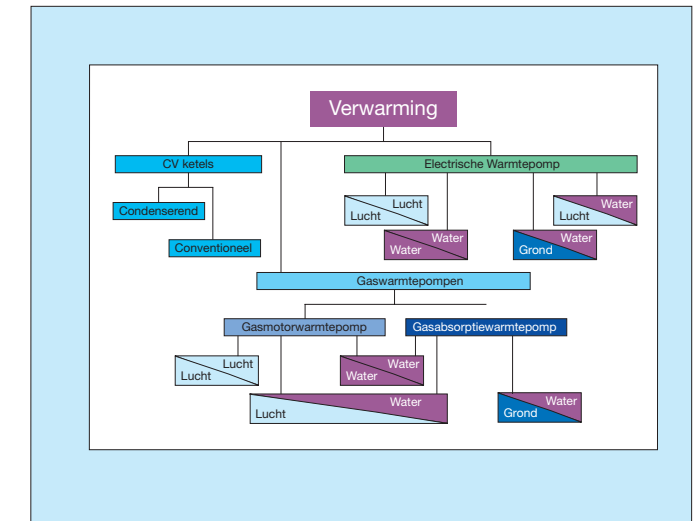
Figuur 9 Schematische werking van een gasabsorptiewarmtepomp. Bron: TNO



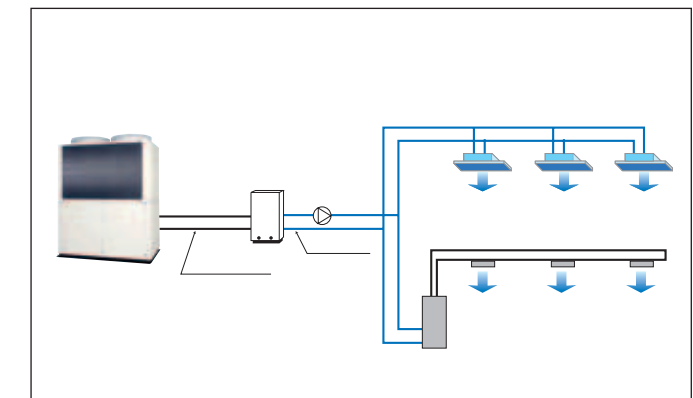
Figuur 10 Schematische werking van een gasmotorwarmtepomp. Bron: TNO



Figuur 11 Project met Sanyo gasmotorwarmtepompen in Raalte. Bron: ICE



Figuur 12 Overzicht van energieomzetters voor gebouwverwarming. Bron: BDH



Figuur 13 Lucht/lucht gasmotorwarmtepomp met hydromodule en een aantal DX-binnenunits.



Figuur 14 Gasmotorwarmtepompen op het dak van bioscoop CineMagnus in Schagen (paragraaf 7.1). Bron: ICE



Figuur 16 Hydromodule voor toepassing bij een gasmotorwarmtepomp. Bron: Gasengineering



Figuur 15 Gasmotorwarmtepompen bij het Natuurcentrum Ameland (paragraaf 7.8). Bron: BDH



Figuur 17 Buitenunit van een gasmotorwarmtepomp. Bron: ICE

2.2.3 Gasabsorptiewarmtepompen

Gasabsorptiewarmtepompen zijn er zowel in lucht/water- als water/wateruitvoering. Kenmerkend voor de lucht/wateruitvoering zijn de eenvoudige installatie, het relatief lage gewicht en de geringe onderhoudsbehoefte. Vooral voor duurzaam en efficiënt verwarmen zijn gasabsorptiewarmtepompen zeer geschikt; daarbij bieden ze de mogelijkheid om de koelfunctie te gebruiken. Als de koelfunctie voor het betreffende pand dominant is, verdient een gasmotorwarmtepomp de voorkeur omdat die in koelbedrijf een hoger rendement heeft.

Water/water

Gasabsorptiewarmtepompen zijn in water/wateruitvoering toepasbaar in zeer verschillende configuraties. In principe is bij het gebruik van een bodembron en een watervoerend afgiftesysteem warmte- en koudeopslag (WKO) toepasbaar. De bodembron kan daarbij gemiddeld zo'n 40% kleiner (en dus goedkoper) zijn dan bij een elektrische warmtepomp.

De gasabsorptiewarmtepomp in water/wateruitvoering is ook geschikt voor situaties waarin gedurende langere tijd zowel verwarming als koeling gevraagd wordt. De warmte die nodig is voor verwarming wordt dan weggepompt op de plaats waar gekoeld wordt. De verhouding tussen de verwarmings- en koelcapaciteit is ongeveer 2:1. Een situatie van langdurig gelijktijdig koelen en verwarmen komt bijvoorbeeld in zwembaden voor. Ook andere efficiënte combinaties zijn realiseerbaar. Zo kan bijvoorbeeld warmte die weggekoeld wordt in een industrieel proces in het winterseizoen gebruikt worden voor ruimteverwarming.

2.2.4 Betrouwbaarheid

In Japan zijn ongeveer 650.000 gasmotorwarmtepompen geïnstalleerd in de utiliteitsbouw. Gasabsorptiewarmtepompen zijn in Europa zo'n 45.000 keer toegepast. Deze cijfers geven aan dat de betrouwbaarheid van de techniek inmiddels bewezen is. In Nederland is bovendien een zeer stabiel en betrouwbaar gasnetwerk beschikbaar, met een zeer constante voordruk en een constante gaskwaliteit. Voor het optimaal en betrouwbaar functioneren van ieder willekeurig energiesysteem in de utiliteitsbouw is de keuze van het juiste afgiftesysteem (of een juiste afstemming op bestaande afgiftesystemen) van groot belang. Dit is bij gaswarmtepompen niet anders.



Figuur 18 Voorbeeld van een absorptiewarmtepomp. Bron: BDH



Figuur 19 Gasabsorptiewarmtepomp in lucht/wateruitvoering.



Figuur 20 Water/watergasabsorptiewarmtepomp.

2.3 Milieu-effecten van gaswarmtepompen

Een warmtepomp onttrekt warmte aan de omgeving: bodem, lucht, water of afvalwarmte. Het apparaat brengt deze duurzame warmte naar een bruikbaar temperatuurniveau. Hiervoor is extra energie nodig; dit kan elektriciteit zijn of aardgas.

Elektrische warmtepompen zijn in de meerderheid, maar juist in Nederland is de keuze voor een elektrisch apparaat niet altijd logisch. Nederland heeft immers het meest fijnmazige gasnetwerk van Europa en de capaciteit van het bestaande gasnet is vrijwel nooit een beperking. Zelfs bij grote vermogens kunnen gaswarmtepompen altijd op het bestaande gasnet worden aangesloten. Voor elektrische warmtepompen is in veel gevallen een kostbare verzwaring van het elektriciteitsnet of van de aansluiting nodig.

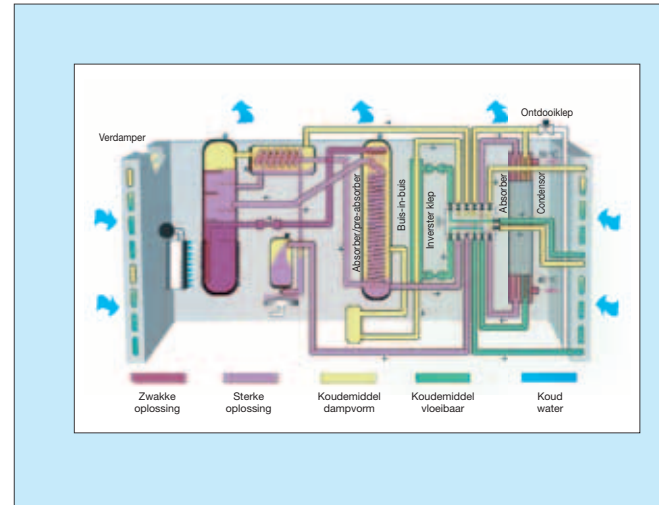
Een ander belangrijk voordeel van gaswarmtepompen is de besparing op primaire energie. Naast CO₂-emissiereductie bieden gaswarmtepompen ook nog een aanzienlijke reductie van de uitstoot van fijnstof en NO_x. Vergeleken met de gemiddelde fijnstofemissie van de centrale opwekking in Nederland is de emissie van aardgasinstallaties zeer laag. Dit geldt ook voor gaswarmtepompen.

NO_x-emissies zijn voor gasabsorptiewarmtepompen geen thema. Gasmotorwarmtepompen kennen wel NO_x-emissies. Deze blijven ruimschoots binnen de emissie-eisen. Fabrikanten proberen de emissies bovendien steeds verder te reduceren.

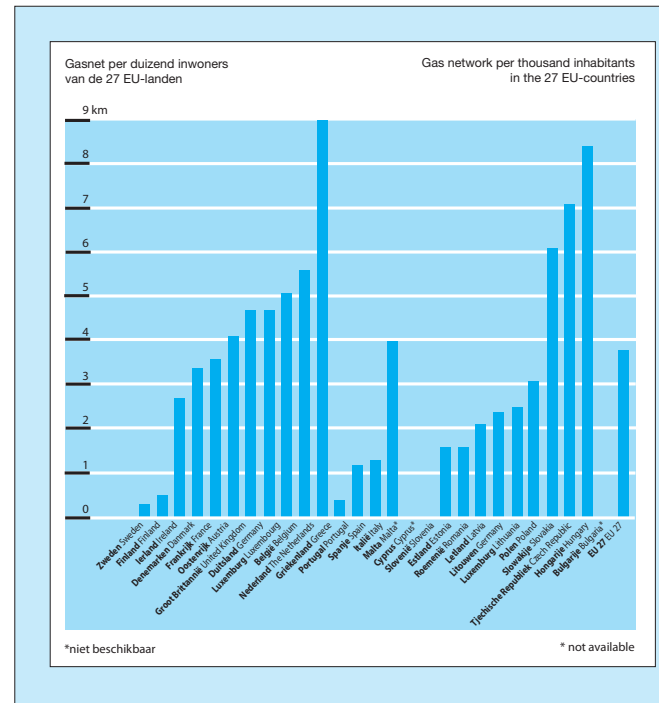
De gaswarmtepomp versus de elektrische warmtepomp

Elektriciteit is in Nederland afkomstig uit diverse energiebronnen. Nederlandse centrales gebruiken steenkool of aardgas, waarbij geldt dat een kolencentrale beduidend meer CO₂ per kWh uitstoot dan een gascentrale. Een aanzienlijk deel van het totale elektriciteitsverbruik (in 2007: 19%) wordt geïmporteerd uit het buitenland, met name uit Duitsland en Frankrijk. De Duitse import wordt grotendeels geproduceerd uit bruinkool en de Franse import is voornamelijk nucleair opgewekt.

Daarnaast is er in Nederland ook nog duurzame opwekking door middel van zonne- en windenergie, waterkracht, bijsmaak van biomassa (in kolencentrales) en vergassing en vergisting van biomassa. Het centrale opwekkingsrendement, inclusief de transportverliezen, bedraagt in Nederland 42% op onder-



Figuur 21 Werkingsschema absorptiewarmtepomp (zie hoofdstuk 3).
Bron: Techneco



Figuur 22 Nederland heeft het meest fijnmazige gasnetwerk van heel Europa. Bron: EnergieNed

waarde. Dat levert een gemiddelde CO₂-emissie op van 0,574 kg/kWh, wat relatief hoog is als gevolg van het grote aandeel van kolenstook in Nederland.

In de paragrafen 3.1 en 4.1 worden de rendementsbegrippen *Coefficient of Performance (COP)* en *Primary Energy Ratio (PER)* nader toegelicht. Kort samengevat geeft de COP van een elektrische warmtepomp vermenigvuldigd met het centrale opwekkingsrendement de efficiency weer op basis van primaire energie (PER).

Een elektrische warmtepomp met een COP van 3,5 geeft bij het gegeven centrale opwekkingsrendement van 0,42% dus een PER van $3,5 \times 0,42 = 1,47$.

De PER van goed geïnstalleerde gaswarmtepompen ligt op een vergelijkbaar niveau en soms zelfs beduidend hoger.

Het centrale opwekkingsrendement in Nederland zal de komende jaren geleidelijk stijgen. Dankzij ontwikkeling van de technologie zal echter ook het rendement van gaswarmtepompen in ongeveer dezelfde mate toenemen. De verwachting is dan ook dat de gaswarmtepomp zijn emissievoordeel ten opzichte van de elektrische warmtepomp (zie kader) zal behouden.

De gaswarmtepomp versus de HR-ketel

Gaswarmtepompen hebben een hoger rendement dan de huidige standaard voor verwarming, de HR-ketel. In Nederland geldt HR-107 als de referentie voor verwarming. De PER van een HR-ketel met een rendement van 107% op onderwaarde kan gesteld worden op 1,0. Wanneer een gaswarmtepomp een PER haalt van 1,4 of hoger, is er dus sprake van een aanzienlijke besparing op primaire energie.

2.4 Het potentieel voor gaswarmtepompen

De utiliteitsbouw omvat kantoorgebouwen, ziekenhuizen, verzorgings- en verpleegtehuizen en bedrijfspanden. In deze sectoren is door de aangescherpte bouwregelgeving en verbetering van de bouwkwaliteit verwarming veelal ondergeschikt geworden aan koelen.

Gaswarmtepompen zijn interessant in zowel nieuwbouw als de bestaande bouw. Jarenlang was de HR-gasketel de standaard

Rekenvoorbeeld: de CO₂-emissies van warmtepompen

De energiebesparing en emissiereductie van een gaswarmtepomp ten opzichte van een elektrische versie kan als volgt worden benaderd:

Elektrische warmtepomp

1 MW thermisch vermogen vraagt om een elektrische warmtepomp (COP 3,5) met een geïnstalleerd vermogen van 0,286 MW elektrisch.

Uitgaande van 1.300 vollasturen per jaar vraagt 1 MW thermisch vermogen om $1300 \times 0,286 = 372$ MWh elektrische energie. Dit komt overeen met 213 ton CO₂.

Gaswarmtepomp

1 MW thermisch vermogen vraagt om een gaswarmtepomp (PER 1,4) met een geïnstalleerd gasvermogen van 0,714 MW.

Uitgaande van 1.300 vollasturen per jaar geeft 1 MW thermisch een gasverbruik van $1300 \times 0,714 = 928$ MWh. Dit komt overeen met 95.028 m³ aardgas en met 169 ton CO₂.

CO₂-reductie

De gaswarmtepomp levert een CO₂-reductie van $(213 - 169) / 213 = 21\%$



Figuur 23 Zwembad verwarmd met een gaswarmtepomp (paragraaf 7.6). Bron: Techneco

voor verwarming in Nederland, maar deze technologie is nu grotendeels uitontwikkeld. Warmtepomptechnologie maakt het mogelijke nieuwe stappen te zetten in efficiencyverbetering.

In de graaddagenmethode (figuur 25) zijn de graaddagen verdeeld naar daggemiddelde buitentemperatuur. Duidelijk is te zien dat gedurende het overgrote deel van het jaar de daggemiddelde temperatuur op of boven 2 °C ligt. Boven deze daggemiddelde temperatuur zijn warmtepompen goed inzetbaar.

2.4.1 Nieuwbouw

In nieuwbouwsituaties zijn veel mogelijkheden voor gaswarmtepompen, zonder de kans op *technology lock-in*. Dit betekent dat een gaswarmtepomp toekomstige duurzame energie-opties niet onmogelijk of onaantrekkelijk maakt.

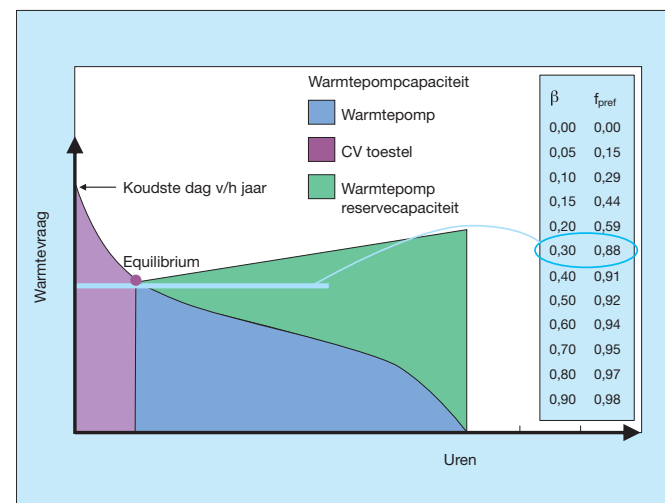
Nieuwe utiliteitsgebouwen zullen in de nabije toekomst vooral kleinere kantoren zijn, of gebouwen voor de zorgsector en de recreatie- en verblijfsindustrie. De bouw van grotere kantoren (5.000 m² en groter) heeft een periode van grote groei achter de rug; hier valt de komende jaren geen opleving te verwachten. De bouw van kleinere kantoren (tot 5.000 m²) hangt veel meer samen met de ontwikkelingen in het midden- en kleinbedrijf en

geeft een vrij stabiele ontwikkeling te zien. Ook hier is overigens sprake van overaanbod (15 tot 18% volgens de branche). De regelgeving voor nieuwe gebouwen is gunstig voor duurzame energieoplossingen. Elektrische warmtepompen (vaak met bodembron) hebben daardoor al een aanzienlijke penetratiegraad. Gaswarmtepompen zijn zonder voorbehoud toepasbaar in nieuwbouwprojecten. De beste kansen liggen in de nieuwbouw bij een maximum installatiegrootte van circa 800 tot 1.000 kW verwarmingscapaciteit en 700 tot 900 kW koelcapaciteit.

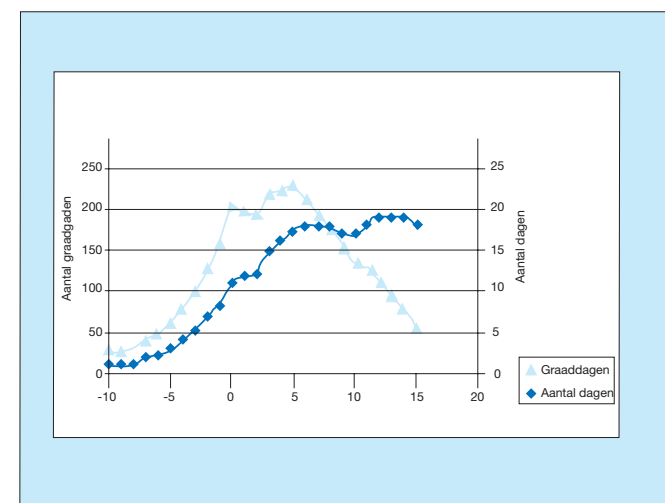
Potentieel

Exacte cijfers over nieuwbouwprojecten zijn niet eenvoudig te verkrijgen. Duidelijk is wel dan de huidige leegstand het nieuwbouwwolume de komende jaren negatief beïnvloedt. De nieuwbouwwaarde voor kantoren, bedrijfsruimtes en retailgebouwen zal zich volgens de branche de komende jaren stabiliseren op de helft van het niveau in de topjaren 2006 - 2009 of iets daarboven.

De nieuwbouw van kantoren zal naar verwachting medio 2011 uitkomen op zo'n 450.000 m² per jaar. Door het beperkte aantal grote kantoorprojecten zal dit hoogstwaarschijnlijk ook enige tijd zo blijven. Projecten voor de retail zijn in 2011 goed voor iets minder dan 400.000 m². De totale markt voor bedrijfsruimtes (inclusief kantoren en retail) wordt dan geschat op 2,5 miljoen m².



Figuur 24 Belasting/duurkromme van een gebouw met een bivalente installatie (warmtepomp en CV-ketel). Bron: TNO



Figuur 25 Graaddagen in Nederland. Bron: BDH

De geschatte verwarmingscapaciteit voor nieuwbouwkantoren (20 W/m²) komt bij een volume van 450.000 m² uit op circa 9 MW. Voor koeling (10 W/m²) is ongeveer 4,5 MW koelcapaciteit nodig. In de retailsector is koeling leidend onder meer door de warmtelast van verlichting.

De indicaties voor nieuwbouwziekenhuizen zijn moeilijk te geven. De besluitvorming rond nieuwbouw van grote complexen heeft grote invloed op de uitvoering in de tijd. Ziekenhuizen lenen zich op afdelingsniveau uitstekend voor toepassing van gaswarmtepompen; grotere afdelingen en centrale ruimtes worden meestal door middel van luchtbehandeling verwarmd of gekoeld.

Door hun bouwwijze en volume lenen verzorgingstehuizen zich uitstekend voor installaties op basis van gaswarmtepompen. De verwachting is dat de markt voor nieuwbouw van verzorgings- en verpleegtehuizen relatief stabiel zal blijven. Gelet op de technische levensduur voor gebouwen van veertig jaar is alleen al voor vervanging van verouderde panden jaarlijks een nieuwbouwwolume van 150 tot 170 projecten van gemiddeld 7.500 tot 10.000 m² per project te verwachten. Koeling zal in deze nieuwbouw een belangrijke rol gaan spelen.

2.4.2 Bestaande bouw

Het areaal aan bestaande utiliteitsgebouwen in Nederland is een veelvoud van het jaarlijkse nieuwbouwwolume. De sector bestaat uit 45.000 tot 55.000 gebouwen met een totaal bruto vloeroppervlakte (BVO) van circa 40 miljoen m², een gasverbruik van ongeveer 560 miljoen m³/jaar en een elektriciteitsverbruik van circa 4,6 miljoen MWh/jaar. In totaal is het primaire energiegebruik van de sector 1,8 miljard m³ aardgasequivalent per jaar. Het gebruik van primaire energie voor verwarming bedraagt 201 PJ (CBS 2008). Naar schatting is in 20 tot 25% van de bestaande installaties een gasgedreven warmtepomp een goede en haalbare optie. Dit betekent dat zo'n 65 PJ aan warmtevraag ingevuld zou kunnen worden met gaswarmtepompen. Toepassing van gaswarmtepompen leidt tot een aanzienlijke energiebesparing en ontlast het elektriciteitsnetwerk. Bovendien is er geen sprake van *technology lock-in*. De conclusie is dan ook dat er in de utiliteitssector in Nederland enorme mogelijkheden zijn voor de toepassing van gaswarmtepompen.

Efficiencyverbetering in de basislast

TNO Bouw en Ondergrond heeft op basis van de Nederlandse belasting/duurkromme berekend dat een bivalente installatie met een gaswarmtepomp en een CV-ketel in veel situaties optimaal is. De relatief dure gaswarmtepomp wordt gedimensioneerd op circa 30% van de maximale verwarmingscapaciteit in kW. Met deze 30% kan de installatie 88% (de zogeheten β -factor) van de jaarlijkse verwarmingsvraag invullen.

De resterende 12% van de (piek)vraag wordt in deze situatie met een HR 107 gastoestel ingevuld. Dit toestel kan eventueel ook de bereiding van warm tapwater verzorgen.

Deze combinatie is toepasbaar in nieuwe en bestaande installaties. In bestaande installaties zijn met bivalente opstellingen al besparingen van tientallen procenten gerealiseerd.

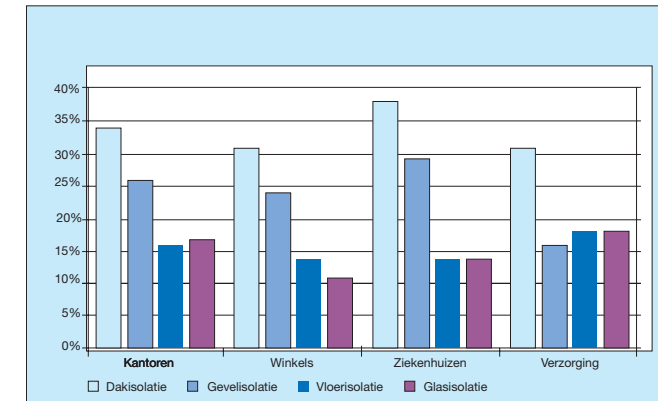
In de bestaande bouw moeten gaswarmtepompen als energiebesparende maatregel concurreren met andere besparings-opties, of zijn ze een alternatief voor bestaande technologieën voor de opwekking van warmte of koude. In de figuren 27 tot en met 31 zijn de penetratiegraden van diverse isolatiemaatregelen en opwekkingssystemen weergegeven voor de bestaande utiliteitsbouw.

Bij oudere installaties (tien tot vijftien jaar) kunnen de bestaande opwekkingssystemen in de regel beter compleet worden vervangen. Meer recente systemen (minder dan tien jaar oud) lenen zich op een enkele uitzondering na goed voor basislastoptimalisatie met behulp van gaswarmtepompen, waarbij de bestaande installatie grotendeels ongewijzigd blijft.

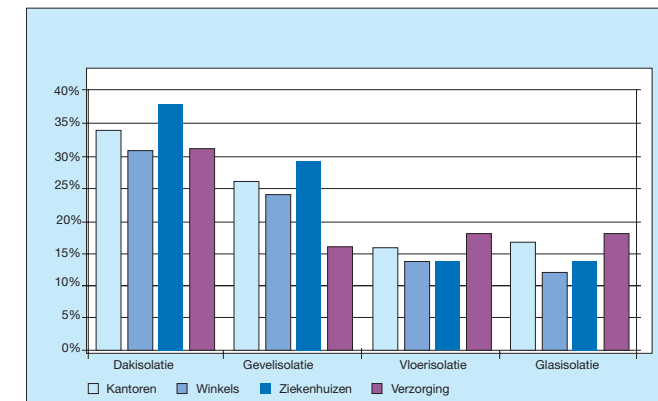
Voorwaarde voor toepassing van gaswarmtepompen in bestaande installaties is dat de afgiftetemperaturen van de warmtepomp compatibel zijn met de ontwerptemperaturen van het afgiftesysteem. Omdat het rendement van de warmtepomp ruwweg omgekeerd evenredig is met het temperatuurverschil tussen bron en afgiftezijde, moet dit temperatuurverschil niet te groot gekozen worden. Als vuistregel geldt dat een aanvoertemperatuur hoger dan 55 °C problematisch is voor warmtepomp-toepassingen.



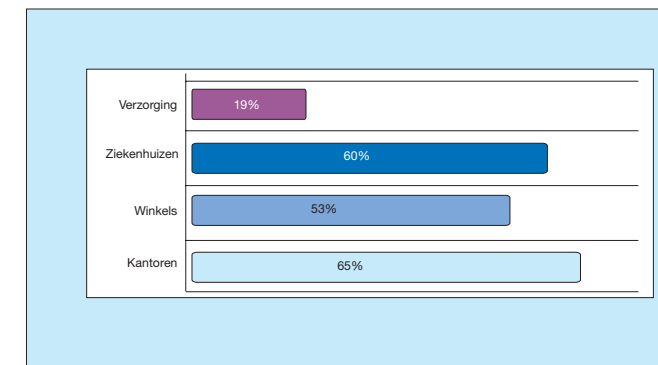
Figuur 26 Gasabsorptiewarmtepompen in bivalente opstelling met bestaande CV-ketels bij verzorgingstehuis Pelsterhof in Groningen. Bron: BDH



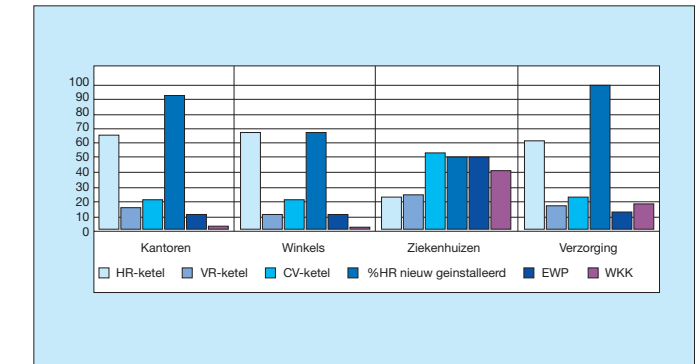
Figuur 27 Penetratiegraad energiebesparingsmaatregelen per sector.



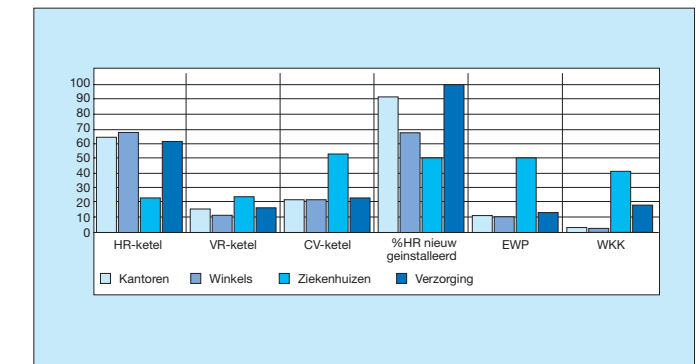
Figuur 28 Penetratiegraad energiebesparingsmaatregelen per maatregel.



Figuur 29 Percentage van de bestaande utiliteitsgebouwen voorzien van koeling.



Figuur 30 Penetratiegraad huidige opwarmingssystemen naar segment.



Figuur 31 Penetratiegraad huidige opwarmingssystemen naar technologie. Bron: Agentschap NL (figuur 27 tot en met 31)

2.4.3 Realiseerbaar potentieel

Voor het jaar 2020 geldt dat van de totale geschatte warmtevraag (180 PJ) en van de totale geschatte koudevraag (54 PJ) technisch gezien 216 PJ ingevuld kan worden met duurzame warmte- en koudetechnologie (waaronder warmtepompen). Omdat de leveranciers van duurzame systemen maar een beperkte groei aankunnen, wordt dit technische potentieel niet volledig gerealiseerd. Het maximaal realiseerbare potentieel bedraagt 110 PJ warmte en koude. Hiervan komt 38 PJ voor rekening van de bestaande bouw en 72 PJ voor rekening van nieuwbouw en groot-schalige renovatie.

Toepassingsmogelijkheden	Temperatuur in °C
Vloer- en wandverwarming	30 - 45
Luchtverwarming (ventilatie)	30 - 50
Radiatoren (vergroot VO)	45 - 55
Warm tapwater	70
Zwembadwater	30 - 45

Tabel 2 Veel voorkomende afgiftesystemen en de bijbehorende watertemperaturen. Bron: TNO

Gebouwfunctie	Vollast uren uur/jaar
Verzorgingstehuizen	1.300 - 1.900
Ziekenhuizen	1.500 - 2.000
Kantoren	900 - 1.600
Scholen	800 - 1.300
Winkels	Geen data voorhanden
Overige	1.000 - 2.000

Tabel 3 Vollasturen per jaar voor de verschillende gebouwfuncties. Bron: TNO

2.4.4 Kleine collectieve systemen

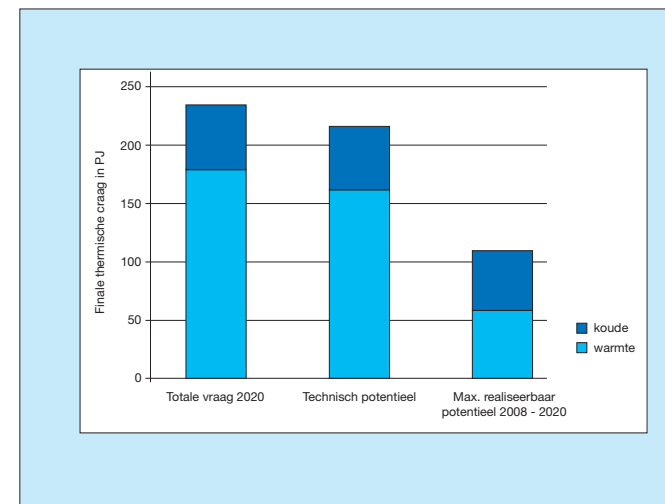
Grootschalige warmteditributenietten spelen in de meeste toekomstscenario's geen grote rol. Dat komt doordat de transportverliezen in warmtenetten aanzienlijk zijn, terwijl er hoge investeringen gemoeid zijn met de aanleg. Kleinschalige collectieve systemen op projectniveau kunnen energetisch wel interessant zijn. Deze systemen



Figuur 32 Collectieve systemen in de woningbouw. Bron: BDH

worden altijd opgezet voor een bepaald gebouwvolume en zijn onlosmakelijk met het gebouw verbonden. De omvang van de systemen is beperkt tot aaneengesloten gebouwen, waardoor transportverliezen en investeringen in infrastructuur sterk worden gereduceerd. In totaal zijn in Nederland tussen de 250.000 en 300.000 wooneenheden aangesloten op collectieve systemen. De meeste stammen uit de jaren zestig tot en met tachtig van de vorige eeuw. Dit soort collectieve systemen is bijzonder geschikt voor toepassing van gaswarmtepompen. Het is zinvol om de gebouwen in dat geval ook te isoleren, voor zover praktisch en economisch haalbaar. De warmtepomp kan in de meeste gevallen worden gecombineerd met het bestaande collectieve afgiftesysteem. Zoals eerder in dit hoofdstuk al is beschreven, kan een warmtepomp die 30% van de maximaal benodigde verwarmingscapaciteit levert ongeveer 88% van de totale verwarmingsvraag dekken. Voor de piekvraag wordt dan een relatief goedkope HR-gasketel in de installatie opgenomen.

De inzet van een warmtepomp op een collectief systeem betekent ook dat in de toekomst nieuwe opties voor duurzame energieopwekking centraal kunnen worden gerealiseerd. Ze hoeven dan niet per individuele woning te worden uitgevoerd, wat bij individueel 'verketelde' flatwoningen en appartementen tot aanzienlijk hogere kosten leidt.



Figuur 33 Realiseerbaar potentieel duurzame warmte en koude in de utiliteitssector. Bron: Ecofys

2.5 Gaswarmtepompen en regelgeving

Deze paragraaf behandelt de Europese CE-markering en het nationale gaswarmtepompkeur, voorbeelden van regelgeving waar leveranciers van gaswarmtepompen mee te maken hebben. Daarnaast komt ook kort de energieprestatienormering voor gebouwen aan de orde en de invloed van gaswarmtepompen hierop.

2.5.1 CE-markering

Alle commercieel verkrijgbare gaswarmtepompen op de Nederlandse markt zijn voorzien van een Europese CE-markering. Deze CE-markering is geen keurmerk, maar een markering die aangeeft dat een product voldoet aan de geldende Europese regels en voorschriften op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu. De CE-markering wordt aangebracht door de fabrikant. De procedures hiervoor zijn gebaseerd op het EU-besluit 93/465/EEG.

De CE-markering maakt deel uit van het pakket maatregelen dat vrij verkeer van personen, goederen en diensten binnen de Europese Unie mogelijk maakt. Daarnaast zegt de CE-markering iets over productveiligheid. Door middel van de CE-markering geeft de fabrikant of importeur aan dat hij voor het betreffende product een conformiteitsverklaring heeft opgesteld. Hij vermeldt bovendien dat het product voldoet aan alle van toepassing zijnde Europese richtlijnen. De fabrikant of importeur stelt zich daarmee aansprakelijk voor het product.

Voor een CE-markering verricht de fabrikant of importeur zelf de nodige metingen en onderzoeken, of hij besteedt dit uit aan een instituut in de betreffende branche. In een aantal gevallen is een EG-typegoedkeuring voorgeschreven en moet de fabrikant gebruikmaken van een door de overheid goedgekeurde instantie, de zogeheten *notified body*. De Nederlandse notified body voor gasvoerende apparatuur is KIWA Gastec Certification in Apeldoorn. De CE-markering van een product met een EG-typegoedkeuring is te herkennen aan vier cijfers achter het CE-teken. Deze code verwijst naar de instantie die de beoordeling heeft uitgevoerd.

2.5.2 Gaswarmtepomp keurmerk

De Nederlandse industrie voor gasvoerende verwarmingsapparatuur heeft al vroeg de waarde ingezien van een keurmerk voor gasapparaten. In de beginperiode van het aardgas in Nederland was het van belang om eenduidig te kunnen communiceren of een apparaat geschikt was voor aardgas.

Het gaskeur had aanvankelijk vooral betrekking op de veiligheid. Later werd het keurmerk steeds meer een indicatie van de prestatie (en de efficiency) van verwarmingsapparatuur. Het aspect veiligheid is tegenwoordig geen onderwerp meer, omdat alle gasapparaten aan de criteria voor de CE-markering moeten voldoen.

Om voor een gaswarmtepompkeur in aanmerking te komen moet de producent de hiervoor vereiste informatie over het toestel verschaffen. Vervolgens wordt het toestel onder genormeerde condities getest. Gasmotorwarmtepompen in lucht/luchtuitvoering (directe expansie) zijn in de praktijk moeilijk te bemeten. De procedures voor het gaswarmtepompkeur gaan daarom uit van een lucht/wateruitvoering.

Gaswarmtepompen in de woningbouw

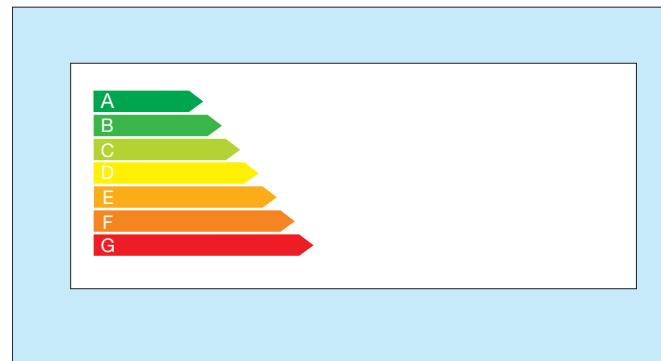
Het inzetpotentieel van gasgedreven warmtepompen in de woningbouw is groot. Ook in de bestaande bouw functioneren gaswarmtepompen uitstekend. De bestaande infrastructuur kan meestal gehandhaafd blijven. Elektrische warmtepompen hebben het nadeel dat ze soms het bestaande elektriciteitsnet overvragen of dat de eigenaar van het gebouw een zwaardere (duurdere) aansluiting moet aanvragen. Kleinere gasgedreven warmtepompen zijn een uitstekende vervanging van oudere CV-ketels, met een aanzienlijk hoger rendement dan de zuinigste HR-ketel. De vervangingsmarkt voor CV-ketels bedraagt in Nederland circa 400.000 stuks per jaar. De meeste van deze ketels kunnen in theorie vervangen worden door gaswarmtepompen met vermogens tussen 4 en 10 kW. Voorwaarde is wel dat de warmtepompen qua geluidsniveau, afmetingen en gewicht globaal vergelijkbaar zijn met de meest gangbare HR-ketels.

Momenteel zijn er geen commercieel verkrijgbare gaswarmtepompen voor de woningbouw. De verwachting is dat de komende jaren de eerste complete in serie geproduceerde toestellen op de markt komen.

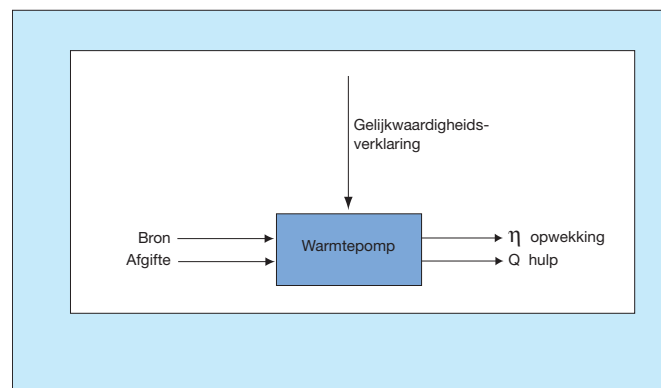
Het gaswarmtepompkeur wordt procedureel opgezet en uitgevoerd door de technische commissie van de Smart Cooling Foundation (de branchevereniging voor fabrikanten en importeurs van gaswarmtepompen) in nauwe samenwerking met TNO Bouw en Ondergrond in Apeldoorn. In het kader van het gaswarmtepompkeur worden ook installaties in het veld gemonitord, om zo een concreet beeld te krijgen van de prestaties in de dagelijkse praktijk.

2.5.3 Besluit Energieprestatie Gebouwen

De Europese Unie heeft in december 2002 de Europese *Energy Performance of Buildings Directive* aangenomen. In december 2006 is deze richtlijn in Nederland van kracht geworden als



Figuur 34 Energieprestatie label. Bron: BDH



Figuur 35 Warmtepomp voorgesteld als black box. Onder meer het type bron en de afgiftetemperatuur bepalen de EPC-factor van de warmtepomp. Bron: TNO

Besluit Energieprestatie Gebouwen (BEG). In het kader van dit besluit is het energielabel voor eigenaren en beheerders van utiliteitsgebouwen per 1 januari 2008 verplicht gesteld. Vanaf deze datum moet de eigenaar of beheerder van een gebouw de huurder of koper een energielabel overhandigen. Dit energielabel biedt de huurder of koper de mogelijkheid om de energetische kwaliteit van gebouwen met elkaar te vergelijken. Alleen gecertificeerde bedrijven kunnen een energielabel opstellen.

De energetische kwaliteit van een gebouw wordt via een gestandaardiseerde methode berekend en uitgedrukt via de energie-index. De index is gebaseerd op de hoeveelheid energie die bij normaal gebruik nodig is voor ruimteverwarming, koeling, bevochtiging, hulpenergie (voor pompen en ventilatoren), tapwaterverwarming en verlichting. De berekende energie-index bepaalt in welke energieklassie het gebouw valt. De verschillende energieklassen worden met kleuren en met de letters A tot en met G aangeduid, vergelijkbaar met de energieklassen voor huishoudelijke apparaten en auto's.

Labelverplichting bij verkoop of verhuur

Voor de volgende categorieën utiliteitsgebouwen is een energielabel verplicht bij verkoop of verhuur:

- Bijeenkomstgebouwen
- Gezondheidszorggebouwen
- Horecagebouwen
- Kantoorgebouwen
- Onderwijsgebouwen
- Sportgebouwen
- Winkels

Gebouweigenaren of vastgoedbeheerders in de utiliteitsbouw kunnen met twee verschillende verplichtingen te maken krijgen:

- Een labelverplichting bij verkoop of verhuur (dit geldt voor de meeste utiliteitsgebouwen).
- Een permanente labelplicht (dit geldt voor grote publiek-toegankelijke gebouwen voor overheidsdiensten).

Het BEG is van toepassing op elk gebouw dat vanaf 1 januari 2008 wordt verkocht of opnieuw wordt verhuurd. Het energielabel wordt bij voorkeur opgesteld in de fase dat een gebouw te koop of te huur wordt aangeboden. Het moet in ieder geval

aanwezig zijn op het moment dat er een koop- of huurtransactie plaatsvindt.

In geval van nieuwbouw vervalt het verplichte energielabel en moet de eigenaar de berekening van de energieprestatiecoëfficiënt (EPC) afgeven. Deze berekening is een onderdeel van de bouw aanvraag. Voor alle gebouwen die zijn gebouwd na 1 januari 1998 kan de eigenaar of beheerder tot tien jaar na de datum van de bouw aanvraag volstaan met een gewaarmerkte kopie van de EPC-berekening. Deze berekening mag dus niet ouder zijn dan tien jaar.

2.5.4 Gaswarmtepompen en de EPN

In de Nederlandse bouwregelgeving speelt de energieprestatienormering (EPN) van gebouwen een belangrijke rol. Nieuwe gebouwen moeten aan de criteria van de EPN voldoen. Het niveau van de EPN is continu in beweging en de methodiek wordt regelmatig aangepast aan de laatste inzichten en nationale en internationale richtlijnen. Daardoor wordt innovatie bevorderd. De markt reageert op de aangescherpte norm door systemen te ontwikkelen die bijdragen aan de energiebesparing en emissiereductie. Na verloop van tijd worden deze ontwikkelingen standaard en worden ze opgenomen in een herziening van de norm.

Berekeningsmethodiek

In de EPC wordt de energiebehoefte van een gebouw (voor onder meer verwarming, koeling, ventilatie, verlichting en warm tapwater) bepaald op basis van standaard gebruiksgedrag. Een warmtepomp wordt daarbij gezien als *black box*. Afhankelijk van onder meer het type bron en de afgiftetemperatuur zal de methodiek een rekenwaarde voor het jaargemiddelde gebruiksrendement geven. Aan de hand van deze rekenwaarde worden het primaire energiegebruik en de CO₂-uitstoot berekend.

Forfaitaire waarden

Voor de energetische prestatie van verschillende installatieonderdelen worden in de EPN-methodiek forfaitaire waarden gegeven. Deze waarden zijn representatief voor energetisch slecht presterende installatieonderdelen. In een aantal gevallen zijn forfaitaire waarden gekoppeld aan bestaande labels (bijvoorbeeld het Gaskeur-label voor CV-ketels). Deze labels worden afgegeven aan apparaten waarvan volgens een genormeerde meting de energie-

prestatie beter is dan de forfaitaire waarde aangeeft. Dit heet een kwaliteitsverklaring.

Zolang er geen kwaliteitsverklaringen zijn voor gaswarmtepompen, zullen de bestaande forfaitaire waarden worden aangehouden (tabel 4). De gekozen waarden zijn gelijk voor gasmotorwarmtepompen en gasabsorptiewarmtepompen. Er is onderscheid gemaakt tussen de verschillende bronnen en verschillende ontwerptemperaturen van het afgiftesysteem.

	Gasmotorwarmtepomp			Gasabsorptiewarmtepomp		
	<35 °C	35-45 °C	45-55 °C	<35 °C	35-45 °C	45-55 °C
Ontwerptemperatuur afgifte						
Bron						
Bodem	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,2
Grondwater	1,35	1,25	1,15	1,35	1,25	1,15
Buitenlucht	1,3	1,2	1,1	1,3	1,2	1,1

Tabel 4 Forfaitaire waarden in de energieprestatienormering voor het jaargemiddelde opwekkingsrendement van gasgedreven warmtepompen. Bron: TNO

De forfaitaire waarden uit de tabel worden gehanteerd als factor in de EPC-berekening. Uit de tabel blijkt dat de EPC van een gebouw structureel kan worden verlaagd door toepassing van een gaswarmtepomp. Dit blijkt ook in de praktijk. Afhankelijk van de toepassing kan het energieverbruik naar verwachting met zo'n twintig procent dalen. ■

Hoofdstuk 3

Technologie van warmtepompen

In dit hoofdstuk passeren de verschillende typen gaswarmtepompen de revue. Enkele hiervan zijn al op de markt en winnen snel aan bekendheid, andere zijn minder bekend en vormen een belofte voor de (nabije) toekomst. Naast de diversiteit in typen gaat dit hoofdstuk in op de verschillen in rendementen, temperatuurniveaus en toepassingsgebieden. Daaruit blijkt dat gaswarmtepompen veelzijdig inzetbaar zijn.

3.1 Warmtepompen en rendementen

Bij de verbranding van aardgas komt warmte vrij. Wanneer deze warmte vrijkomt op hoge temperatuur kan ze voor een deel worden omgezet in arbeid (bijvoorbeeld het draaien van de as van een gasmotor) en voor een ander deel in laagtemperatuur warmte. Beide energievormen kunnen voorkomen in een warmtepomp-cyclus. In een warmtepomp wordt warmte van een laag temperatuurniveau naar een hoog temperatuurniveau gebracht. Dit gebeurt bijvoorbeeld in een gebouw waar omgevingswarmte wordt opgewaardeerd naar ruimtetemperatuur, om de ruimte te verwarmen. Een ander praktijkvoorbeeld is een koelkast waaraan op een lage temperatuur warmte wordt onttrokken om de inhoud koel te houden, waarna deze warmte wordt afgegeven aan de omgeving. De verplaatsing van warmte is tegen de natuurlijke richting in, wat alleen mogelijk is wanneer er energie in de vorm van arbeid

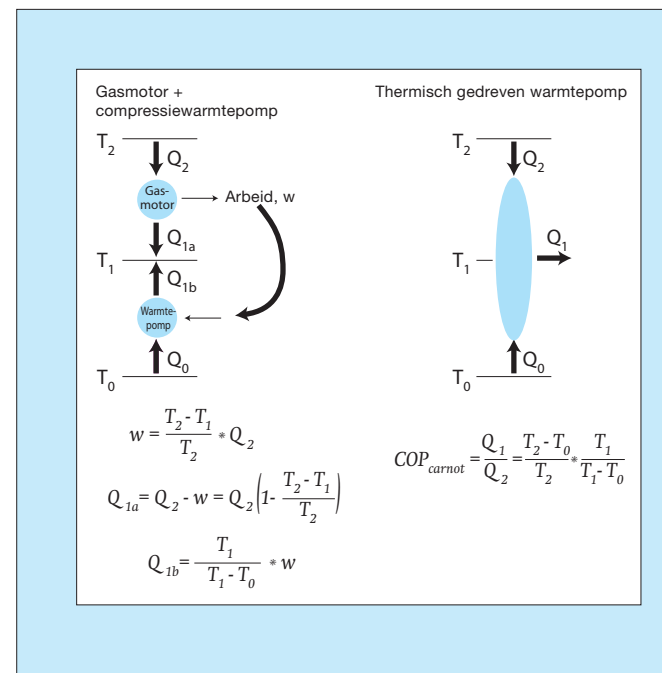
of warmte aan wordt toegevoegd. De technische beschrijvingen in dit hoofdstuk zijn op basis van deze twee principes (arbeidgedreven versus warmtegedreven) ingedeeld.

Figuur 1 op de volgende pagina toont het verschil tussen deze twee basisprincipes. In de arbeidgedreven warmtepomp (links) wordt het temperatuurverschil tussen T_1 en T_2 gebruikt om arbeid (w) te genereren, deze wordt vervolgens ingezet om warmte van T_0 naar T_1 te verplaatsen. In de warmtegedreven warmtepomp (rechts) wordt de warmte (Q_2) van T_2 naar T_1 verplaatst om tegelijkertijd warmte (Q_0) van T_0 naar T_1 te verplaatsen. Deze warmte ($Q_0 + Q_2$) komt vervolgens vrij op temperatuurniveau T_1 .

Coefficient of Performance

De *Coefficient of Performance* (COP) voor verwarming is een veel gebruikte grootheid om de efficiency van een warmtepomp in uit te drukken. Voor een arbeidgedreven warmtepomp is de COP doorgaans gedefinieerd als de verhouding tussen de verplaatste warmte en de toegevoerde arbeid (in figuur 1: Q_1/w). Voor een warmtegedreven warmtepomp is de COP de verhouding tussen de verplaatste warmte en de toegevoerde warmte (in figuur 1: Q_1/Q_2).

Door dit verschil in definitie is het niet mogelijk de COP van een arbeidgedreven warmtepomp direct te vergelijken met de COP van een warmtegedreven warmtepomp. Ter illustratie: een (arbeidgedreven) warmtepomp heeft een COP voor verwarming van ongeveer 4, terwijl een absorptiewarmtepomp voor verwarming een COP van ongeveer 1,5 heeft.



Figuur 1 Schematische weergave van de energiestromen bij arbeidgedreven (links) en warmtegedreven (rechts) warmtepompen. Bron: ECN

Carnotrendement

De efficiency van een warmtepomp kan ook worden uitgedrukt als fractie van het zogeheten Carnotrendement. De Carnotcyclus is de theoretisch meest efficiënte wijze om warmte om te zetten in arbeid en vice versa. De efficiency van een warmtepomp kan nu worden uitgedrukt in de verhouding tussen het op de Carnotcyclus gebaseerde energiegebruik en het werkelijke energiegebruik van de warmtepomp. Deze verhouding kan zowel voor een arbeidgedreven als voor een warmtegedreven warmtepomp worden berekend. Carnotrendementen zijn ook onderling vergelijkbaar.

Primary Energy Ratio

Een andere methode om de prestaties van de twee typen warmtepompen te kunnen vergelijken is de rendementen terug te rekenen naar het primaire energiegebruik. Dit wordt uitgedrukt in de *Primary Energy Ratio* (PER). Voor een elektrische arbeidgedreven warmtepomp moet de COP met het opwekkingsrendement van elektriciteit (ongeveer 42% op onderwaarde; dit komt overeen met de 39% op bovenwaarde die in de EPN wordt genoemd) worden vermenigvuldigd. Voor het berekenen van het primaire energiegebruik van een gasmotorgedreven warmtepomp moet de COP worden vermenigvuldigd met het omzettingsrendement van de gasmotor (circa 30 tot 45%).

De bepaling van het primaire energiegebruik van een warmtegedreven warmtepomp is gecompliceerder. Industriële restwarmte en zonnewarmte op lage temperatuur kunnen mogelijk als 'gratis' worden beschouwd en dan is het primair energiegebruik theoretisch nihil. In dit geval wordt de COP (en daarmee de PER) doorgaans betrokken op het parasitair elektriciteitsverbruik van pompen, ventilatoren en kleppen. Wanneer echter de warmte uit een gasgestookte WKK-eenheid wordt gebruikt voor bijvoorbeeld sorptiekoeling, dan is er voor de productie van koude wel sprake van primair energiegebruik, namelijk in de vorm van een hoeveelheid verbruikt gas. Dit verbruik wordt dan verminderd met de primaire energie die in het Nederlandse elektriciteitsnet nodig geweest zou zijn om de elektriciteit te maken die nu door de WKK is geproduceerd. Alleen op deze manier kunnen de energieprestaties van arbeidgedreven en warmtegedreven warmtepompen onderling worden vergeleken.

Toepassingsvoorbeelden

Om verschillende warmtepompconcepten met elkaar te kunnen vergelijken is een aantal standaardtoepassingen en bedrijfscondities gedefinieerd. Voor deze toepassingen worden dan de COP en de PER berekend. Dit is niet altijd mogelijk voor elk type warmtepomp. Het kan zijn dat er geen data beschikbaar zijn voor die specifieke toepassing of dat de warmtepomp voor de betreffende toepassing niet geschikt is.

De standaardtoepassingen en bedrijfscondities zijn:

- Een warmtepomp die bronwarmte van 10 °C gebruikt en warmte afgeeft op een 35 °C/30 °C systeem.
- Een warmtepomp die bronwarmte van 10 °C gebruikt en warmte afgeeft op een 50 °C/40 °C systeem (uitgaande van een zogeheten bivalent systeem).
- Een koeler met een condensortemperatuur van 30 °C en een 6 °C/12 °C afgifte systeem.

3.2 Arbeidgedreven warmtepompen met gasmotor

Arbeidgedreven systemen bestaan uit een motor die mechanische energie opwekt waarmee een warmtepomp wordt aangedreven. Er zijn verschillende combinaties van motor en warmtepomp mogelijk. De meest voor de hand liggende is een Ottomotor met interne verbranding die een compressiewarmtepomp aandrijft.

3.2.1 Gasmotorgedreven compressiewarmtepomp

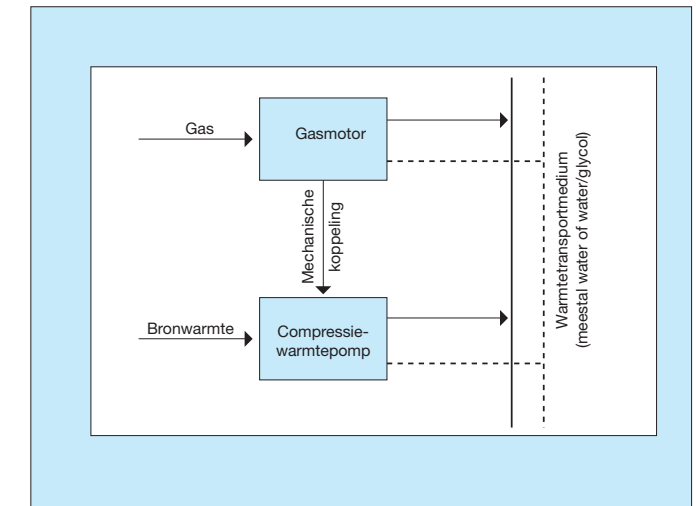
Een gasmotorgedreven warmtepomp kan worden opgebouwd uit een combinatie van een losse gasmotor en een losse warmtepomp, volgens het schema van figuur 2.

De restwarmte van de motor wordt afgestaan aan een secundair warmtetransportmedium, meestal water of een water/glycol mengsel. De krukas van de motor is mechanisch gekoppeld aan de as van de compressiewarmtepomp. De warmtepomp pompt laagtemperatuur bronwarmte (meestal afkomstig uit grondwater, oppervlaktewater, buitenlucht of de restwarmtestroom uit een proces) op naar een hogere temperatuur en geeft deze af aan het secundaire warmtetransportmedium.

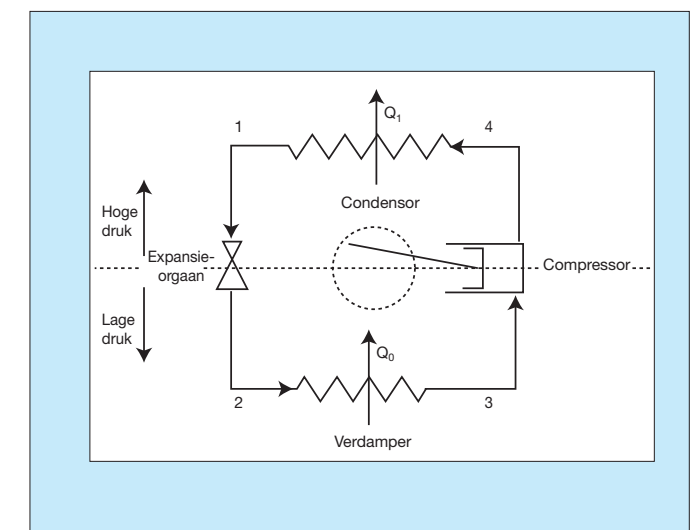
De gasmotor

De gasmotoren zijn dezelfde als de motoren die voor warmtekrachtkoppeling (WKK) worden gebruikt. De motoren werken volgens het viertaktprincipe, waarbij het proces in elke cilinder

vier stappen doorloopt: de inlaatslag, de compressieslag, de arbeidslag en uitlaatslag. De werking van gasmotoren is gedetailleerd beschreven in het boek 'Warmte en Kracht' uit de serie 'De wereld van aardgas' van GasTerra.



Figuur 2 Koppeling van een losse gasmotor en een losse compressiewarmtepomp.



Figuur 3 Schema van een compressorwarmtepomp.

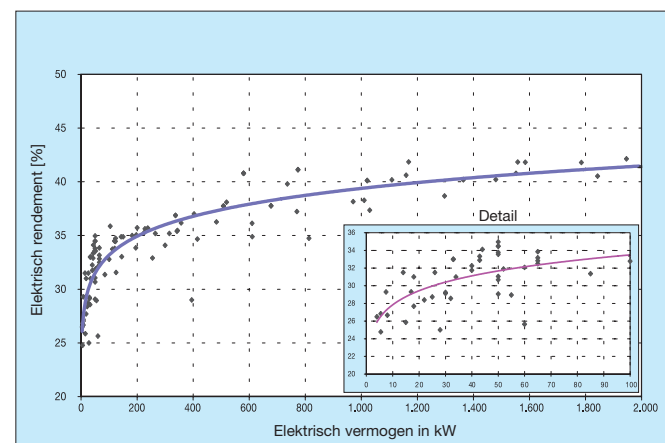
De compressiewarmtepomp

De compressiewarmtepomp bestaat in essentie uit vier onderdelen: de compressor, de condensor, het expansieorgaan en de verdampers (zie figuur 3). In de compressiewarmtepomp circuleert een koudemiddel dat bij lage druk in de verdampers verdampt en daar bij lage temperatuur warmte opneemt (Q_0 in de figuur). De damp wordt met behulp van de compressor op hoge druk gebracht. De hiervoor benodigde arbeid is in dit geval afkomstig van de gasmotor. Bij hoge druk condenseert het koudemiddel; hierbij komt de opgenomen warmte Q_0 plus de aan de compressor toegevoerde arbeid als warmte op hoge temperatuur beschikbaar (Q_1 in de figuur).

Toepassingsgebied

Normaliter zal de gasmotor de warmte leveren op temperaturen van maximaal ca. 90 °C. Een klein deel van de warmte (5 tot 10%) kan op hogere temperatuur (110 °C tot 120 °C) worden gewonnen door de hoge temperatuur van de rookgassen te benutten.

Het toepassingsgebied van de warmtepomp wordt vooral bepaald door de temperatuur van de beschikbare bronwarmte in combinatie met de maximale temperatuurlift van 40 tot 50K (Kelvin). Wordt bijvoorbeeld grondwater met een temperatuur van 10 °C als bronwarmte gebruikt, dan zal de temperatuur van de geleverde warmte maximaal 60 °C bedragen. Is de bronwarmte een industriële restwarmtestroom van 60 °C, dan wordt het



Figuur 4 Indicatieve elektrische rendementen van de gasmotor als functie van het vermogen.

mogelijk om lagedruk stoom van 110 °C te leveren. Bij deze hoge-temperatuurtoepassingen moet bijzondere aandacht worden besteed aan de selectie van het juiste koudemiddel.

Het toepassingsgebied van de gasmotorgedreven compressiewarmtepomp is dan ook beperkt tot ruimteverwarming en enkele industriële lagetemperatuurprocessen.

Schaalgrootte

De capaciteit van gasmotoren zijn van het type dat ook voor WKK wordt ingezet. De schaalgrootte loopt van enkele kilowatts tot enkele megawatts mechanisch vermogen. Warmtepompen op de schaalgrootte van megawatts worden meestal specifiek voor een bepaalde situatie ontworpen. De warmtepomp wordt opgebouwd uit componenten die ook voor airconditioning en industriële koeling worden gebruikt. Het thermisch vermogen van de gasmotor en de compressiewarmtepomp samen zal maximaal zo'n 15 MW bedragen.

Rendementen

Het rendement van de gasmotor wordt opgesplitst in het mechanische rendement en het thermische rendement. Het mechanische rendement is de verhouding tussen het asvermogen en de energiestroom van toegevoerde brandstof en bedraagt 30 tot 45%. Het thermische rendement is de verhouding tussen het thermische vermogen en de energiestroom van de toegevoerde brandstof en bedraagt 45% tot 70%.

De COP van de warmtepomp wordt vooral bepaald door de temperatuur van de bronwarmte en de temperatuur waarop de warmte moet worden geleverd. De maximale COP kan worden bepaald uit het Carnotrendement:

$$COP_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{condensatie}} [\text{K}]}{T_{\text{condensatie}} - T_{\text{verdamping}} [\text{K}]}$$

Het verschil tussen de verdampingstemperatuur en de temperatuur van de warmtelevering bedraagt 5 tot 7 K, het verschil tussen de (laagste) brontemperatuur en de verdampingstemperatuur bedraagt 4 tot 6 K. De COP is een maximale en dus theoretische waarde. In de praktijk wordt deze waarde door het smoorverlies en het isentrope rendement van de compressor (het energieverlies in de compressie-expansiecyclus) niet gehaald. Als eerste

indicatie kan voor de COP van een warmtepomp worden gerekend met een rendement van 50 tot 60% van het Carnotrendement.

Systeemrendement

Het volgende voorbeeld laat zien hoe het systeemrendement van een industriële gasmotorgedreven compressiewarmtepomp wordt bepaald. Het systeemvoorbeeld levert proceswarmte van 90 °C. Als bronwarmte wordt een koelwaterstroom gebruikt die tot 40 °C wordt afgekoeld. De gasmotor heeft een mechanisch rendement van 35% en een thermisch rendement van 45%. Per kilowatt aardgas levert de motor dus 0,45 kW warmte en 0,35 kW aan arbeid. De arbeid wordt ingezet in een warmtepomp met een rendement van 55% van Carnot. De condensortemperatuur is 97 °C en de verdampingstemperatuur bedraagt 35 °C. Per kilowatt aardgas levert de warmtepomp aan warmte:

$$Q_{\text{wp}} = 0,35 * 0,55 * \frac{273 + 97}{97-35} = 1,15 \text{ kW}$$

Het systeemrendement komt daarmee op (1,15 + 0,45 =) 160%.

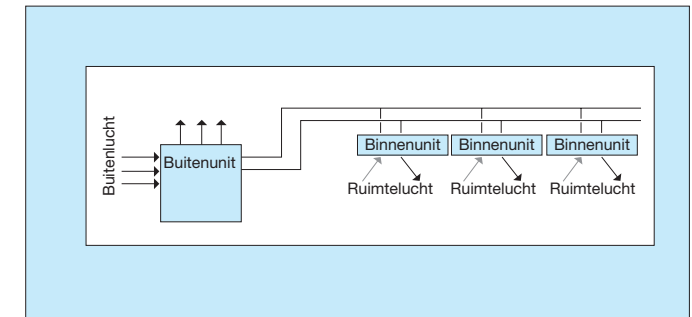
Ontwikkelingsstadium

De technologie van gasmotoren voor stationaire toepassing is volledig uitontwikkeld. De motoren hebben een hoog rendement, relatief lage emissies, een lange levensduur en een hoge beschikbaarheid. Bij compressiewarmtepompen is eveneens sprake van uitontwikkelde technologie. Voor de hogere capaciteiten (vanaf circa 100 kW) zullen de warmtepompen specifiek voor een bepaalde situatie worden ontworpen. Warmtepompen voor hogere temperaturen (boven 60 °C) zijn zeldzaam. Zeer specialistische engineering is hier nodig.

3.2.2 Gasmotorgedreven compressiewarmtepomp, multisplit type

Gasmotorgedreven warmtepompen worden ook als buitenunit van zogenaamde *variable refrigerant flow* (VRF) of *multisplit units* gebruikt. Een *split unit* is een koel- en verwarmingssysteem waarin het koudemiddel het transport van warmte of koude naar de ruimtes verzorgt (zie figuur 5).

In de buitenunit zijn het expansieventiel, de verdampers en de compressor opgenomen. Het gasvormige koudemiddel uit de buitenunit wordt via een leidingsysteem naar de condensoren van de binnenunits getransporteerd, waar het condenseert en warmte



Figuur 5 Multisplit unit in verwarmingsbedrijf. Bron: ECN

aan de ruimte afgeeft. Het vloeibare koudemiddel wordt vervolgens via het leidingsysteem teruggevoerd naar de buitenunit. Omdat één buitenunit meerdere binnenunits van koudemiddel voorziet, wordt dit systeem 'multisplit' genoemd.

Moderne grotere *split units* kunnen als VRF-systeem worden uitgevoerd. In een VRF-systeem kan de compressor koudemiddel met een variërend debiet verwerken, zodat de capaciteit van de afzonderlijke binnenunits proportioneel kan worden geregeld.

Met behulp van een vierwegklep in de leidingloop van het koudemiddel kan de werking van het systeem worden omgekeerd. De binnenunits zijn dan de verdampers geworden die de ruimtelucht koelen door vloeibaar koudemiddel te verdampen. De warmtewisselaar in de buitenunit is dan de condensor geworden. Het is daardoor mogelijk te verwarmen of te koelen met één installatie. De zogeheten driepijps uitvoeringen van een VRF-systeem kunnen gelijktijdig koelen en verwarmen.

Meestal wordt de compressor van een *split unit* aangedreven door een elektromotor. Er zijn echter ook gasmotorgedreven buitenunits op de markt. Tijdens koelbedrijf wordt de motorwarmte naar de omgeving (buitenlucht) afgevoerd. In verwarmingsbedrijf wordt de motorwarmte op het koudemiddel overgedragen en dus nuttig gebruikt.

Ook kan de gasgedreven buitenunit worden gecombineerd met een vloeistof/vloeistofwarmtewisselaar, waarin het koudemiddel een secundair warmtetransportmedium (meestal water of een mengsel van water en glycol) verwarmt of koelt. Deze oplossing wordt bijvoorbeeld gekozen als in een bestaande situatie een ketel

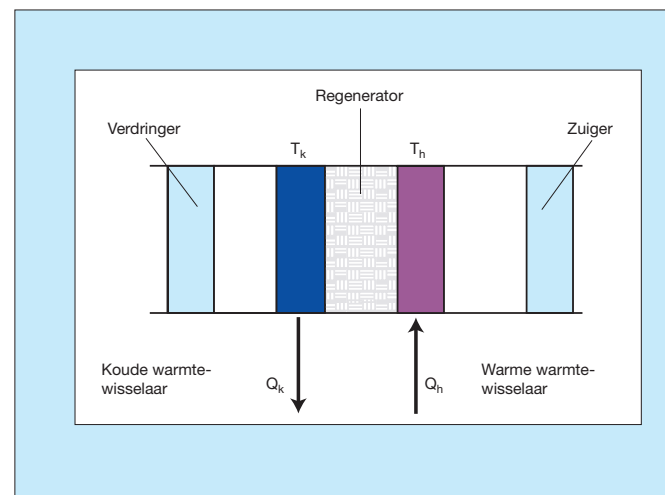
en een koelmachine worden vervangen door een gaswarmtepomp. Het aanwezige leidingen- en afgiftesysteem hoeft dankzij de warmtewisselaar niet te worden vervangen.

De capaciteitsrange van multisplit units voor verwarmen is 30 tot 90 kW, voor koelen 20 tot 70 kW. De technologie van buitenunits op basis van gasmotorgedreven compressiewarmtepompen is inmiddels volledig ontwikkeld. Schakeling van buitenunits tot grotere capaciteiten (tot wel 1.000 kW) is goed mogelijk, zoals onder meer wordt beschreven in paragraaf 7.7.

3.3 Arbeidgedreven warmtepompen met externe verbranding

Deze paragraaf behandelt een aantal alternatieve warmtepompconcepten met motoren die werken op basis van het principe van externe verbranding. Het gaat steeds om installaties waarin één deel arbeid genereert vanuit de toegevoerde warmte en het andere deel deze arbeid gebruikt om warmte naar een ander temperatuurniveau te pompen. De manier waarop de beide delen arbeid uitwisselen verschilt. Alle concepten zijn gebaseerd op de Stirlingcyclus.

Het meest bekende concept is de Stirlingmotor die een Stirlingwarmtepomp aandrijft, de zogeheten Stirling-Stirling-warmtepomp. Dit concept kent een aantal varianten waarbij de mechanische koppeling door middel van een gemeenschap-



Figuur 6 Principeschema van een Stirlingmotor. Bron: ECN

pelijke zuiger plaatsvindt (Duplex-Stirling) of door het werkmedium (Vuilleumier-cyclus). Ten slotte bestaat er een variant waarbij de mechanische koppeling tussen de Stirlingmotor en de Stirlingwarmtepomp door geluidsgolven tot stand wordt gebracht. Dit is de thermo-akoestische warmtepomp.

3.3.1 De Stirlingcyclus

De belangrijkste componenten van een Stirlingsysteem zijn de regenerator, de warme en de koude warmtewisselaar, de zuiger, de verdringer en het werkmedium (meestal helium onder een druk van 30 tot 200 bar). In figuur 6 zijn deze componenten weergegeven voor een Stirlingmotor. De zuiger is het onderdeel dat het vermogen van de motor produceert. De verdringer zorgt voor de juiste relatie tussen druk en gassnelheid door de regenerator. Hiervoor wordt een gedeelte van het vermogen van de motor gebruikt. De regenerator bevindt zich tussen beide warmtewisselaars. Het werkmedium (gas) wisselt warmte uit met het regeneratormateriaal. Gedurende een deel van de cyclus wordt warmte afgestaan vanuit het gas naar de regenerator, terwijl deze warmte in een ander deel van de cyclus weer wordt teruggegeven aan het gas.

Om een goede warmteoverdracht tussen het gas en het regeneratormateriaal te verkrijgen is een zeer groot oppervlak nodig. Dit wordt bereikt door een zeer poreus materiaal met kleine gasdoorgangen te nemen. Doorgaans wordt gebruikgemaakt van geweven metaalgaas met een maaswijdte van circa 100 micrometer. De bewegingen van de zuiger en de verdringer zorgen ervoor dat het gas een cyclus doorloopt. Deze cyclus is schematisch weergegeven in figuur 8. Daarin zijn vier fasen te onderscheiden.

In de eerste fase wordt het gas aan de lagetemperatuurzijde gecomprimeerd door de verdringer. Normaliter neemt dan de temperatuur van het gas toe. Echter, door het goede thermische contact tussen gas en regenerator wordt de temperatuur van het gas door de regenerator bepaald; de temperatuur zal dus niet toenemen. Vandaar dat er warmte wordt afgevoerd door de lagetemperatuurwarmtewisselaar. In de volgende stap bewegen zowel de verdringer als de zuiger in dezelfde richting. Het volume van het gas verandert niet maar het wordt wel verplaatst naar de warme kant van de regenerator. Het gas zal warmte opnemen uit de regenerator en (vrijwel) dezelfde tempe-

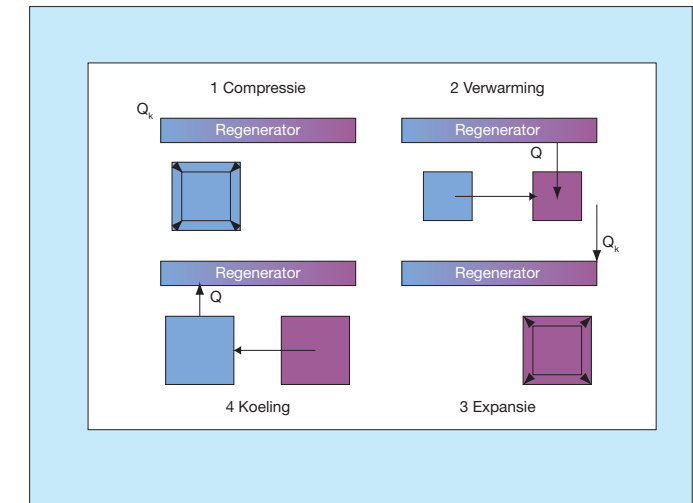
ratuur aannemen als de regenerator. Vervolgens vindt expansie van het gas aan de warme zijde plaats door beweging van de zuiger. Het gas koelt hierbij niet af omdat het de temperatuur van de regenerator ter plekke aanneemt. De benodigde warmte wordt toegevoerd door de hogetemperatuur-warmtewisselaar. In de laatste fase wordt het gas weer terugverplaatst naar de oorspronkelijke positie (van hoge naar lage temperatuur). Het gas zal warmte afgeven aan de regenerator. Hierna kan de cyclus opnieuw beginnen. Deze cyclus wordt bijvoorbeeld vijftig keer per seconde uitgevoerd.

Als de cyclus die het gas doormaakt in een PV-diagram wordt uitgezet, ontstaat figuur 9. Hierin is te zien dat de Stirlingcyclus is opgebouwd uit twee isothermen en twee isochoren (de paarse lijnen). Het maximum rendement is het Carnotrendement. In werkelijkheid zullen de fasen elkaar overlappen, waardoor de blauwe lijn ontstaat. Het ingesloten oppervlak is de hoeveelheid arbeid die door dit proces wordt gegenereerd. De compressie bij lage temperatuur vergt minder vermogen dan de expansie bij hoge temperatuur oplevert.

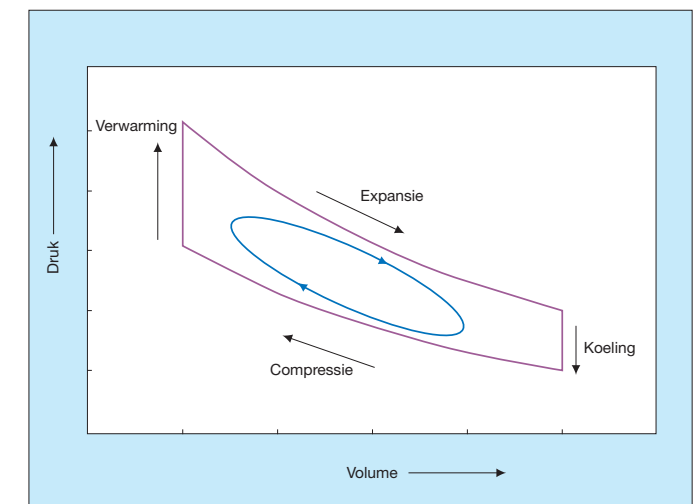
Deze cyclus kan ook in omgekeerde volgorde worden doorlopen. Het netto effect is dan dat er arbeid moet worden toegevoerd en warmte wordt verplaatst van een lagere naar een hogere temperatuur: dit is een warmtepomp. Wanneer de motorcyclus wordt gekoppeld aan een warmtepompcyclus, ontstaat een integraal systeem dat een warmtegedreven warmtepomp vormt, met arbeidsvermogen als tussenschakel. Deze thermodynamische cycli kunnen op verschillende wijzen worden uit-



Figuur 7 Geweven metaalgaas als regenerator in een Stirlingsysteem. Links zijn een aantal gaasjes te zien, rechts een microscopische opname van een gaas. Bron: ECN



Figuur 8 De gascyclus. Bron: ECN



Figuur 9 Thermodynamische Stirlingcyclus. Bron: ECN

gevoerd. Drie verschillende uitvoeringsvormen worden hieronder beschreven.

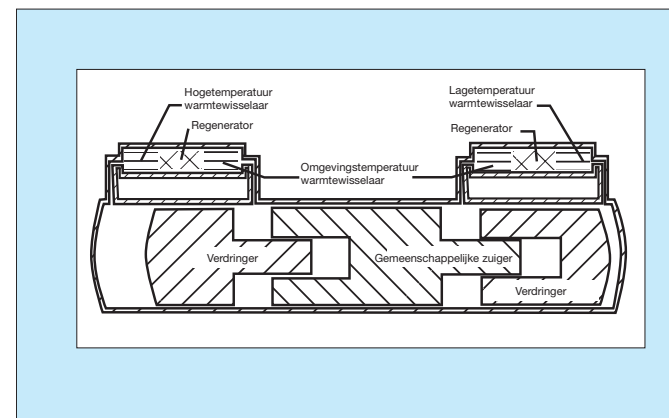
3.3.2 Stirling-Stirling

De eerste variant is een Stirlingwarmtepomp die wordt aangedreven door een Stirlingmotor. Een dergelijk systeem heet een duplexstelsel; een voorbeeld is weergegeven in figuur 10. In dit voorbeeld is sprake van een warmtegedreven koeler. De warmtetoevoer aan de motorkant vindt plaats in de hogetemperatuur warmtewisselaar. In plaats van een warmtewisselaar kan dit een (aardgas)brander zijn die dit deel van het systeem opwarmt. De warmteafvoer vindt plaats via een omgevingstemperatuur warmtewisselaar. De geproduceerde arbeid uit de motor wordt via een gemeenschappelijke zuiger doorgegeven aan de warmtepomp. In de warmtepomp wordt in dit systeem warmte opgepompt van een laag temperatuurniveau naar omgevingstemperatuur. Het hier geschetste systeem is slechts één voorbeeld van de vele uitvoeringsvormen van een Stirlingsysteem.

Het toerental van Stirlingmachines ligt doorgaans tussen de 500 en 4000 toeren per minuut (8 tot 67 Hz). Hoe hoger het toerental, des te hoger de vermogensdichtheid van het systeem.

Toepassingsgebied

Zoals al eerder aangegeven wordt bij een Stirlingcyclus meestal helium onder hoge druk toegepast. Andere mogelijke werkmedia zijn waterstof, lucht of stikstof. Dit betekent dat er qua toe-



Figuur 10 Duplex Stirlingsysteem. Bron: ECN

passingsgebied nauwelijks beperkingen zijn als gevolg van het werkmedium zoals bij conventionele compressie- of absorptie-warmtepompen. Een warmtepomp op basis van de Stirlingcyclus kan dus voor een groot aantal toepassingen worden ingezet, voor zowel verwarming als koeling (tot cryogene temperaturen). Naast de bedrijfstemperatuur geldt dat er ook voor de temperatuurlift van de warmtepomp geen theoretische begrenzings zijn. Wel wordt de prestatie van de warmtepomp slechter naarmate de lift groter wordt.

In de meeste gevallen is de temperatuur van de lage temperatuurzijde van de motor gelijk aan de hoge temperatuur van de warmtepomp, maar dat is geen vereiste. Bij de warmtegedreven warmtepompen moet worden bedacht dat de nuttige warmte op het gewenste temperatuurniveau op twee plekken beschikbaar komt, zowel in de motor als in de warmtepomp.

Schaalgrootte

De Stirlingsystemen (voornamelijk motoren) die tot op heden zijn gerealiseerd, zijn relatief klein qua vermogen. Er zijn echter Stirlingmotoren gebouwd met een output van 100 kW en grotere systemen lijken niet onmogelijk. Het grootste struikelblok bij het opschalen van Stirlingsystemen is de warmteoverdracht in de warmtewisselaars. Deze is relatief laag, waardoor grote warmtewisselaars nodig zijn. Hiervoor is niet altijd voldoende ruimte beschikbaar binnen het systeem. Daarnaast vormt de massa van de zuiger bij grote capaciteiten een probleem. Een grote zuiger kan tot ongewenste trillingen van het systeem leiden. Er zijn echter uitvoeringen denkbaar waarbij meerdere gekoppelde systemen elkaars trillingen opheffen.

Rendementen

Het rendement van een Stirling-gaswarmtepomp hangt af van de temperatuurniveaus van de toepassing. Er zijn nauwelijks gegevens bekend over de prestatie van een integraal duplexstelsel. Voor de hiervoor genoemde toepassingen zijn rendementen berekend, gebaseerd op de volgende aannames (afkomstig uit de literatuur over de afzonderlijke componenten):

- Een Stirlingmotor zet warmte om in arbeid met een efficiency van 50% van het maximale Carnotrendement.
- De Stirlingmotor wordt verwarmd door een gasbrander die de warme kant van de motor op een temperatuur van 650 °C houdt.
- Het brandrendement na recuperatie bedraagt 85%.

De overige 15% kan nog nuttig worden ingezet voor verwarmingsdoeleinden.

- Een Stirlingkoeler heeft een efficiency van 30% van het maximale Carnotrendement.

Met deze aannames kan voor elk temperatuurniveau worden berekend wat de rendementen van de motor en de warmtepomp zullen zijn. Het rendement van het integrale systeem wordt gegeven door de gegenereerde warmte/koude gedeeld door de warmtetoevoer bij de motor. Voor de gedefinieerde standaardtoepassingen staan de prestaties in onderstaande tabel weergegeven.

Toepassing	COP _{th} /PER
Bodemwarmte naar 30/40 °C	1,6
Bodemwarmte naar 60/70 °C	1,2
Koeling 6/12 °C	1,0

Tabel 1 Berekende rendementen voor Stirling-Stirlingwarmtepompen. Bron: ECN

Ontwikkelingsstadium

De Stirlingcyclus is al bekend sinds 1816. Ondanks grote onderzoeksinspanningen is het nog niet tot grootschalige commerciële introductie gekomen. Stirlingmotoren en Stirlingwarmtepompen worden echter wel degelijk toegepast in nichemarkten, zoals in de ruimtevaart en voor cryogene koelers. De toepassing van Stirlingmotoren in micro-WKK-systemen voor woonhuizen (foto rechts) is de laatste jaren sterk ontwikkeld en is inmiddels marktrijp.

In het verleden zijn er ontwikkelingen geweest aan duplexsystemen voor de gebouwde omgeving (Sunpower, Global Cooling). Voor zover bekend zijn nog geen nieuwe activiteiten op dit gebied te melden.

3.3.3 Thermo-akoestische systemen

Een thermo-akoestisch systeem maakt gebruik van geluidsgolven in plaats van zuigers en verdringers. Een geluidsgolf is in feite niets anders dan een periodieke verplaatsing van gas, gecombineerd met compressie en expansie. Deze fluctuaties zijn in het dagelijkse leven zo klein dat ze nauwelijks waarneembaar zijn, maar in thermo-akoestische systemen wordt met een dusdanig hoge geluidssterkte gewerkt dat deze fluctuaties nuttig kunnen worden ingezet. Binnen een thermo-akoestisch systeem worden een motor en een warmtepomp onderscheiden, vergelijkbaar



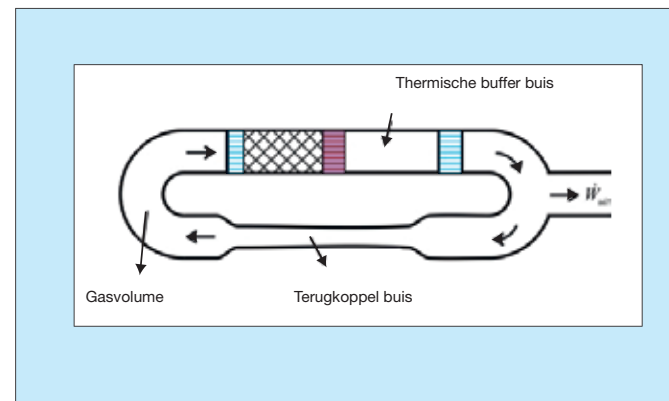
Figuur 11 Testopstelling micro-WKK (HRe-ketel). Bron: GasTerra



Figuur 12 Micro-WKK systemen van Ariston (links) en Remeha (rechts), beide op basis van een Stirlingmotor. Bron: Ariston, Remeha

met de duplex Stirlingmachine. De koppeling van beide delen wordt verzorgd door het akoestische vermogen.

In een thermo-akoestische motor is de verdringer vervangen door een akoestisch circuit. Het vermogen dat de motor produceert is akoestisch vermogen, vergelijkbaar met een bewegende zuiger. Evenals bij een Stirlingmotor wordt een gedeelte van het vermogen teruggevoerd naar de koude kant van de regenerator, via een



Figuur 13 Principeschema van een thermo-akoestische motor/warmtepomp. Bron: ECN

zogenoeten *feedback inertance*. In tegenstelling tot de klassieke Stirlingmotoren heeft de thermo-akoestische variant geen mechanisch bewegende delen en is daarom betrouwbaarder en goedkoper te produceren.

De toe- en afvoer van warmte wordt verzorgd door warmtewisselaars aan weerszijden van de regenerator aan te brengen. De warmtewisselaars verzorgen de warmteoverdracht tussen het warmtetransportmedium en het oscillerende werkmedium. Als werkmedium wordt een gas (helium, argon, stikstof of lucht) onder een druk van 5 tot 40 bar of hoger toegepast.

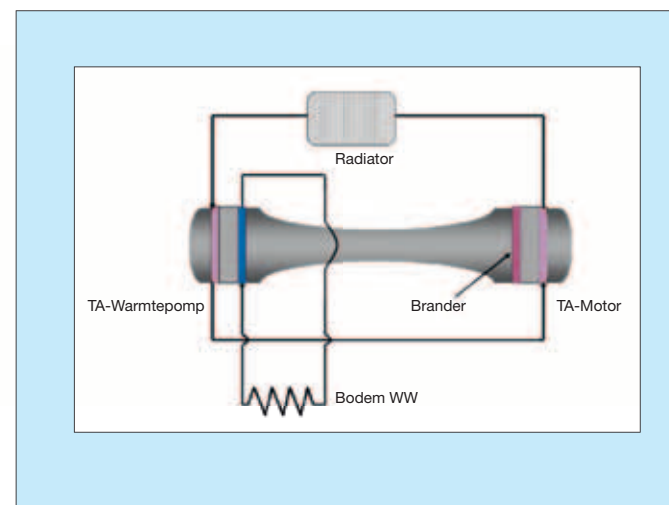
Om de diverse componenten van een thermo-akoestisch systeem (akoestisch) te koppelen worden de componenten in een resonator geplaatst. De resonator fungeert hierbij als drukvat en bepaalt de bedrijfsfrequentie van het systeem. Dit is vergelijkbaar met een orgelpijp. Hoe langer de behuizing, hoe lager de frequentie. Typische werkfrequenties voor thermo-akoestische systemen liggen tussen 40 en 200 Hz. Figuur 14 geeft een systeem weer, waarbij rechts in de resonator een thermo-akoestische motor is geplaatst die wordt aangedreven door een brander. Het geproduceerde akoestische vermogen wordt in de warmtepomp aan de linkerkant gebruikt om warmte van een laag naar een hoog temperatuurniveau te pompen.

Toepassingsgebied

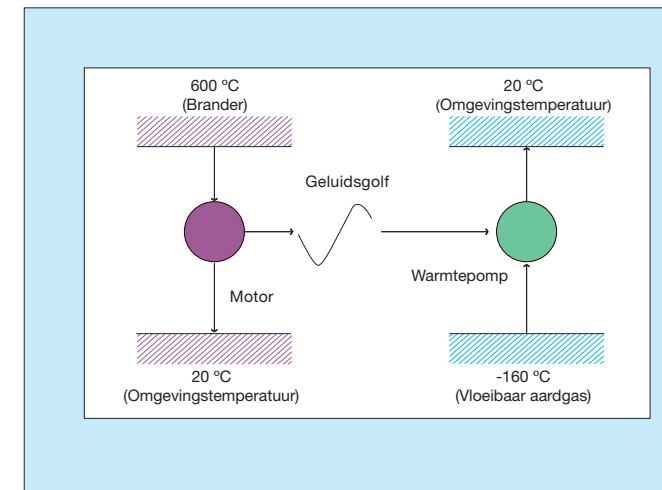
Als werkmedium wordt in een thermo-akoestisch systeem vaak helium onder hoge druk toegepast. Daardoor zijn er voor het toepassingsgebied nauwelijks beperkingen. Een warmtepomp op basis van dit principe kan dus voor een groot aantal toepassingen worden ingezet, zowel voor verwarmingsdoeleinden als voor koeling. Een aantal voorbeelden is in de figuren 15 tot en met 20 weergegeven. De voorbeelden zijn niet voorbehouden aan gasgestookte systemen. Naast elke toepassing zijn schematisch de temperatuurniveaus en de vermogensstromen aangegeven.

Schaalgrootte

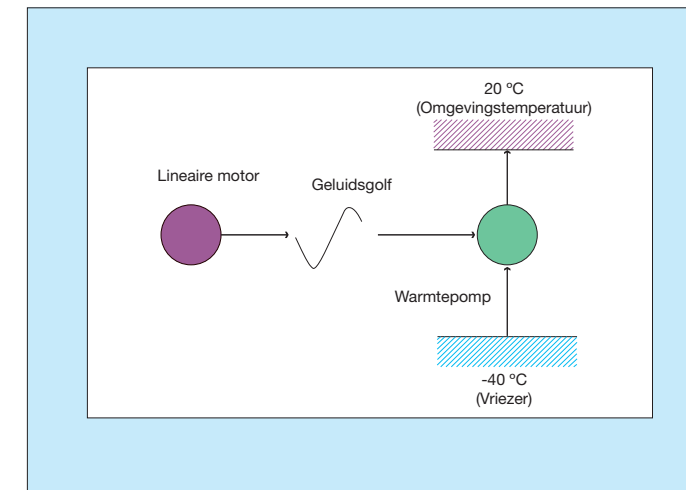
De maximale schaalgrootte van thermo-akoestische systemen wordt voornamelijk bepaald door de ruimte die beschikbaar is voor de warmtewisselaars. Die ruimte wordt deels bepaald door de frequentie waarop het systeem draait; de frequentie bepaalt immers de lengte van het systeem. Aangezien het systeem akoes-



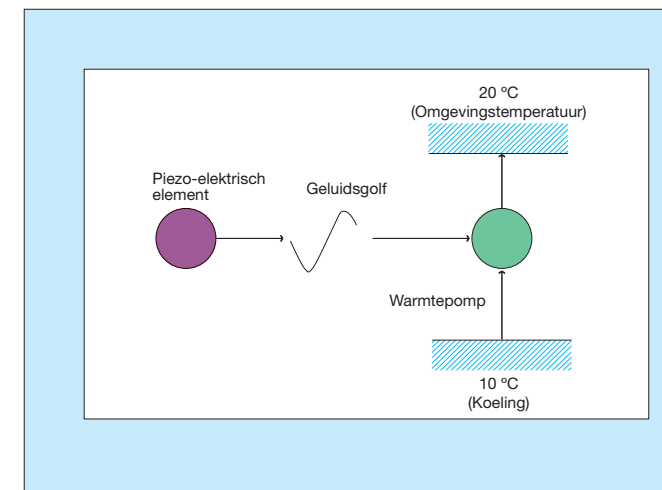
Figuur 14 Schematische weergave van een thermo-akoestisch systeem. Bron: GasTerra



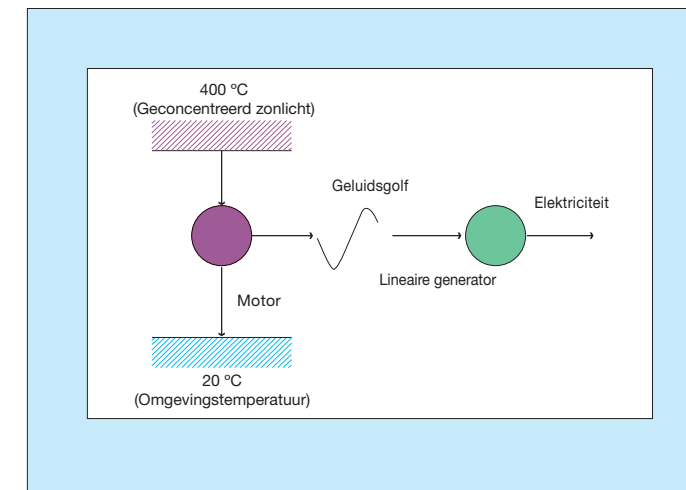
Figuur 15 Het vloeibaar maken van aardgas. Door middel van een gasgestookte brander wordt in een motor akoestisch vermogen opgewekt. In een warmtepomp wordt deze akoestische energie vervolgens gebruikt om aardgas vloeibaar te maken. Bron: ECN



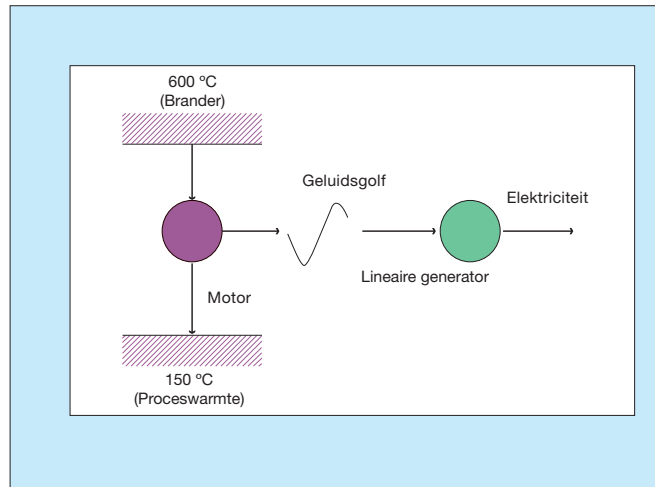
Figuur 17 Koeling aan boord van schepen. Een lineaire motor wekt een geluidsgolf op. De akoestische energie wordt in een warmtepomp gebruikt om koeling te bewerkstelligen. Bron: ECN



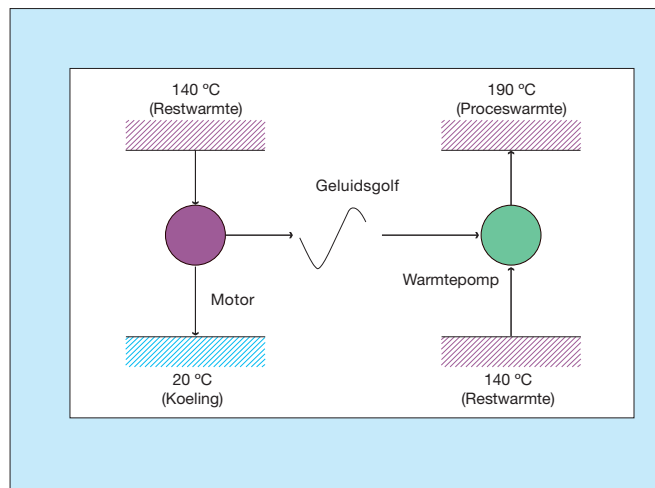
Figuur 16 Chipkoeling. Een piëzo-elektrisch element genereert hier de geluidsgolf. Een thermo-akoestische koeler gebruikt het geluid om te koelen. Bron: ECN



Figuur 18 Elektriciteit uit zonlicht. Geconcentreerde thermische zonne-energie genereert een akoestische golf in een motor. In een soort omgekeerde luidspreker (lineaire generator) wordt vervolgens wisselspanning opgewekt. Bron: ECN



Figuur 19 Warmtekrachtkoppeling (WKK). Een brander zorgt hier via een thermo-akoestische motor voor de akoestische golf en een lineaire generator voor wisselspanning. De rookgassen van de brander verzorgen de warmtevraag. Bron: ECN



Figuur 20 Opwaardering van restwarmte. Door middel van restwarmte wordt akoestische energie opgewekt in een motor. In een warmtepomp wordt vervolgens met behulp van de akoestische energie restwarmte opgewaardeerd tot een nuttig temperatuurniveau. De geluidsgolf kan ook worden gebruikt om koeling te verzorgen. Bron: ECN

tisch gezien ééndimensionaal moet zijn, is de diameter beperkt. Modelberekeningen geven aan dat het mogelijk moet zijn om een systeem te bouwen met een vermogen van enkele honderden kilowatt. In principe wordt dit wel een relatief lang systeem. Het is echter mogelijk om de resonator 'op te vouwen', zodat het systeem compacter wordt. Dit gaat echter wel ten koste van de prestaties, aangezien elke richtingverandering van geluidsgolven verliezen met zich meebrengt.

Rendementen

De rendementen van thermo-akoestische systemen zijn onder meer afhankelijk van de temperatuurcondities van de toepassing. Er zijn geen gegevens bekend van commerciële toepassingen. Daarom moeten de cijfers worden gebaseerd op meetgegevens uit laboratoria en verwachtingen omtrent haalbare rendementen.

De volgende aannames zijn gehanteerd:

- De motor heeft een rendement van 40% van het maximale Carnotrendement. De haalbaarheid hiervan is in laboratoria inmiddels aangetoond.
- De motor wordt verwarmd door een gasbrander die de warme kant van de motor op een temperatuur van 650 °C houdt.
- Het branderrendement na recuperatie bedraagt 85%. De overige 15% kan nuttig worden ingezet voor verwarming.
- De warmtepomp heeft eveneens een rendement van 40% van het maximale Carnotrendement. Dit is dezelfde cyclus als de motor, maar dan in omgekeerde richting. Aangezien de temperatuurverschillen bij de warmtepomp kleiner zijn dan in de motor, vervullen de warmtewisselaars hier een cruciale rol bij het minimaliseren van temperatuurverliezen.
- Van het vermogen van de motor gaat 10% verloren door wrijvingsverliezen en turbulentie van het bewegende gas in de resonator.

Onderstaande tabel bevat de berekende prestatie voor de drie gedefinieerde standaardtoepassingen.

Toepassing	COP _{th} /PER
Bodemwarmte naar 30/40 °C	1,5
Bodemwarmte naar 60/70 °C	1,1
Koeling 6/12 °C	0,9

Tabel 2 Berekende prestatie voor de drie gedefinieerde standaardtoepassingen. Bron: ECN

Ontwikkelingsstadium

Thermo-akoestische systemen verkeren voor de meeste toepassingen nog in een pril ontwikkelingsstadium. De technologie is nog niet commercieel beschikbaar, met uitzondering van kleinschalige koelsystemen aangedreven door lineaire motoren. Voor het vloeibaar maken van aardgas is in de Verenigde Staten een grootschalig prototype gebouwd. Dit systeem is ontworpen om op basis van een aardgasgedreven brander 30 kW akoestisch vermogen te genereren. Hiermee werd in een koeler 7 kW koelvermogen op -140 °C gemaakt.

In Nederland wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een restwarmtegedreven warmtepomp. Hierin wordt industriële restwarmte met temperaturen boven de 100 °C gebruikt om een motor aan te drijven.

Daarnaast wordt onderzoek gedaan naar elektrisch aangedreven systemen en worden ook brandergedreven systemen verkend. De grote uitdaging daarbij is zoveel mogelijk warmte uit de gasvlam in het thermo-akoestische systeem te krijgen.



Figuur 21 Thermo-akoestische aardgasliquefier. Bron: Praxair/LANL

3.3.4 Vuilleumier

De Vuilleumiercyclus bestaat uit een combinatie van een warmtemotor en een warmtepomp. Daar waar de koppeling tussen de motor en de warmtepomp bij een duplex Stirlingsysteem bestaat uit een gemeenschappelijke zuiger, is dit bij een Vuilleumiersysteem het werkmedium. Figuur 23 (pagina 52) geeft het systeem schematisch weer. De regeneratoren en warmtewisselaars zijn vergelijkbaar met het duplex Stirlingsysteem. Het grote verschil is de afwezigheid van de zuiger. In het Vuilleumiersysteem komen alleen twee verdringers voor. Productietechnisch heeft dit voordelen omdat er hogere eisen worden gesteld aan de maatvoering van de zuiger dan aan de verdringer. Wel heeft dit Vuilleumiersysteem een aandrijving van de verdringers nodig. Dat betekent dat er een (kleine) hoeveelheid elektriciteit aan het systeem moet worden toegevoerd. Er zijn echter ook configuraties bedacht die zonder deze externe aandrijving werken.

De bedrijfsfrequentie van een Vuilleumiersysteem (8 tot 16 Hz) ligt doorgaans lager dan van een duplex Stirlingsysteem. Ook zijn de drukverhoudingen veel lager. De energiedichtheid ligt hiermee lager dan bij de duplex Stirlingvariant. Een Vuilleumier-



Figuur 22 Restwarmtegedreven motor met warmtepomp. Bron: ECN

systeem is dan ook vooral geschikt voor kleinere vermogens. Het voordeel van een grotere machine is dat deze gemakkelijker te bouwen is en ook de integratie van warmtewisselaars vergemakkelijkt.

Toepassingsgebied

Onder hoge druk (80 tot 130 bar) wordt in een Vuilleumiersysteem vaak helium als werkmedium toegepast. Dit betekent dat er qua toepassingsgebied nauwelijks beperkingen zijn als gevolg van het werkmedium. Een warmtepomp op basis van de Vuilleumiercyclus kan dus voor een groot aantal toepassingen worden ingezet, voor zowel verwarming als koeling.

Schaalgrootte

Het grootste Vuilleumiersysteem dat tot op heden is gebouwd, heeft een thermisch vermogen van 20 kW. De verwachting is

dat er, evenals bij Stirlingsystemen, bij veel grotere vermogens problemen zullen optreden als gevolg van de lage vermogensdichtheid en de grote bewegende massa's van de verdringers.

Rendementen

Er zijn weinig gegevens bekend van Vuilleumiersystemen. In de literatuur wordt door de universiteit van Dortmund een COP van 1,7 opgegeven voor warmtelevering op 40 °C en een COP van 1,5 voor warmtelevering op 75 °C. Eén fabrikant rapporteert COP-waarden van 0,56 en 1,33 voor respectievelijk 5,2 kW koeling en 12,2 kW verwarming. Gerelateerd aan het Carnotrendement worden rendementen tussen de 10 en 20% aangegeven, waarbij het niet duidelijk is of dit modelberekeningen zijn of daadwerkelijk gemeten prestaties. Hoewel de condities niet helemaal overeenkomen met de gedefinieerde standaardcondities, lijkt het Vuilleumiersysteem op basis van

de gegevens van de Universiteit van Dortmund prestaties te leveren die vergelijkbaar zijn met die van duplex Stirlingsystemen en thermo-akoestische systemen. Dit is niet verwonderlijk, gezien de vergelijkbare thermodynamische cycli.

Ontwikkelingsstadium

De Vuilleumiercyclus is uitgevonden door Rudolph Vuilleumier in 1918. Het onderzoek heeft zich met name geconcentreerd op miniatuurkoelers voor cryogene toepassingen. In de jaren tachtig van de vorige eeuw is de ontwikkeling van het principe voor de gebouwde omgeving onderzocht. Dit heeft geresulteerd in een 16 kW warmtepomp (ontwerpwaarde) bij de Universiteit van Dortmund (Dit project wordt ondersteund door de Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU). Sanyo heeft een systeem ontwikkeld voor de productie van heet water (12,2 kW) en koud water (5,2 kW). Voor zover bekend hebben deze ontwikkelingen geen vervolg gekregen.

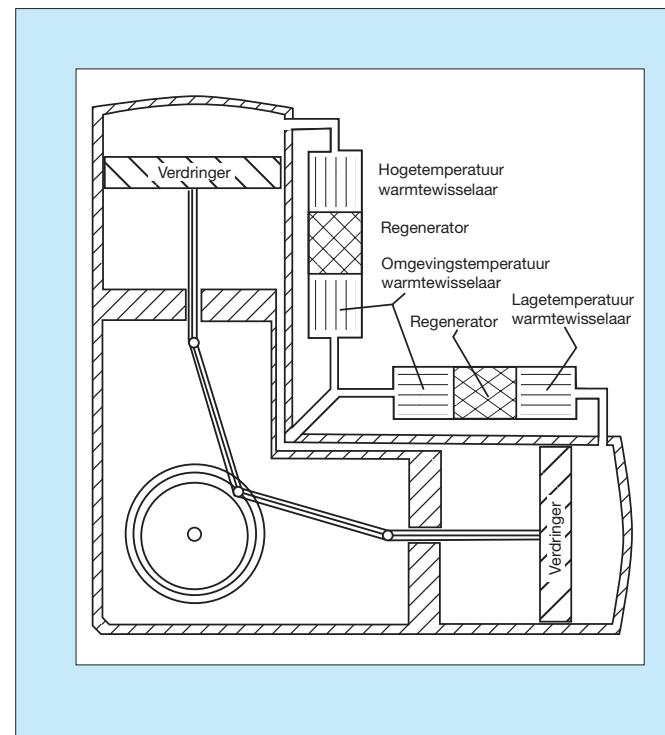
3.4 Thermisch gedreven warmtepompen

Thermisch gedreven warmtepompen gebruiken warmte niet alleen als de bron van te verplaatsen warmte, maar ook als energiebron voor de aandrijving van het warmtepompproces. Hiermee onderscheidt de thermisch gedreven warmtepomp zich van de arbeidgedreven warmtepomp. Deze paragraaf gaat nader in op thermisch gedreven warmtepompssystemen. Deze zijn gebaseerd op sorptie van een gas of damp, het sorbaat genoemd, aan of in een vaste stof of vloeistof, het sorbens.

3.4.1 De thermisch gedreven sorptiewarmtepomp

Net als bij een mechanisch gedreven compressiewarmtepomp wordt bij een thermisch gedreven sorptiewarmtepomp een cyclus toegepast waarbij het koudemiddel bij hoge druk en temperatuur condenseert en bij lage druk en temperatuur weer verdampt.

Bij een sorptiewarmtepomp wordt echter geen mechanische compressor gebruikt voor de drukverhoging, maar de bindingskrachten tussen het sorbens en het sorbaat, in combinatie met warmte als energiebron. In een sorptiesysteem worden de benodigde drukverschillen door 'thermische compressie' gecreëerd. Het verdampen van het sorbaat (lees: koudemiddel) wordt bereikt door de sterke aantrekkingskracht van het sorbens, dat in verbinding staat met de verdampers. Dit proces verloopt spontaan door het drukverschil tussen verdampers en absorber.



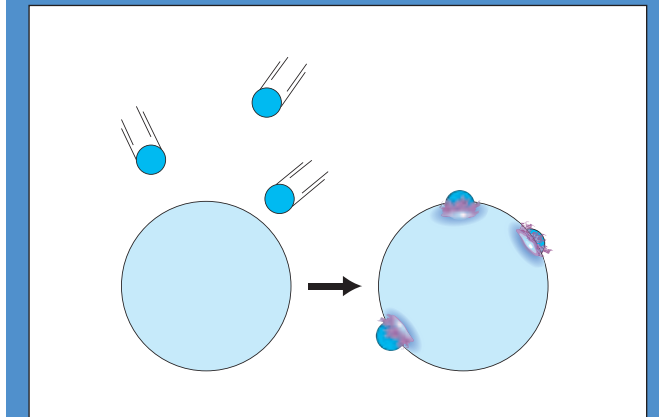
Figuur 23 Schematische weergave Vuilleumiersysteem. Bron: ECN



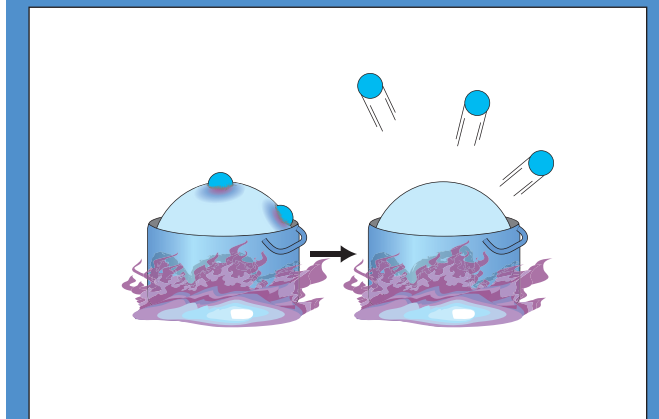
Figuur 24 Prototype van een Vuilleumier-warmtepomp. Bron: Universiteit van Dortmund

Warmte-effecten bij sorptie

Bij de binding van een sorbaat in of aan een sorbens komt warmte vrij. Deze sorptiewarmte is vergelijkbaar met de warmte die vrijkomt bij condensatie van de damp, aangevuld met een extra warmte-effect ten gevolge van de binding met het sorbens. Het proces van sorptie kan worden omgekeerd door het sorbens met gebonden sorbaat in temperatuur te verhogen, waarbij het opgenomen sorbaat weer wordt vrijgemaakt. Dit is weergegeven in figuren 25a en 25b.



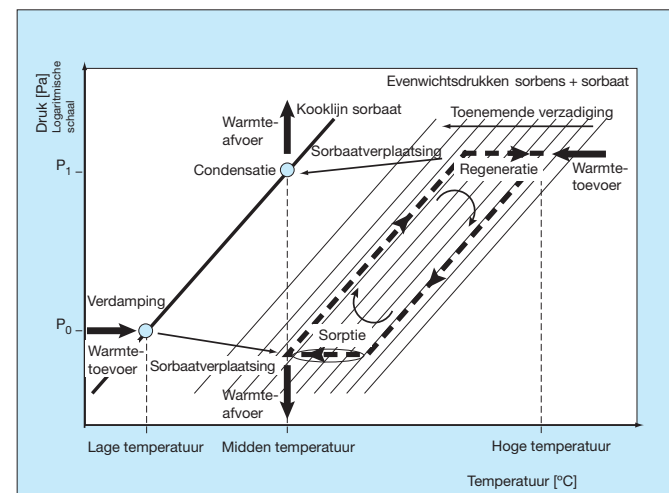
Figuur 25a Weergave van de warmte-effecten die met absorptie gepaard gaan. Bron: ECN



Figuur 25b Weergave van de warmte-effecten die met desorptie gepaard gaan. Bron: ECN

Door de sorptie van gas/damp aan het sorbens wordt het drukverschil geleidelijk minder. Vanaf een bepaalde mate van verzadiging moet het sorbens weer geregenereerd worden. Dit gebeurt door het sorbens met het opgenomen sorbaat in temperatuur te verhogen, waarbij het sorbaat weer als damp vrijkomt. De druk waarbij sorbaat vrijkomt is zodanig dat het sorbaat bij een hogere temperatuur dan die van de verdamper tot condensatie kan worden gebracht. Het sorbens is dan geregenereerd en kan vervolgens opnieuw worden gebruikt voor sorptie van het sorbaat.

Het hierboven beschreven kringproces is in figuur 26 weergegeven. Dit is een druk-temperatuursamenstellingsdiagram (PTx-diagram; ook de termen isosterendiagram of *isosteric-chart* worden gehanteerd). Het diagram geeft de druk-temperatuurrelatie weer voor een combinatie van sorbens en sorbaat bij constante samenstelling (concentratie of verzadiging) van sorbaat in (of aan) het sorbens. Doorgaans is de evenwichtsligging afhankelijk van de hoeveelheid opgenomen sorbaat. Dan worden de lijnen voor verschillende sorbaatgehalten weergegeven. Bij een hoge concentratie van sorbaat (hoge mate van verzadiging) zal de betreffende isosterlijn dichterbij de kooklijn van het zuivere sorbaat komen te liggen.



Figuur 26 Schematische weergave van het kringproces voor een sorptiewarmtepomp. Bron: ECN

De thermisch gedreven sorptiewarmtepomp kent drie temperaturniveaus waarbij warmte wordt toe- of afgevoerd. Bij de lage temperatuur wordt door verdamping van het sorbaat warmte opgenomen in het systeem (door warmteonttrekking aan de omgeving). Bij de hoge temperatuur wordt eveneens warmte toegevoerd voor regeneratie van het sorbens. Bij de middentemperatuur wordt warmte afgevoerd uit het systeem bij de condensor en bij de absorber.

Afhankelijk van de ligging van de lage temperatuur en de middentemperatuur kan een sorptiewarmtepomp voor verwarmingsdoeleinden worden gebruikt of voor koeling. De technologie is in principe ook omkeerbaar toe te passen: koeling in de zomerperiode en verwarming in de winterperiode. Bepalend voor de toepasbare temperaturniveaus en daarmee het inzetbereik van een sorptiewarmtepomp is de ligging van de evenwichtslijnen in het PTx-diagram.

De efficiency van een sorptiewarmtepomp voor verwarming, aangeduid als COP, is de verhouding van geleverde warmte op de middentemperatuur, gedeeld door de hoeveelheid toegevoerde warmte op hoge temperatuur.

$$COP = \frac{Q_{\text{absorptie}} + Q_{\text{condensatie}}}{Q_{\text{regeneratie}}}$$

De COP heeft een waarde groter dan 1.

Voor koeltoepassingen wordt de efficiency (COP_c) uitgedrukt als verhouding van de onttrokken warmte bij lage temperatuur gedeeld door de hoeveelheid toegevoerde warmte op hoge temperatuur.

$$COP_c = \frac{Q_{\text{verdamping}}}{Q_{\text{regeneratie}}}$$

De systeemuitvoering zoals hierboven beschreven, is de meest voorkomende, de zogenaamde *single-stage* uitvoering. De COP_c heeft in deze uitvoering meestal een waarde kleiner dan 1. Afhankelijk van het sorbens en sorbaat worden ook andere varianten toegepast. Enkele worden hierna besproken.

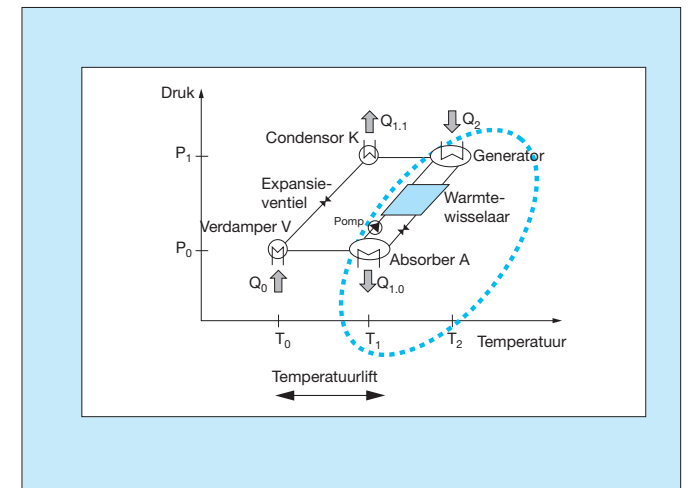
3.4.2 Vloeistofsorptiesystemen

Vloeistofsorptiesystemen, ook wel absorptiewarmtepompen genoemd, onderscheiden zich van vastestof-sorptiesystemen (adsorptiewarmtepompen) door hun gebruik van een vloeibaar sorbens. Het voordeel hiervan is dat de vloeistof door het systeem kan worden verplaatst. Hierdoor hoeft alleen het sorbens tussen de beladingsfase en de ontladingsfase te worden opgewarmd of afgekoeld, en niet de hele reactor. Ook kan het systeem voorzien worden van tegenstroom vloeistof-vloeistofwarmtewisselaars, waardoor een groot deel van de warmte van het sorbens eenvoudig kan worden teruggewonnen.

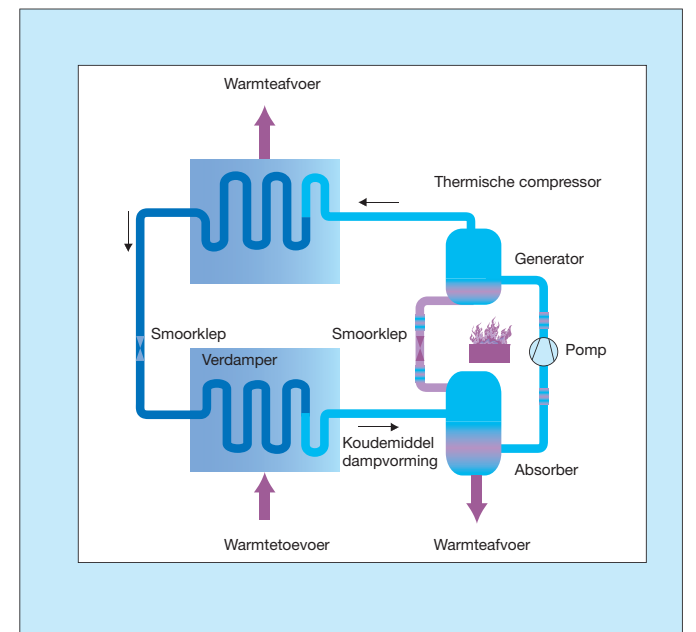
Ammoniak-water en lithiumbromide-water zijn de meest gebruikte sorbentia voor vloeistofsorptie. Figuur 27 geeft de absorptiecyclus voor ammoniak-water weer. De linker druk-temperatuurlijn geeft de damplijn voor zuivere ammoniak weer. De twee rechterlijnen geven de damplijn voor water met relatief veel (links) of weinig (rechts) ammoniak weer. Hoe meer ammoniak het water bevat, des te dichterbij de lijn van ammoniak zal liggen. Wanneer het ammoniak-watermengsel tot T₁ wordt afgekoeld, daalt de druk tot onder de druk in de ammoniakverdampers en zal ammoniak verdampen en vervolgens worden geabsorbeerd door het ammoniak-watermengsel, totdat de druk van het mengsel bij T₁ gelijk is aan de druk van de ammoniak bij T₀. Vervolgens wordt het mengsel verwarmd tot T₂ waar het een hogere druk heeft dan ammoniak bij T₁, de temperatuur van de condensor. Er zal nu ammoniak verdampen uit het mengsel totdat de dampdruk van het mengsel bij T₂ gelijk is aan de ammoniakdampdruk bij T₁. Nu kan het mengsel weer worden afgekoeld tot T₁ en ammoniak absorberen. Door het mengsel in tegenstroom door een warmtewisselaar te leiden kan een groot deel van de warmte worden teruggewonnen.

3.4.3 Ammoniak-watersystemen

In het ammoniak-waterabsorptieproces vormt ammoniak het sorbaat (of koudemiddel) en water het sorbens. Ammoniak (NH₃) wordt gemakkelijk opgenomen (geabsorbeerd) in water. Hierbij komt oploswarmte vrij, bij een temperatuur die hoog genoeg is om de warmte aan het verwarmingssysteem over te dragen. Door de ammoniak-wateroplossing te verhitten (met bijvoorbeeld gas) gaat de ammoniak over in de gasfase bij hoge druk en kan dan condenseren waarbij de condensatiewarmte aan



Figuur 27 Cyclus van een absorptiewarmtepomp. Bron: ECN



Figuur 28 Weringsprincipe ammoniak-waterabsorptiewarmtepomp. Bron: BDH

een verwarmingssysteem wordt overgedragen. De gecondenseerde ammoniak gaat via een drukverlaging naar een verdamper. Het verdampen van ammoniak op lage temperatuur en druk vraagt warmte. Deze warmte wordt aan de omgeving (lucht, bodem) onttrokken. De beschrijving hierboven gaat uit van toepassing als verwarming, maar is ook toepasbaar voor koelen en vriezen. De warmteonttrekking bij de verdamper gebeurt dan bij een lagere temperatuur en druk.

Voor het verhogen van de efficiency ten opzichte van het basisproces wordt in moderne systemen interne warmtewisseling toegepast (GAX, *Generator Absorber heat exchanger*).

Toepassingsgebied

De dampdruk van zuivere ammoniak bedraagt bij kamertemperatuur ongeveer 8 bar en bij $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ altijd nog 1 bar. Dit maakt dat ammoniak-watersystemen geschikt zijn voor koeltoepassingen tot zeer lage temperatuur. In industriële koelinstallaties worden ze al meer dan honderd jaar gebruikt. Vriezen tot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ is mogelijk met een *single-stage* systeem. Systemen voor *double-stage* ammoniakkoeling liggen op de tekentafel. Deze kunnen tot nóg lagere temperaturen koelen, maar ze zijn nog niet op commerciële basis toegepast.



Figuur 29 Afbeelding van een gasgestookte reversibele ammoniak-water lucht/water absorptiewarmtepomp. Bron: Techneco

De ammoniak-watersystemen die oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor koudelevering in de gebouwde omgeving, worden nu doorontwikkeld voor gecombineerde levering van koude en warmte. Ammoniak-watersystemen kunnen bij lage bron-temperaturen (tot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) nog functioneren. De systemen kunnen zowel voor verwarming als voor koeling worden ingezet. De warmteafgifte van de warmtepompen ligt tussen 30 en $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Met warmteafgifte op $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ligt ook het aanmaken van warm tapwater nog binnen bereik.

Schaalgrootte

De ammoniak-watersystemen voor industriële koeling leveren koelvermogens van 100 kW tot enkele MW. Voor verwarmingstoepassingen levert een fabrikant een systeem voor de gebouwde omgeving met een verwarmingsvermogen van 35 kW . De diffusie-absorptiewarmtepomp (DAWP) is een ontwikkeling voor toepassing in eengezinswoningen, met 4 kW verwarmingsvermogen. Deze technologie, afgeleid van de camping- of hotelkoelkast, maakt gebruik van helium als hulpgas. Hierdoor heeft het systeem geen pomp nodig. De warmtepomp heeft een gasbrander om piekvermogens te kunnen leveren en warm tapwater te maken.

Rendementen

De COP van een gasabsorptiewarmtepomp in verwarmingsbedrijf ligt tussen $1,2$ en $1,6$. Bij nominale bedrijfscondities (brontemperatuur $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en warmtelevering bij $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) bedraagt de COP $1,4$. In de koelmodus haalt de gasgestookte warmtepomp een COP_c van $0,67$. Voor de DAWP wordt een gemeten jaargemiddelde COP van $1,3$ gemeld.

Ontwikkelingsstadium

De gasabsorptiewarmtepomp is commercieel verkrijgbaar en wordt in Nederland toegepast in zowel de utiliteitsbouw als in de collectieve woningbouw. De DAWP is in Nederland in diverse veldtests toegepast. In Duitsland is recentelijk ook een veldtest uitgevoerd. Momenteel wordt de tweede generatie DAWP ontwikkeld. Deze zal 10 kW verwarmingsvermogen leveren, warm tapwater kunnen maken en geen piekbrander meer bevatten.

In de Verenigde Staten wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een ammoniak-waterabsorptiesysteem voor huishoudelijke toepassing.

Dit systeem voor verwarmen en koelen heeft een verwarmingsvermogen van 18 kW en een COP van $1,4$. Informatie over veldtestresultaten en een eventuele marktintroductie is nog niet beschikbaar.

3.4.4 Lithiumbromide-watersystemen

Lithiumbromide-watersystemen werken op dezelfde wijze als ammoniak-watersystemen, met dit verschil dat hier water het sorbaat is en lithiumbromide (LiBr) het sorbens. Door de lage dampdruk van water en het bevriezen van water beneden $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, kan dit systeem niet worden toegepast voor diepkoeling of vriezen; het is vooral geschikt voor (comfort)koeling. Ook is het proces geschikt voor het opwaarderen van laagwaardige warmte naar een hogere temperatuur en het opwaarderen van warmte op omgevingstemperatuur ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$) naar een temperatuurniveau voor lagetemperatuurverwarming ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

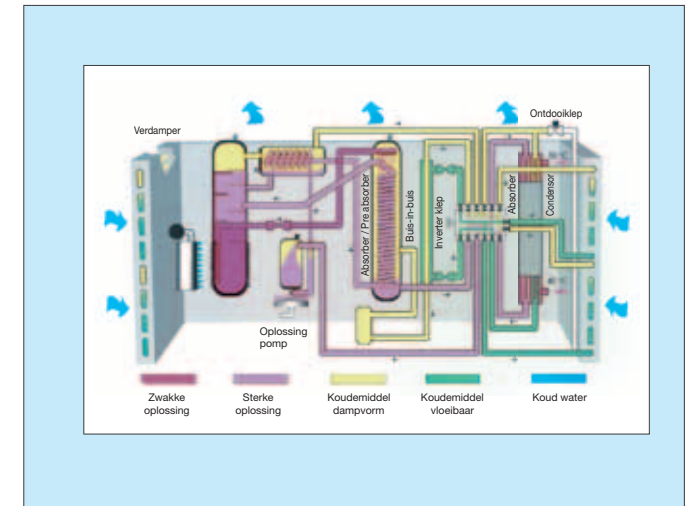
LiBr-H₂O-systemen kunnen op twee manieren worden aangedreven: door warm water (bijvoorbeeld uit een zonnecollector of een WKK-installatie) of door een directe gasverwarming. De met warm water aangedreven LiBr-H₂O-systemen maken gebruik van een *single-effect* systeem zoals eerder in dit hoofdstuk beschreven, terwijl de meeste direct gasgestookte LiBr-H₂O-warmtepompen gebruikmaken van een *double-effect* systeem. De COP van een *single-effect* systeem bedraagt $1,7$. Met een *double-effect* systeem een COP van $2,2$ haalbaar is. Voor *single-effect* systemen bedraagt de minimale aandrijftemperatuur meestal 80 tot $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Voor *double-effect* systemen een minimale aandrijftemperatuur van 130 tot $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ nodig is.

Toepassingsgebied en schaalgrootte

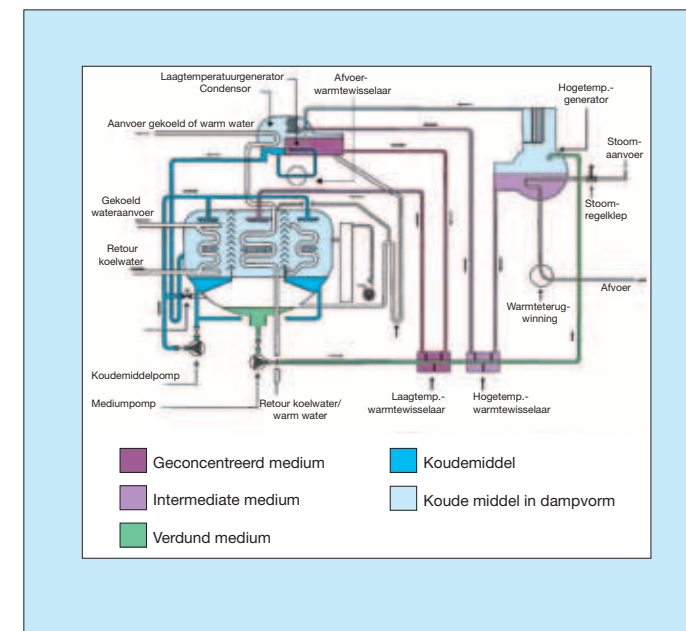
LiBr-H₂O-systemen worden zowel in de industrie als in de gebouwde omgeving toegepast. Hoewel de meeste systemen worden ingezet voor koeltoepassingen, zijn er ook systemen voor verwarming of een combinatie van verwarmen en koelen beschikbaar. In Novosibirsk, Rusland, is een stoomaangedreven, LiBr-H₂O-warmtepomp in bedrijf met een vermogen van 2 MW , die warm water van $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ produceert.

Ontwikkelingsstadium

LiBr-H₂O-systemen zijn commercieel verkrijgbaar voor toepassing in zowel de woningbouw als de utiliteitssector. Figuur 33 (pagina 58) toont een LiBr-H₂O-koeler voor huishoudelijk en kleinzakelijk gebruik met een vermogen van 16 tot 115 kW .



Figuur 30 Werkingsschema van de lucht/waterabsorptiewarmtepomp. Bron: Techneco



Figuur 31 Cyclusdiagram van een stoomaangedreven, double-effect LiBr-H₂O-systeem. Bron: Thermax

3.4.5 ASUE gasabsorptiewarmtepomp

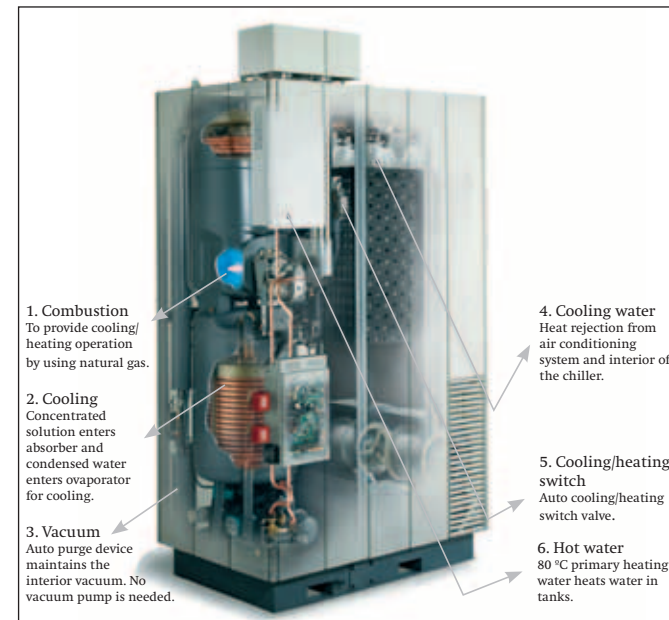
Het prototype van de gasabsorptiewarmtepomp (GAWP) van ASUE is gepresenteerd op de IEA Heat Pump Conference 2008 in Zürich. Deze gasgestookte warmtepomp maakt gebruik van een vloeistofcyclus. Details over de gebruikte stoffen zijn niet openbaar gemaakt.

Toepassingsgebied

De GAWP is ontwikkeld voor ruimteverwarming in woningen. De warmtepomp kan ook worden ingezet voor koeling van een woning. Toepassing van de GAWP wordt beoogd in zowel de bestaande woningbouw als in nieuwbouwwoningen. Het principe is bruikbaar met diverse bronnen (lucht of bodem) en kan warmte of koude afgeven aan bijvoorbeeld de lucht of aan een systeem voor vloerverwarming of -koeling.

Schaalgrootte

Het GAWP-prototype levert een verwarmingsvermogen van 2 tot 4 kW. Het koelvermogen ligt rond 1,5 kW bij koudelevering tussen 10 tot 15 °C.



Figuur 32 Direct gestookte LiBr-H₂O chiller/heater ontwikkeld door Jiao Tong Universiteit, Shanghai. Bron: Broad

Rendementen

De GAWP levert warmte bij een temperatuur van 35 tot 50 °C. In een testopstelling is een bodemwarmtewisselaar met een temperatuur van 6 tot 8 °C als bron toegepast. De temperatuurlift bedraagt 28 °C, waarbij een COP van 1,45 wordt bereikt. Voor koeling is de COP_c 0,43.

Ontwikkelingsstadium

De GAWP bevindt zich in het stadium van prototypes en veldtesten. Het systeem is nog niet commercieel verkrijgbaar.



Figuur 33 Gasgestookte absorptiewarmtepomp van Broad, voor huiselijke toepassingen. Bron: BDH

3.5 Vastestof-sorptiewarmtepomp

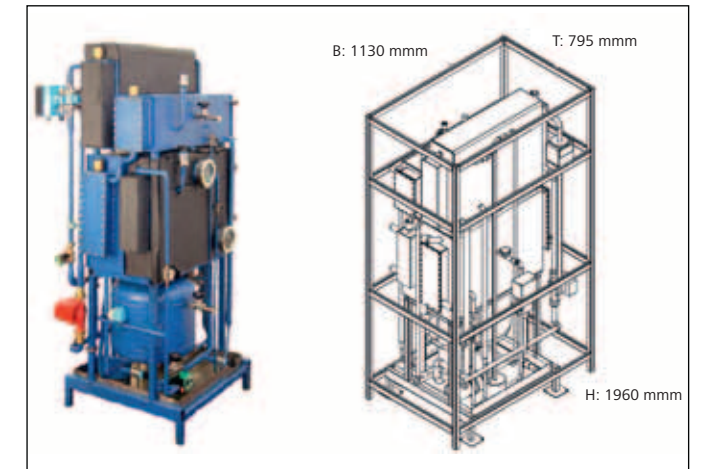
Vastestof-sorptiewarmtepompen onderscheiden zich van vloeistof-sorptiewarmtepompen door het gebruik van vaste sorbentia. Vaste stoffen kunnen niet, zoals bij vloeistof-sorptie, worden rondgepompt van absorber naar generator voor het doorlopen van de thermische compressiestap. Vaste sorbentia zijn daarom gefixeerd op of in een warmtewisselaar die afwisselend het sorbens verwarmt tot de hoge temperatuur en weer koelt naar middentemperatuur.

Sorptie aan een vaste stof is een batchmatig proces. Het verloopt net zolang totdat er een evenwichtssituatie is opgetreden tussen sorbens en sorbaat. Voor het verkrijgen van een continu werkende warmtepomp op basis van vastestof-sorptie wordt de warmtepomp doorgaans als een dubbele batchreactor uitgevoerd. De twee batches met sorbens worden dan in tegenfase bedreven, zodat er altijd één batch wordt geregenereerd terwijl in de andere batch het sorptieproces loopt.

Het gebruik van vaste sorbentia geeft de warmtepomp een grotere oriëntatierijheid, wat bijvoorbeeld in mobiele toepassingen een voordeel is. De meest gebruikte en meest bekende vaste sorbentia zijn silicagel en zeolieten. Deze worden voornamelijk gebruikt in combinatie met water. Beide systemen komen hierna uitgebreider aan bod. Alternatieve, innovatieve sorptiesystemen op basis van andere sorbentia en/of sorbaten worden in paragraaf 3.6 behandeld.

3.5.1 Silicagel-wateradsorptiewarmtepomp

Silicagel is een hoogporeus glasachtig materiaal opgebouwd uit silicium en zuurstof, en kan tot 35 gewichtsprocent water binden. Het werkingsprincipe van silicagel-wateradsorptiewarmtepompen is gebaseerd op de aantrekkingskracht die silicagel, als algemeen bekend droogmiddel, uitoefent op waterdamp. Bij verhitting van de silicagel kan het water er weer van worden afgestookt, wat al bij temperaturen vanaf 60 °C optreedt. Figuur 36 toont de schematische opbouw van een adsorptiewarmtepomp op basis van silicagel-water. Dit stoffenpaar wordt vaak toegepast in koelers en is qua opbouw representatief voor een vastestof-sorptiewarmtepomp. De figuur toont de verdampers, de condensor en twee compartimenten gevuld met silicagel, aangebracht op een warmtewisselaar. Kleppen tussen de compartimenten



Figuur 34 Absorptiewarmtepomp van de Duitse firma Sonnenklima, aangedreven door laagwaardige warmte. Bron: Sonnenklima



Figuur 35 Gasabsorptiewarmtepomp in de testopstelling bij ECN (links de GAHP, rechts een CV-ketel). Bron: ECN

zorgen ervoor dat de waterdampstroom in de juiste richting stroomt. Net als bij LiBr-H₂O-systemen wordt het sorptieproces in zijn geheel bij lage druk bedreven. Dit betekent dat de constructie vacuümdicht is afgesloten en bestand moet zijn tegen onderdruk.

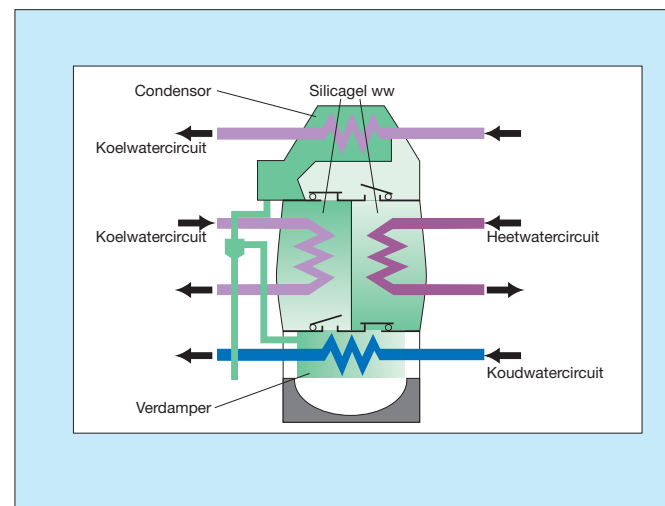
Tijdens bedrijf van de warmtepomp worden de twee silicagel-compartimenten in tegenfase achtereenvolgens doorstroomd met heet water en met koel water. Op deze wijze ontstaat er een quasi-continue dampstroom vanaf de verdamper naar het gekoelde sorbens en vanaf het verwarmde sorbens naar de condensor. Het condensaat loopt via een drukvereffening weer naar de verdamper. Aan het einde van de regeneratie- en sorptie-fase wisselen de twee silicagel compartimenten van temperatuur, waarbij tussen de reactoren warmteterugwinning wordt toegepast.

De bedrijfscyclus van een silicagel-wateradsorptiewarmtepomp is in figuur 37 weergegeven. Hier vindt warmtetoever plaats bij 85 °C, warmteafgifte bij 35 °C en koudeproductie bij 5 °C. De belading van de silicagel met water varieert in een cyclus tussen 3 en 15% water.

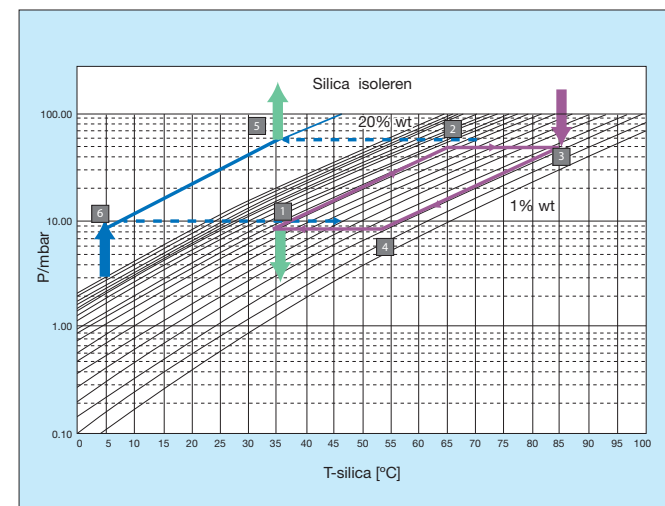
Nadeel van water als sorbaat is het risico van bevriezen bij 0 °C. Hierdoor is koelen onder het vriespunt geen optie voor silicagel-watersystemen. Om vriezen toch mogelijk te maken, wordt methanol onderzocht als alternatief sorbaat. De ontwikkeling van silicagel-methanolkoelers verkeert echter nog in een pril stadium.

Toepassingsgebied

Silicagel-wateradsorptiewarmtepompen worden vrijwel uitsluitend toegepast voor het leveren van koeling voor kantoorgebouwen en industriële processen. De toepassing als warmtepomp is beperkt door de geringe temperatuurlift die met dit stoffenpaar kan worden gehaald. Als koelmachine wordt deze warmtepomp het meest toegepast in situaties waar een goedkope (rest)warmtebron van relatief lage temperatuur (vanaf 55 °C) voorhanden is. De koudelevering vindt plaats op minimaal 5 °C. Lagere temperaturen zijn niet realiseerbaar gezien het risico van bevriezing van het water (sorbaat).



Figuur 36 Schematische opbouw van een adsorptiekoelmachine. Bron: ECN



Figuur 37 Isosterendiagram van een silicagel-watersysteem met daarin aangegeven de bedrijfscyclus van een adsorptiekoelsysteem. Bron: ECN

Er is één geval bekend waarbij een 5 kW silicagel-water-systeem als omkeerbare warmtepomp voor koeling en verwarming wordt ingezet. (Nunez et al., Eurosun 2008: *Heating and Cooling with a Small Scale Solar Driven Adsorption Chiller Combined with a Borehole System*). Voor de verwarmingstoepassing wordt de verdamper gekoppeld aan een bodemwarmtewisselaar en wordt een lagetemperatuur warmteafgiftesysteem toegepast. Silicagel-waterwarmtepompen worden momenteel niet geleverd als direct gasgestookte warmtepomp.

Schaalgrootte

De technologie is beschikbaar in het vermogensbereik van 5 tot 500 kW koudelevering en wordt voornamelijk toegepast voor koeling van gebouwen. In enkele gevallen wordt de techniek ingezet voor proceskoeling in de industrie. Kleinschalige systemen voor minder dan 25 kW koude zijn pas sinds kort op de markt.

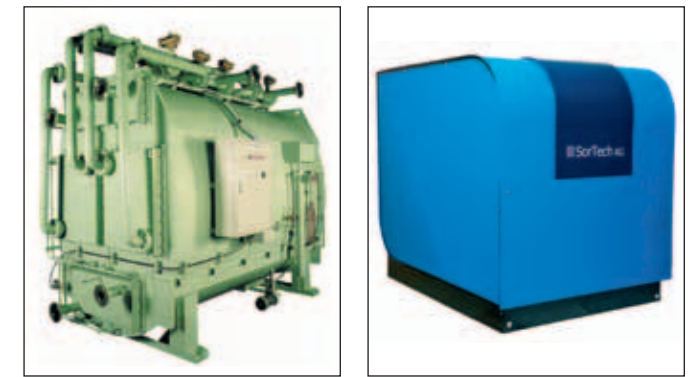
Rendementen

De COP_c van een adsorptiekoelsysteem voor koeltoepassing ligt tussen 0,3 en 0,6. De efficiency wordt sterk beïnvloed door de temperaturen waarbinnen de cyclus verloopt. Vooral in situaties waar een warmtebron beschikbaar is die een te lage temperatuur heeft voor efficiënte aandrijving van een LiBr-H₂O-adsorptiekoeler, vormt silicagel-water een alternatief.

Bij de toepassing van deze systemen met aandrijving op basis van warmte dient het parasitaire elektriciteitsverbruik voor pompen en ventilatoren zo laag mogelijk te zijn, omdat het overall rendement van de installatie hierdoor sterk (negatief) wordt beïnvloed.

Ontwikkelingsstadium

Reeds in het begin van de vorige eeuw was bekend dat met silicagel en water een adsorptiekoelsysteem gemaakt kon worden. Vanaf het begin van de jaren tachtig zijn de eerste machines in Japan ontwikkeld en geïnstalleerd, waarbij rest-warmte voor de aandrijving wordt toegepast. Daarna zijn er in Europa ook tientallen installaties geplaatst, veelal gekoppeld aan WKK-systemen. De laatste jaren zijn de ontwikkelingen voornamelijk gericht op koppeling met mini-WKK- en micro-WKK-systemen.



Figuur 38 Voorbeelden van adsorptiekoelmachines. Bron: Solarnext



Figuur 39 Een ontwikkeling van ECN: 2,5 kW silicagel-waterkoeler voor toepassing in de gebouwde omgeving. Bron: ECN

3.5.2 Zeoliet-waterwarmtepompen

De naam zeoliet is afkomstig uit het Grieks. 'Zein' betekent koken en 'lithos' betekent steen. De naam verwijst naar het vermogen van een stof om veel water te kunnen bevatten, dat bij verhitting vrijkomt. Er bestaan ongeveer vijftig natuurlijke zeolieten en meer dan honderd kunstmatige. Een zeoliet is opgebouwd uit silicium, aluminium en zuurstofatomen die veelal een tetraëder (een ruimtelijke, vierhoekige figuur met vier driehoekige vlakken) vormen. Hierdoor krijgt het zeoliet een zeer poreuze structuur. Deze tetraëder 'kooien' en poriën lenen zich uitstekend voor adsorptie van water en andere sorbaten.

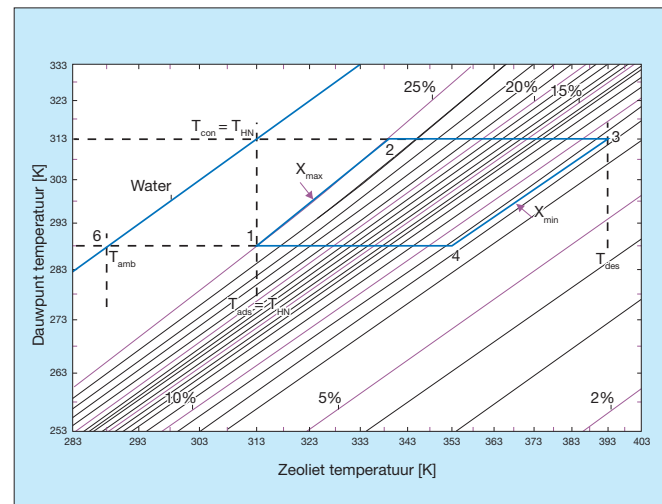
Het werkingsprincipe van zeoliet-watersystemen is vergelijkbaar met dat van silicagel-watersystemen, waarbij zeoliet als sorbens wordt gebruikt. Zeoliet-watersystemen bieden een aantal voordelen. Zo bestaan er veel verschillende soorten zeolieten, elk met hun eigen sorptiekarakteristiek. Hierdoor kan het zeoliet goed worden afgestemd op de toepassing. Zo kan het systeem bijvoorbeeld sneller water opnemen of afstaan of in elke cyclus grotere hoeveelheden vocht adsorberen of desorberen. Daarnaast zijn zeolieten veelal bestand tegen hoge temperaturen,

in tegenstelling tot silicagel dat zijn structuur verliest boven 150 °C. Dit maakt zeoliet geschikt voor aandrijving met behulp van directe gasverwarming of verwarming door middel van rookgassen. Een hogere regeneratietemperatuur betekent ook dat het vochtgehalte in het zeoliet na regeneratie verder kan worden teruggebracht. Dit leidt tot de volgende prestatieverbeteringen:

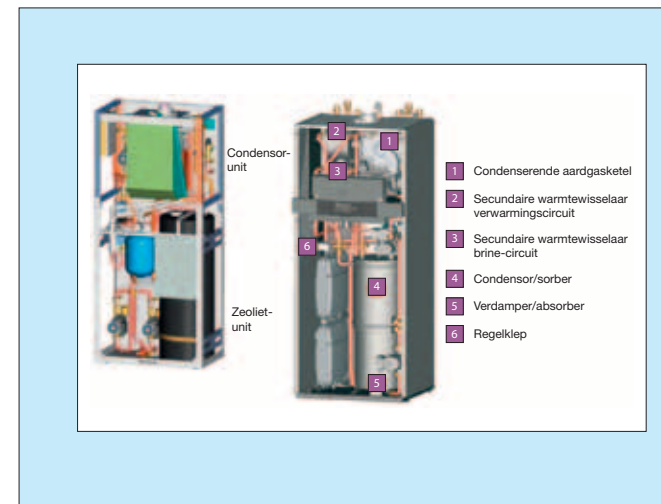
- Er kan een lagere koeltemperatuur worden bereikt.
- Het proces kan worden aangedreven bij hogere omgevingstemperaturen.
- Er wordt meer vocht en dus meer warmte per cyclus opgenomen of afgestaan.
- De cyclustijd kan worden verkort en daarmee de vermogensdichtheid vergroot.

Toepassingsgebied

Zeolietwarmtepompen worden toegepast voor verwarming en/of koeling. Voor koeltoepassingen liggen de laagst bereikbare temperaturen rond de 4 °C, vanwege het gebruik van water als koudemiddel (en dus het risico op bevroering bij lagere temperaturen). Voor verwarming betekent dit ook dat er een bronwarmte voor de verdamper aanwezig moet zijn die boven 0 °C ligt.



Figuur 40 Isosterendiagram voor zeoliet DDZ70 met water in een warmtepomptoepassing. In de cyclus is de aandrijftemperatuur 120 °C, warmtelevering bij 40 °C bij een buitentemperatuur van 6 °C. Bron: JSHPC 2002



Figuur 41 Twee ontwerpen van zeoliet-gaswarmtepompen voor toepassing in de gebouwde omgeving. Bron: Viessmann

Meestal wordt hiervoor een bodemwarmtewisselaar gebruikt. De systemen zijn ontworpen voor verwarmingssystemen met een aanvoertemperatuur tot maximaal 75 °C.

Schaalgrootte en rendementen

De momenteel in ontwikkeling zijnde zeolietwarmtepompen zijn bedoeld voor ruimteverwarming in eengezinswoningen. De warmtelevering van de warmtepomp varieert van 1 tot 5 kW. Hogere piekvermogens worden desgewenst door een hulpbrander geleverd. De COP van de zeolietwarmtepompen die momenteel worden ontwikkeld, bedraagt circa 1,3.

Ontwikkelingsstadium

Er zijn momenteel diverse fabrikanten die een zeolietwarmtepomp ontwikkelen. Vaillant heeft een aantal systemen aan een veldtest onderworpen. De verwachting is dat in 2012 de eerste producten op de markt komen. De systemen gebruiken een eenvoudige zeolietmodule. Dit betekent dat het warmtepompproces periodiek verloopt. Door de combinatie van een warmtepomp met een modulerende HR-ketel ontstaat een hybride systeem.

3.6 Alternatieve vastestof-sorptiesystemen

Er zijn veel ontwikkelingen in de richting van nieuwe combinaties van sorbentia en sorbaten. Twee van deze ontwikkelingen worden hier besproken: vastestof-ammoniak en LiCl-water.

3.6.1 Vastestof-ammoniak

In een vastestof-ammoniakwarmtepomp wordt ammoniak geadsorbeerd aan een vaste stof. Doorgaans worden als vaste stof koolstof of ammoniakaten (zouten van ammoniak) gebruikt. Het gebruik van ammoniak heeft als voordeel ten opzichte van water dat er met aanzienlijk hogere drukken kan worden gewerkt. De drukken in ammoniaksystemen liggen tussen 1 en 8 bar. Ook befrist ammoniak niet snel.

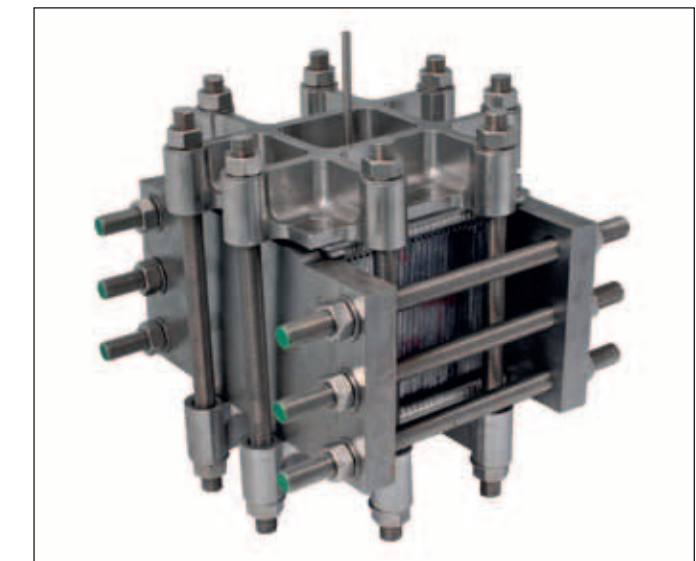
Koolstof-ammoniak

De koolstof-ammoniaksystemen zijn gebaseerd op fysisorptie. Hierin wordt de ammoniak aan het oppervlak van het koolstof gebonden onder invloed van Vanderwaalskrachten (zwakke, niet-elektrostatische krachten tussen atomen of moleculen). De behandeling die het koolstof heeft ondergaan bepaalt de sorptiekarakteristieken van de koolstof. In vrijwel alle

koolstof-ammoniaksystemen vervult koolstof een dubbelfunctie: het functioneert als sorbens voor het ammoniak maar ook als warmtegeleider. Koolstof heeft als nadeel dat het een kwetsbaar materiaal is. Om die reden worden ook alternatieve sorbentia onderzocht, zoals zeoliet. Veel zeolieten zijn echter niet bestand tegen ammoniak.

Koolstof-ammoniaksystemen worden nog maar op beperkte schaal toegepast. Twee plaatsen waar veel onderzoek plaatsvindt naar koolstof-ammoniaksystemen zijn de Jiao Tong Universiteit in Shanghai, China en de Warwick University in Engeland.

In 2009 hebben de Warwick University en H₂O Venture Partners het bedrijf Sorption Energy opgericht met twee beoogde producten: een gasgestookte warmtepomp voor woningen en een door restwarmte aangedreven auto-airconditioner. In 2010 wordt het eerste prototype van de gasgestookte warmtepomp op basis van koolstof en ammoniak verwacht. De COP zal volgens modelberekeningen op 1,5 kunnen uitkomen. Het vermogen ligt tussen 7 en 11 kW.



Figuur 42 Voorbeeld van een koolstof-ammoniak sorbensreactor op basis van een plaatwarmtewisselaar voor gebruik in een gasgestookte adsorptiewarmtepomp. Bron: Warwick University

Zout-ammoniak

De zout-ammoniaksystemen zijn gebaseerd op chemisorptie. Dit betekent dat het ammoniak chemisch wordt gebonden aan het zout. Deze chemische binding levert een grotere hoeveelheid warmte dan bij de combinatie koolstof-ammoniak. Verder zijn er scherpe overgangen tussen beladen en ontladen toestand. Hierdoor wordt per kilo sorbent aanzienlijk meer ammoniak geregenereerd. Dit gaat wel ten koste van de flexibiliteit van het systeem: het systeem werkt alleen binnen beperkte temperatuurgebieden. Een ander nadeel van chemisorptie is dat er hysteresis optreedt. Dit betekent dat voor een gegeven temperatuur de druk waarbij ammoniak adsorbeert verschilt van de druk waarbij ammoniak desorbeert. Hierdoor zijn hogere regeneratietemperaturen nodig.



Figuur 43 Warmtetrafo van ECN met een vermogen van 1 kW.

Ten slotte zijn er nog hybride systemen waarin als vaste stof een koolstofstructuur fungeert met daarin zout. De ammoniak wordt chemisch gebonden aan het zout. De koolstof is er vooral voor het af- en aanvoeren van de warmte en het immobiliseren van het zout. Het heeft een beperkte invloed op de sorptie-karakteristiek van het systeem.

Zout-ammoniaksystemen bevinden zich nog in de prototype-fase. Twee plaatsen waar veel onderzoek wordt verricht naar zout-ammoniaksystemen zijn ECN en Jiao Tong Universiteit in Shanghai. Bij ECN wordt gewerkt aan dubbele zout-ammoniak warmtetransformatoren voor hergebruik van industriële restwarmte. De warmtetransformator pompt industriële restwarmte van lage druk stoom van 120 tot 140 °C naar middendruk stoom van 180 °C. Jiao Tong Universiteit richt zich op warmtepompen voor de productie van koude, met name in (vissers)schepen. Huidige prototype-systemen van ECN hebben een warmte-input van ongeveer 1 kW. Door opschaling is een COP van meer dan 0,25 haalbaar (de maximale COP van een warmtetransformator bedraagt ongeveer 0,5). De Jiao Tong Universiteit heeft een koeler ontworpen met een vermogen van 10 kW (bij -15 °C tot -20 °C), aangedreven met damp van 150 °C. De COP bedraagt hier 0,3.

3.6.2 LiCl-H₂O

In Zweden is een vloeistofsorptie/vastestofsorptie-warmtepomp ontwikkeld. In dit systeem wordt gebruikgemaakt van LiCl-H₂O, waarbij de vloeistof tijdens het regenereren overgaat in vaste stof. Daardoor heeft het systeem een thermische opslagfunctie. Het systeem is ontwikkeld voor gebruik van laagwaardige warmte van zonnecollectoren, stadsverwarming of WKK-systemen (met temperaturen van 75 °C of hoger). Van aandrijving door middel van directe gasverwarming is hierbij geen sprake.

Het systeem levert 25 kW verwarmingsvermogen en heeft een warmteopslagcapaciteit van 76 kWh. De COP bedraagt 1,6. Voor koudelevering is 10 kW beschikbaar, bij een COP_c van 0,7. Ook voor koude is een opslag tot 60 kWh beschikbaar. Met afmetingen van 120 cm breed, 80 cm diep en 160 cm hoog is het systeem behoorlijk compact (zie figuur 44). De eerste afzetmarkt voor zongedreven koeling is het Middellandse Zeegebied.



Figuur 44 LiCl-H₂O absorptiewarmtepomp. Bron: Nyteknik

Hoofdstuk 4

Ontwerpaspecten en toepassing in gebouwen

Warmtepompen zijn niet meer weg te denken uit de utiliteitsbouw. Dit is mede het gevolg van de vraag naar meer klimaatcomfort. Warmtepompen zijn zeer goed te combineren met zogeheten lagetemperatuursystemen en voorzien in veel gevallen ook in de vraag naar koeling. Ook de strengere wet- en regelgeving op het gebied van energieprestatie is een belangrijke stimulans. Dit hoofdstuk behandelt de belangrijkste ontwerpaspecten van warmtepompen in verschillende toepassingen.

4.1 Elektrisch of gasgedreven?

In de nieuwbouw worden vooral elektrische warmtepompen toegepast omdat hier relatief veel keuzevrijheid bestaat in de ontwerpfase. Ook in de bestaande bouw vindt de elektrische warmtepomp inmiddels zijn weg. Vaak worden relatief kleine warmtepompen ingezet met de buitenlucht als warmtebron, die in voor- en najaar de basislast voor hun rekening nemen. Een ketelinstallatie verzorgt de piekvraag tijdens de aanwarmingstrajecten en op de echt koude dagen in de winter. Ook levert de ketel meestal de warmte voor de productie van warm tapwater. Dergelijke systemen verminderen wel de CO₂-emissie, maar zijn economisch gezien niet altijd optimaal ontworpen. Dit is te wijten aan de sterk uiteenlopende kosten voor elektriciteit en (aard-) gas. Gerekend per energie-eenheid (bijvoorbeeld kWh) is de prijs van elektriciteit (tot 10.000 kWh/jr) ongeveer 3,5 keer zo

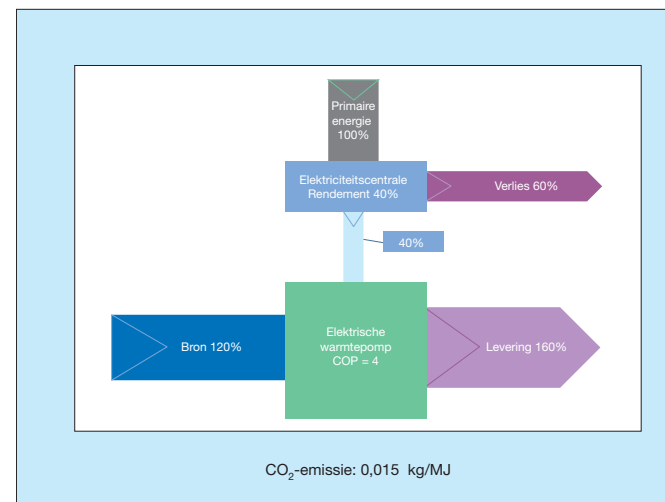
hoog als die van aardgas. Dit prijsverschil ontstaat doordat elektriciteit in een kapitaalintensieve centrale wordt geproduceerd (onder meer met aardgas), waarbij een groot deel van de primaire energie als warmte verloren gaat. Concreet betekent dit dat een elektrische warmtepomp een veel hoger rendement moet hebben om op hetzelfde energiekostenniveau uit te komen als een gasgedreven warmtepompsysteem.

Vooralsnog hebben gaswarmtepompen een aanzienlijk lagere CO₂-uitstoot, omdat de productie van elektriciteit bij de huidige brandstoffenmix meer CO₂ geeft dan de verbranding van aardgas. Op de lange termijn, als steeds meer elektriciteit uit duurzame bronnen wordt geproduceerd, zal dit verschil kleiner worden. Tegen die tijd zal de gasvoorziening echter ook deels zijn gebaseerd op groen gas uit duurzame bronnen.

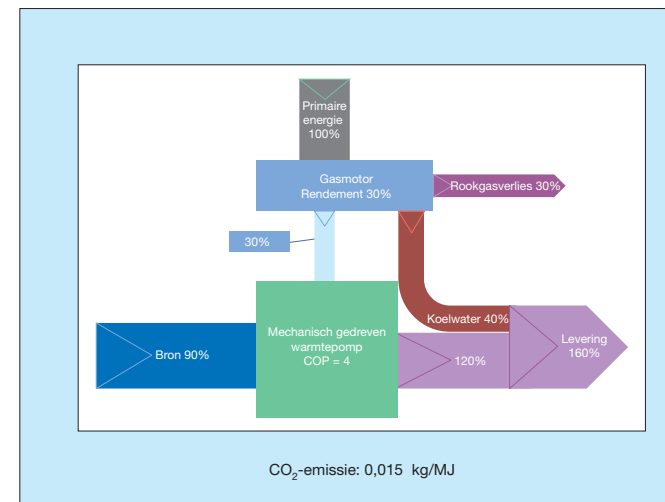
Zoals beschreven in paragraaf 3.1 zijn warmtepompen globaal te verdelen in systemen met een mechanische compressor en met een thermische compressor. Deze verdeling geldt ook voor gasgedreven warmtepompen. We onderscheiden gasmotorwarmtepompen (paragraaf 3.2 en 3.3) en gasabsorptie- en gasadsorptiepompen (paragraaf 3.4, 3.5 en 3.6). Bij het eerste concept wordt gas in een verbrandingsmotor omgezet in mechanische bewegingsenergie, die vervolgens een mechanische compressor aandrijft en het koudemiddel comprimeert. Dit type warmtepomp lijkt erg veel op een elektrische warmtepomp. Het verschil zit in de wijze waarop de mechanische compressor wordt aangedreven.

Absorptiesystemen maken gebruik van een systeem waarin een stoffenpaar (meestal water-lithiumbromide of ammoniak-water) in elkaar worden geabsorbeerd, waarbij warmte vrijkomt. Om deze stoffen weer te scheiden is warmte op een hoger temperatuurniveau nodig. Dergelijke systemen kennen grote interne warmtestromen en moeten daarom voorzien zijn van veel warmte-wisselend oppervlak. Dit leidt tot een hoger gewicht en meestal een lager rendement. Een groot voordeel van absorptiesystemen is dat er, afgezien van de oplossingspomp, geen bewegende delen in voorkomen. Hierdoor is er relatief weinig onderhoud nodig en is de betrouwbaarheid hoog. Bij toenemen-

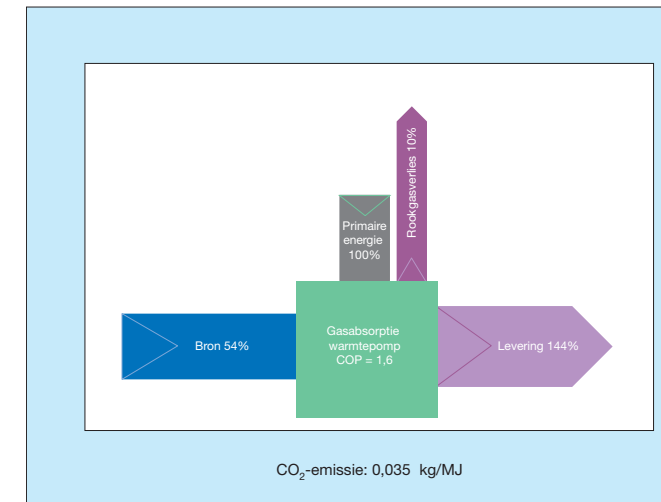
de schaalgrootte nemen bovendien de economische en energetische voordelen van absorptiesystemen toe. Een bijkomend voordeel is dat de (warmte)bron van absorptiesystemen relatief klein kan zijn. In onderstaande figuren zijn de warmtestromen weergegeven voor de verschillende typen warmtepompen, samen met de rendementen zoals die algemeen worden gehanteerd. In figuur 1 wordt de gebruikelijke brandstofmix (aardgas en steenkool) aan een elektriciteitscentrale aangeboden. Deze energiehoeveelheid wordt op 100 eenheden gesteld. De centrale (inclusief de distributie) heeft een elektrisch rendement van 42% op onderwaarde of 39% op bovenwaarde, in de figuur afgerond tot 40%. Dit betekent dat (op onderwaarde) 66% van de aangeboden primaire energie verloren gaat. Vervolgens wordt met deze elektriciteit een elektrische warmtepomp aangedreven met een COP (*Coefficient of Performance*, zie ook paragraaf 3.1) van 4. De warmtepomp levert dan 160 eenheden energie (120 eenheden worden onttrokken aan de omgeving). Dit betekent dat met 100 eenheden primare energie (de brandstoffenmix van de centrale) uiteindelijk 160 eenheden aan warmte worden geleverd. De PER (*Primary Energy Ratio*) bedraagt dan 1,6 (of 160%). Wordt met deze elektriciteit een elektrische absorptiewarmtepomp aangedreven (situatie 4) dan daalt de totale PER naar 0,64 (of 64%). Het systeem presteert energetisch gezien dus beduidend minder dan een conventioneel systeem.



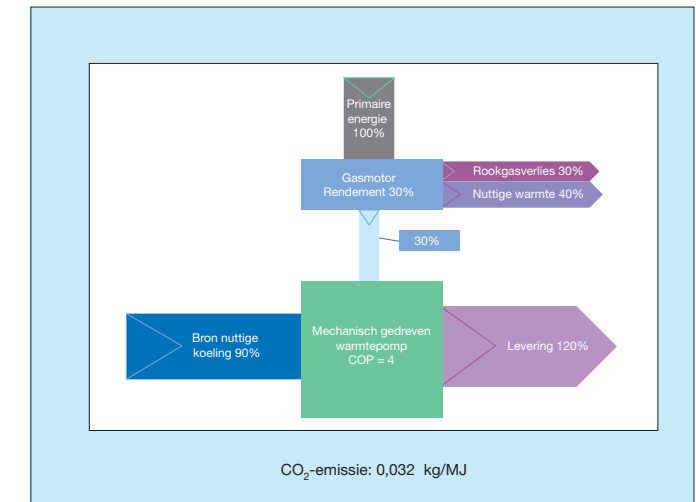
Figuur 1 Elektrische warmtepomp (vereenvoudigd rekenvoorbeeld met afgeronde getallen). Bron: TNO



Figuur 2 Gasmotorwarmtepomp (vereenvoudigd rekenvoorbeeld). Bron: TNO



Figuur 3 Gasabsorptiewarmtepomp (vereenvoudigd rekenvoorbeeld). Bron: TNO

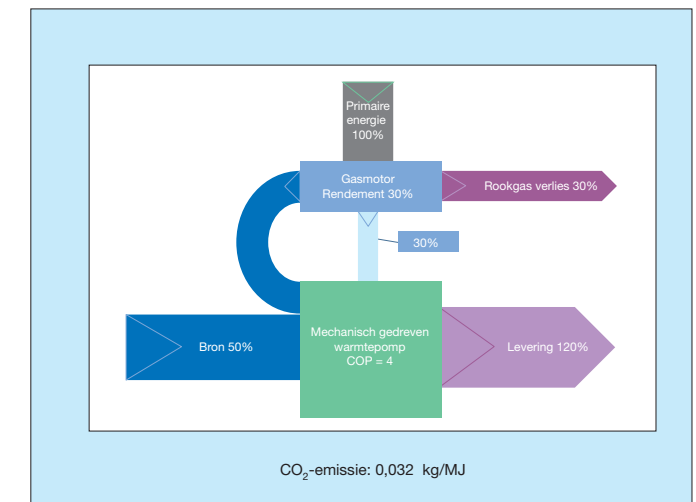


Figuur 5 Gasmotorwarmtepomp in bedrijf (vereenvoudigd rekenvoorbeeld). Bron: TNO

Bij een gasmotorwarmtepomp (figuur 2, 4 en 5) wordt aardgas omgezet in een mechanische beweging waarmee een compressor wordt aangedreven. Het totale rendement van deze omzetting is 30%. Van de aangeboden 100 eenheden energie komen 70 eenheden vrij als warmte. Een deel hiervan (30 eenheden) gaat via de rookgasafvoer naar de omgeving en het overige deel (40 eenheden) wordt afgegeven aan het water dat door de warmtepomp wordt verwarmd. Als het warmtepompdeel ook in deze situatie een COP heeft van 4, levert de warmtepomp 120 eenheden warmte. Samen met de warmte uit de gasmotor (40 eenheden) komt de totale nuttige hoeveelheid geleverde warmte op 160 eenheden. De PER bedraagt dus 1,6 (of 160%). Het rendement van dit systeem komt dus in theorie overeen met de elektrische warmtepomp in figuur 1. Opgemerkt moet worden dat het exacte rendement van een installatie in belangrijke mate afhankelijk is van de specifieke situatie en van de configuratie van de warmtepomp.

Bij standaard gasmotorwarmtepompen wordt de motorwarmte in verwarmingsbedrijf gebruikt om te voorkomen dat de verdampers bij lagere buitentemperaturen berijpt (figuur 5). In koelbedrijf of bij hogere buitentemperaturen wordt deze warmte doorgaans naar de omgeving afgevoerd en moet dus worden beschouwd als verlies. Vaak hebben deze systemen ook de mogelijkheid

om de motorwarmte via een separaat circuit af te voeren. Tijdens verwarmingsbedrijf bij hogere buitentemperaturen (als er geen warmte nodig is om berijping van de verdampers te voorkomen) kan dit deel van de motorwarmte ook nuttig worden gebruikt (figuur 4), bijvoorbeeld voor de productie van warm tapwater.



Figuur 4 Gasmotorwarmtepomp tijdens verwarmen bij lage buitentemperatuur (vereenvoudigd rekenvoorbeeld). Bron: TNO

Ook in koelbedrijf kan met een separaat circuit voor de motor-warmte een deel van deze warmte nuttig worden gebruikt (figuur 5). In deze situatie (koelen) wordt de warmte die de warmtepomp onttrekt naar de omgeving afgevoerd. Deze warmte kan niet nuttig wordt gebruikt.

Conclusie: het rendement van een gasmotorwarmtepomp is hoger dan dat van een gasabsorptiewarmtepomp en vergelijkbaar met dat van een elektrische warmtepomp.

Voor situaties waarbij gelijktijdig wordt verwarmd en gekoeld zijn gaswarmtepompen uitermate geschikt. Wanneer alleen de koelfunctie van belang is, heeft de elektrische warmtepomp de hoogste efficiency. Bij de keuze voor een type warmtepomp speelt de verhouding tussen warmte- en koudevraag een belangrijke rol. In tabel 3 is de verhouding aangegeven tussen

Aandrijving	Mechanische compressor	Thermische compressor
Gas	Gasmotorwarmtepomp PER 1,2 – 2,4	Absorptiewarmtepomp PER 1,3 – 1,8
Elektrisch	Elektrische compressie-warmtepomp PER 1,4 – 2,2	n.v.t.
Thermisch	n.v.t.	Adsorptiewarmtepomp PER 1,2 – 1,4

Tabel 1 PER van de verschillende typen warmtepompen bij verwarming. Bron: TNO

Aandrijving	Mechanische compressor	Thermische compressor
Gas	Gasmotorwarmtepomp PER 1,0 – 1,2	Absorptiewarmtepomp PER 0,2 – 0,7
Elektrisch	Elektrische compressie-warmtepomp PER 1,1 – 1,6	n.v.t.
Thermisch	n.v.t.	Adsorptiewarmtepomp PER 0,2 – 0,4

Tabel 2 PER van de verschillende typen warmtepompen bij koeling. Bron: TNO

Aandrijving	Mechanische compressor	Thermische compressor
Gas	Gasmotorwarmtepomp 0,33 – 0,45	Absorptiewarmtepomp 2,6 – 6,0
Elektrisch	Elektrische compressie-warmtepomp 1,25 – 1,35	n.v.t.
Thermisch	n.v.t.	Adsorptiewarmtepomp 3,5 – 6,0

Tabel 3 Verhouding tussen het verwarmings- en koelvermogen van verschillende typen warmtepompen ($P_{\text{verwarming}}/P_{\text{koeling}}$). Bron: TNO

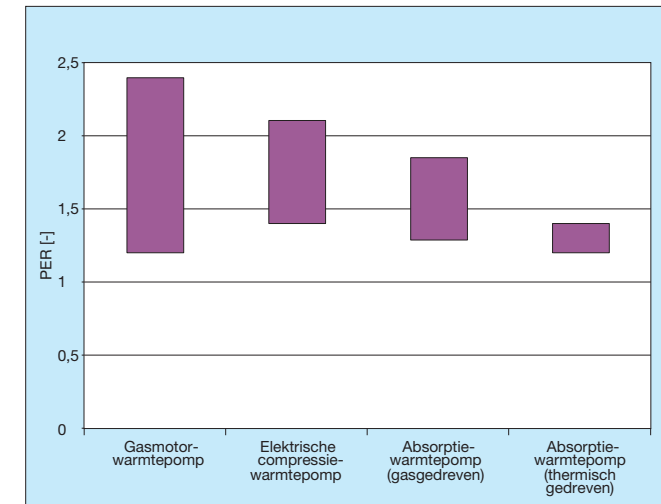
het verwarmingsvermogen en het gelijktijdig beschikbare koelvermogen. Een waarde kleiner dan 1 betekent dat het beschikbare koelvermogen groter is dan het beschikbare verwarmingsvermogen.

4.2 Ontwerpen in nieuwbouw en bestaande bouw

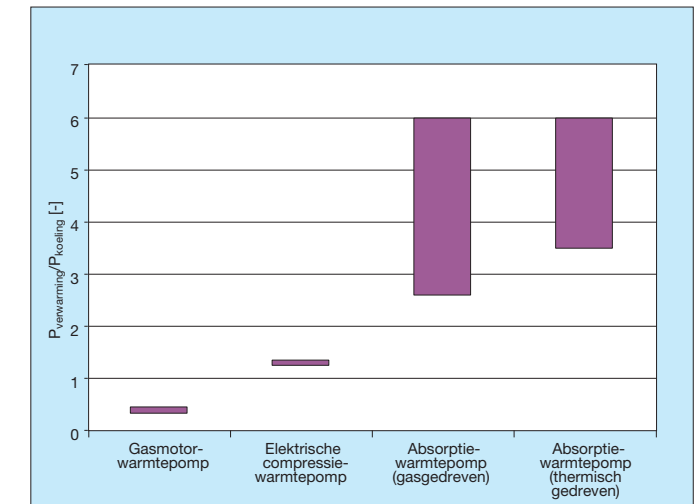
De omstandigheden voor inpassing van een warmtepomp zijn het meest gunstig in geval van nieuwbouw. Bij een nieuwbouw-project zijn immers de meeste vrijheidsgraden aanwezig en kan de inpassing integraal worden benaderd. Het integraal ontwerpen van een project is meestal niet eenvoudig. De complexiteit van de situatie en het feit dat er veel partijen aan tafel zitten, spelen daarbij ongetwijfeld een rol.

Bij een integraal ontwerp worden alle aspecten op elkaar afgestemd en geoptimaliseerd in hun onderlinge relatie. Mogelijk zijn bouwkundige concessies nodig om een systeem optimaal te kunnen bedrijven en dit kan ook esthetisch gezien gevolgen hebben. Belangrijk is dat vanaf het eerste ontwerp alle partijen aan tafel zitten en gezamenlijk onderzoeken waar de mogelijkheden liggen. Naast dit technisch georiënteerde proces is ook het financiële proces van belang, waarbij gekeken wordt naar de *total cost of ownership* (TCO) of *life cycle analysis* (LCA, zie figuur 9). Deze systematiek kijkt naar de initiële investering en de instandhoudingskosten gedurende de gehele levensduur en heeft als doel deze kosten zo laag mogelijk te houden. Deze processen zijn het eenvoudigst als de partij die het gebouw ontwikkelt ook de gebruiker is of wanneer de huurder nauw bij het project betrokken is. Dan is het namelijk mogelijk de investeerders te laten delen in de lagere energielasten. Wanneer de investeerder niet deelt in de lagere energielasten van de huurder, zijn de afwegingen lastiger. Hogere huren zijn meestal niet mogelijk. Bij ontwikkelaars met een sterk budgetgedreven organisatie kunnen er bovendien interne obstakels zijn. Zo vallen investeringen (in innovatie bijvoorbeeld) vaak onder een andere verantwoordelijkheid dan de operationele kosten en kunnen die twee niet altijd in hun onderlinge relatie geoptimaliseerd worden.

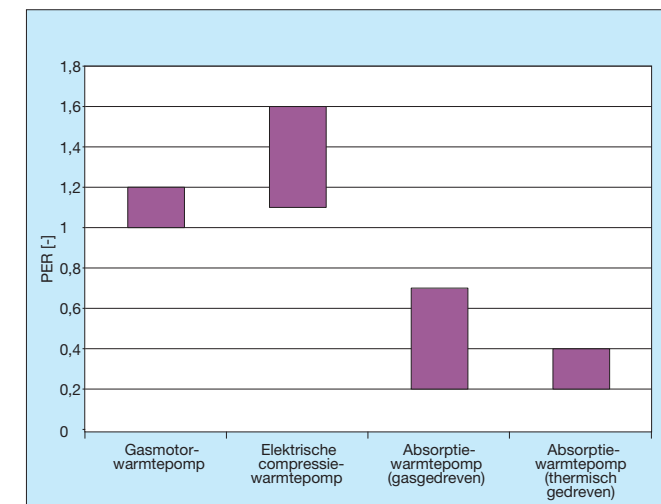
Parameters die relevant zijn bij het ontwerp van een warmtepompinstallatie zijn meestal al vroeg in het ontwerp- en bouwproces goed in te schatten. Dergelijke parameters zijn onder meer de jaarlijkse warmtevraag, de koudevraag, de



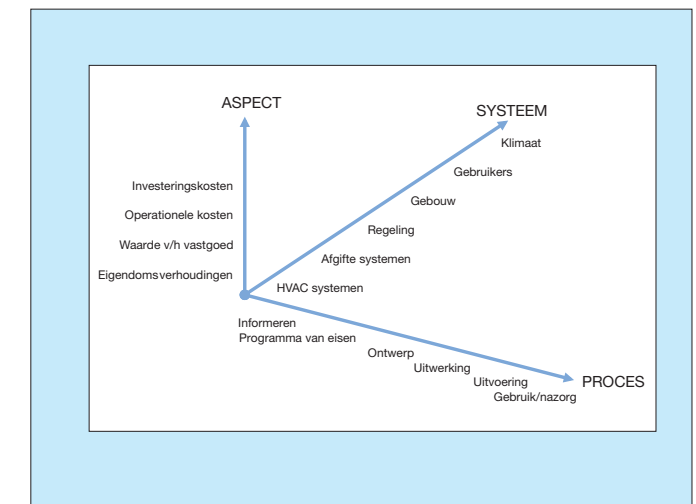
Figuur 6 PER van de verschillende typen warmtepompen voor verwarming. Bron: TNO



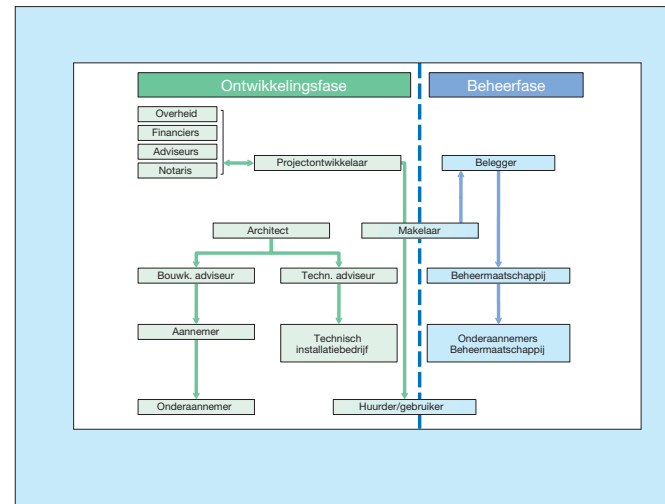
Figuur 8 Verhouding tussen verwarmingsvermogen en koelvermogen van de verschillende typen warmtepompen. Bron: TNO



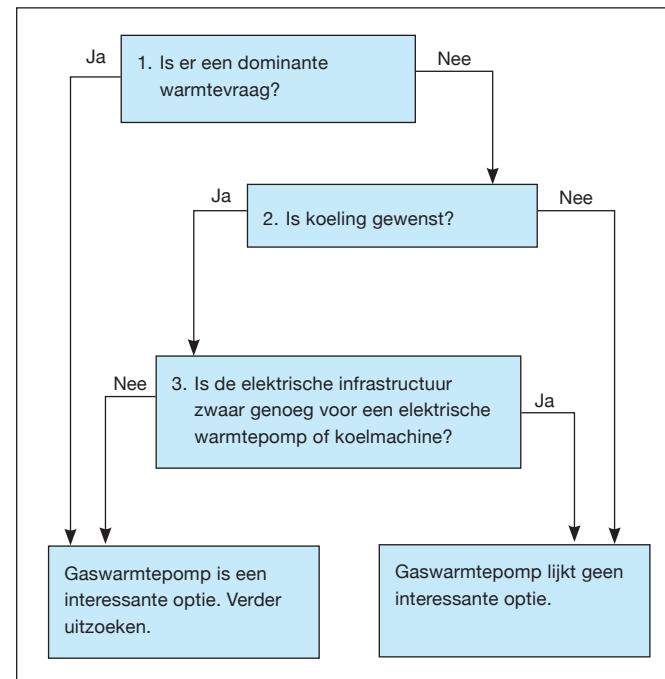
Figuur 7 PER van de verschillende typen warmtepompen voor koeling. Bron: TNO



Figuur 9 Integrale benadering vraagt om een meer-dimensionale weg van een groot aantal factoren. Bron: TNO



Figuur 10 Bij nieuwbouw en renovatie zijn vele partijen betrokken.
Bron: BDH



Figuur 11 Globale methode om de mogelijkheden voor gasgedreven warmtepompen te inventariseren.

warmtapwatervraag, de ventilatieomvang en het maximaal benodigde vermogen voor deze functies. Ook is het van groot belang om een inschatting te maken van de mate waarin zowel verwarming als koeling plaatsvindt.

Naast de karakteristieken van het gebouw spelen ook de specifieke eigenschappen van de gasgedreven warmtepomp een rol bij het in kaart brengen van mogelijkheden. Gasgedreven warmtepompen onderscheiden zich van elektrische versies door onder meer de volgende kenmerken:

- De efficiency van de warmtelevering (verwarmen) is goed.
- De efficiency van de warmteonttrekking (koeling) is beperkt.
- Bij warmtelevering is de hoeveelheid warmte die de warmtepomp aan het systeem of de omgeving moet onttrekken gering (er is dus een relatief kleine bron nodig).
- Het aansluitvermogen voor elektriciteit is relatief laag.

Op grond van deze kenmerken is het mogelijk om snel in te schatten of een gaswarmtepomp in een specifieke situatie een aantrekkelijke optie is, zie figuur 11.

Als hieruit blijkt dat een gasgedreven warmtepomp interessant is, moet de ontwerper zich verder verdiepen in deze grootheden, om inzicht te krijgen in de verdeling van de warmtevraag, de koudevraag en de tapwatervraag over de dag. Ook de temperatuur-niveaus voor verwarmen en koelen spelen een belangrijke rol.

Marktsegment utiliteit	Aantal gebouwen	Opmerking
Kantoren	60.000	81% verhuur
Onderwijs	13.700	
Ziekenhuizen	128	
Verpleging en verzorging	1.300	
Winkels	144.000	79% verhuur
Bedrijfshallen	101.000	
Overdekte zwembaden/ combi-zwembaden	490	36% in beheer gemeenten
Hotels/conferentieoordn	2.400	
Restaurants	9.585	
Overdekte sportaccommodaties	2.160	46% in beheer gemeenten

Tabel 4 Aantal gebouwen in de Nederlandse utiliteitbouw.
Bron: Ecofys duurzame warmte en koude 2007

In de navolgende paragrafen 4.3 tot en met 4.6 worden verschillende sectoren van de utiliteitsbouw beschreven, evenals de specifieke energiebehoefte en de kansen voor gaswarmtepompen. Tabel 4 geeft de belangrijkste kengetallen van de gehele utiliteitssector.

4.3 De zorgsector

De zorgsector kent een onderscheid tussen de sectoren *cure* en *care*. Onder *cure* vallen voornamelijk ziekenhuizen en andere instellingen waar mensen (kort) verblijven om er te genezen. Onder *care* vallen met name de verpleeg- en verzorgingshuizen. De *cure*-sector kan worden onderverdeeld in de *hot floor*, bestaande uit operatiekamers en afdelingen intensive care, en de verpleegafdelingen, de grootkeuken en de sterilisatieafdelingen. *Cure*-instellingen zijn meestal complexen die bestaan uit verschillende gebouwen in zowel laag- als hoogbouw. Vaak zijn deze gebouwen voorzien van verschillende vleugels waarin diverse functies in zijn ondergebracht. Tabel 5 geeft een globaal beeld van de energiestromen. Uit de gegevens blijkt dat deze sector zich goed leent voor het toepassen van gaswarmtepompen; er is immers een dominante warmtevraag. Ook zijn er situaties waarin koeling en verwarming gelijktijdig optreden. Daarnaast is er meestal een gelijktijdige warmte- en koudevraag en is de vereiste bedrijfszekerheid hoog. Vaak zijn *care*-instellingen voorzien van een noodstroomstelsel dat de energievoorziening van elektrisch gevoede systemen borgt.

4.3.1 Nieuwbouw

Gaswarmtepompen zijn goed toepasbaar in nieuwbouwprojecten in de zorgsector. Met name als er per gebouwdeel een separate installatie wordt toegepast in plaats van één collectieve installatie voor het gehele complex. Wel moet er bij het ontwerp aandacht zijn voor de maximale aanvoertemperatuur van het systeem. Deze is bij voorkeur niet hoger dan 45 °C. Wordt dit aspect vanaf het begin van het ontwerpproces meegenomen, dan vormt dit meestal geen grote beperking. Een zorggebouw bestaat doorgaans uit relatief veel kleinere ruimtes. Het inzetten van binnenunits kan voordelen hebben bij de klimatisering van ruimtes die voor verschillende doeleinden worden ingezet. Nadeel van systemen met binnenunits is dat hierdoor veel luchtbeweging in deze ruimtes plaatsvindt waardoor ook stofdeeltjes zich verspreiden. In bepaalde situaties is dit ongewenst.



Figuur 12 Warmtepomproject bij zorginstelling Twckkelerveld.
Bron: BDH

Karakteristieke eigenschappen van cure	Care
Aantal gebouwen	128 gebouwen bij 100 ziekenhuisorganisaties
Referentiegebouw	46.500 m ² BVO (per organisatie)
Warmtevraag	Normaal
Koudevraag	Bij 96% aanwezig 56% van het totaal BVO is van koeling voorzien
Gelijktijdigheid koude- en warmtevraag	Hoog
Energieverbruik voor warm tapwater	Hoog
Gasverbruik gebouw	Hoog (27 m ³ /m ² /jaar)
Elektriciteitsverbruik gebouw	Hoog (104 kWh/m ² /jaar)
Vereiste bedrijfszekerheid klimatisering	Zeer hoog

Tabel 5 Karakteristieke eigenschappen van gebouwen in de zorgsectoren *cure* en *care* (landelijk gemiddelde). Bron: SenterNovem 2007

4.3.2 Bestaande bouw

Zoals eerder aangegeven bestaan zorgcomplexen meestal uit verschillende gebouwen en vleugels. Bij renovatie of uitbereiding van een complex kan de gaswarmtepomp een goede optie zijn. In dergelijke gevallen is voor het inzetten van elektrische warmtepompen vaak een verzwaring van het elektriciteitsnet nodig.

De ontwerpaanvoertemperatuur van het systeem is ook een belangrijk aandachtspunt. De ontwerptemperatuur is alleen van toepassing bij aanwarmen, extreem koud weer (lage buitentemperatuur in combinatie met harde wind en afwezigheid van zoninstraling) en lage interne warmtelast. In de praktijk blijkt deze ontwerptemperatuur zelden nodig te zijn en dan alleen gedurende korte tijd. Verreweg het grootste deel van de tijd functioneert het systeem op veel lagere temperatuurniveaus. Het is dan ook aantrekkelijk om voor deze extreme condities een voorziening te treffen in de vorm van bijvoorbeeld een bijstookketel. Zo'n ketel vergt een relatief lage investering en is daarom al snel economisch interessant.

Als geen gebruik kan worden gemaakt van de bestaande systemen in het gebouw en aanpassing hiervan geen optie is, kan het gebouw relatief eenvoudig worden voorzien van binnenunits waarmee verwarmd en gekoeld kan worden. Deze kunnen dan in het plafond worden geïntegreerd of boven een raam of deur

Karakteristieke eigenschappen van kantoorgebouwen (landelijk gemiddeld)	
Aantal gebouwen	60.000 Kantoren
Referentiegebouw klein	600 m ² BVO
Referentiegebouw middelgroot	6.000 m ² BVO
Referentiegebouw groot	19.000 m ² BVO
Warmtevraag	0,38 GJ/m ² /jaar
Koudevraag	0,025 GJ/m ² /jaar
Gelijktijdige koude- en warmtevraag	Laag
Energieverbruik voor warm tapwater	Laag
Gasverbruik gebouw	15 m ³ /m ² /jaar
Elektriciteitsverbruik gebouw	88 kWh/m ² /jaar
Vereiste bedrijfszekerheid klimatisering	Laag

Tabel 6 Karakteristieke eigenschappen van kantoorgebouwen (landelijk gemiddeld). Bron: TNO

worden geplaatst. Op deze wijze kan de ontwerper eenvoudig voorzien in de behoefte aan verwarming en koeling in het gebouw.

4.4 Kantoren

De kantorenmarkt is divers; er zijn veel kleinere kantoorgebouwen maar ook hele grote. Met name grote kantoorgebouwen zijn soms hoogstandjes van architectuur. Dergelijke gebouwen zijn vaak lastig te klimatiseren. Het is bovendien niet ongewoon dat de koelvraag in deze gebouwen dominant is. Warmte- en koudeopslagsystemen (WKO) zijn dankzij de schaalgrootte vaak een goede optie.

Bij kleinere bestaande kantoorgebouwen die gekoppeld zijn aan opslag- of productiehallen is de warmtevraag vaak dominant. Gaswarmtepompen kunnen hier goed tot hun recht komen.

4.4.1 Nieuwbouw

Net als voor andere sectoren geldt, is in de kantorenmarkt de keuzevrijheid het grootst in geval van nieuwbouw. Omdat kantoren vaak in eerste instantie worden verhuurd, is het van belang dat er na de eerste huurperiode een gebouw staat dat eventueel met kleine aanpassingen weer interessant is voor een volgende gebruiker. De energielasten maken een steeds groter deel uit van de huisvestingslasten. Bovendien nemen de investeringen voor verwarmen, koelen en ventileren toe, want een kantoorgebouw moet niet alleen aan de voorschriften voldoen, het moet ook een comfortabele en gezonde werkomgeving zijn. Hierbij speelt licht in toenemende mate een rol. Bij de moderne kantoorgebouwen is verwarming meestal ondergeschikt aan koeling en ventilatie. Gelijktijdig verwarmen en koelen komt alleen voor bij omvangrijke complexen en in situaties met een extreme vorm van beschaduwing of bij een zeer open bouw. Bij kleine en middelgrote kantoorgebouwen zal gelijktijdig verwarmen en koelen niet vaak voorkomen. De vraag naar warm tapwater is zeer beperkt (alleen ten behoeve van de toiletfuncties, al dan niet met douches, en eventueel voor keukens of pantry's). Op de totale energiebalans is de warmtevraag voor tapwater in de regel ondergeschikt.

4.4.2 Bestaande bouw

Bij kleinere en middelgrote kantoorgebouwen is de warmtevraag vaak dominant, zeker als de kantoren gekoppeld zijn aan opslag-

of productiehallen. Bij renovatie van deze kantoren zijn gaswarmtepompen vaak interessant. Dit wordt versterkt door het feit dat de commercieel verkrijgbare warmtepompen vaak ook goed aansluiten bij de benodigde vermogens voor deze gebouwen. Bij dit type gebouwen ontstaat ook vaak een gelijktijdige koel- en verwarmingsvraag. Daarom kunnen gaswarmtepompen in dit segment goed tot hun recht komen. Investerings in een WKO-systeem zijn vaak te hoog of een WKO is technisch te complex.

4.5 Hotel- en recreatiebranche

Hotels en recreatiegebouwen hebben een relatief grote warmtebehoefte. Deze wordt voor een aanzienlijk deel veroorzaakt door de grote vraag naar warm tapwater. De warmwatervraag doet zich voor op een paar piekmomenten verspreid over de dag. De hotel- en recreatiesector kenmerkt zich dus door een dominante warmtevraag, die doorgaans goed past bij de vermogens van commercieel verkrijgbare gaswarmtepompen. Gelijktijdig verwarmen en koelen komt in deze sector ook regelmatig voor. De gaswarmtepomp is dan ook een interessante optie.

4.5.1 Nieuwbouw

Hotels en recreatiegebouwen hebben zoals gezegd een relatief grote warmtevraag, die de toepassing van gaswarmtepompen interessant maakt. Bij de grotere nieuwbouwobjecten is WKO in combinatie met gaswarmtepompen vaak een goede optie. Als het nieuwbouwplan een groot gebied bestrijkt en de dichtheid van de bebouwing laag is, verdienen kleinere decen-

Karakteristieke eigenschappen van hotels (landelijk gemiddeld)	
Aantal gebouwen	2.400
Referentiegebouw	2.400 m ² BVO
Warmtevraag	Standaard
Koudevraag	Vaak
Gelijktijdige koude- en warmtevraag	Relatief vaak
Energieverbruik voor warm tapwater	125 m ³ /jaar (indicatief)
Gasverbruik gebouw	35 m ³ /m ² /jaar (indicatief)
Elektriciteitsverbruik gebouw	100 kWh/m ² /jaar (indicatief)
Vereiste bedrijfszekerheid klimatisering	Hoog

Tabel 7 Karakteristieke eigenschappen van hotels (landelijk gemiddeld). Bron: Cogen Projects



Figuur 13 Kantoorgebouw met gasmotorwarmtepomp (zie paragraaf 7.9). Bron: Gasengineering



Figuur 14 Hotels hebben een relatief grote warmtevraag. Bron: BDH

trale installaties (of installaties die een cluster van gebouwen bedienen) mogelijk de voorkeur.

4.5.2 Bestaande bouw

Bij de renovatie van gebouwen in de hotel- en recreatiesector is het verbeteren van de energetische efficiency niet eenvoudig. De mogelijkheden voor WKO zijn in de praktijk zeer beperkt. Gezien de gelijktijdige warmte- en koudevraag en de grote warmwatervraag kan een gasgedreven warmtepomp een interessante optie zijn. Ook in deze sector geldt dat de elektrische infrastructuur soms een knelpunt vormt.

4.6 Retailsector

Het vastgoed in de retailsector kan in drie segmenten worden verdeeld: supermarkten, kleine winkels (<1.000 m² BVO) en grote winkels (>5.000 m² BVO). Supermarkten hebben een grote warmtevraag in de winterperiode. Wanneer er individuele koel- en vriesmeubelen worden toegepast die niet zijn geoptimaliseerd, kan er zelfs bij relatief milde buitencondities een warmtevraag zijn doordat de koelmachines de warmte uit de winkel afvoeren. Worden koel- en vriesmeubelen van hoge kwaliteit toegepast, dan is een groot deel van het jaar (in ieder geval in de zomermaanden) de koelvraag dominant. Bij Nederlandse supermarktketens heeft het binnenklimaat geen hoge prioriteit. In het buitenland is dit anders. In sommige

Energieverbruik supermarkt 1500 m ²		
Gasverbruik	46.827 m ³ /jaar	
Elektriciteitsverbruik	739.543 kWh/jaar	
Verdeling energieverbruik		Aandeel van het totale primaire energieverbruik [%]
Koelen	326.753 kWh/jaar	35,5
Vriezen	141.064 kWh/jaar	15,3
Verlichting	111.832 kWh/jaar	12,2
Verwarming	46.827 m ³ /jaar	19,6
Ventilatie	34.730 kWh/jaar	3,8
Overig	125.164 kWh/jaar	13,6

Tabel 8 Energieverbruik van een referentiesupermarkt van 1500 m².
Bron: SenterNovem

landen zijn volledig geklimatiseerde supermarkten geopend. Klimatisering is hier belangrijk in verband met de houdbaarheid van versproducten in de zomer.

Als gevolg van wijzigingen in de wet- en regelgeving zullen supermarkten in de nabije toekomst aanzienlijke wijzigingen in hun koel- en verwarmingspatroon doormaken.

Concreet betekent dit dat de temperaturen in Nederlandse supermarkten nogal kunnen variëren. Ook in de winterperiode zal de eigenaar zo weinig mogelijk willen verwarmen, omdat een deel van de ingebrachte warmte weer wordt weggekoeld via de koel- en vriesmeubelen; dit leidt tot een hoge energierekening.

In de retailsector treedt gelijktijdig verwarmen en koelen zelden op. Ook is de vraag naar warm tapwater gering. Per situatie zou moeten worden bekeken of een gaswarmtepomp voor de sector een interessante optie is. De vermogens van commercieel verkrijgbare warmtepompen sluiten goed aan bij de behoefte, zie tabel 9.

Van een referentiesupermarkt zijn de gegevens in tabel 8 weergegeven. Ook voor winkels is de situatie zeer divers. Energetisch gezien is een boetiek niet te vergelijken met een bouwmarkt.

Karakteristieke eigenschappen van winkels (landelijk gemiddeld)	
Aantal gebouwen	144.000
Referentiegebouw	2.400 m ² BVO (warenhuis)
Warmtevraag	0,38 GJ/m ² /jaar
Koudevraag	0,025 GJ/m ² /jaar
Gelijktijdige koude- en warmtevraag	Laag
Energieverbruik voor warm tapwater	Laag
Gasverbruik gebouw	14 m ³ /m ² /jaar
Elektriciteitsverbruik gebouw	139 kWh/m ² /jaar (Hoog)
Vereiste bedrijfszekerheid klimatisering	Laag

Tabel 9 Karakteristieke eigenschappen van winkels (landelijk gemiddeld). Bron: TNO

Gaswarmtepompen kunnen in deze sectoren zeker aantrekkelijk zijn, maar de mogelijkheden moeten steeds opnieuw bekeken worden. Over het algemeen geldt dat gelijktijdig verwarmen en koelen zelden optreedt. Ook de vraag naar warm tapwater is doorgaans gering.

Verlichting is in winkelpanden erg belangrijk, omdat de zichtbaarheid en de presentatie van goederen direct van invloed zijn op de verkoop. De verlichting brengt vaak een aanzienlijke warmte-last met zich mee, waardoor koeling eerder nodig is. De beste oplossing is een aanpak bij de bron: de toepassing van energiezuinige verlichting. Energiezuinige lampen rukken op, maar zijn in de meeste winkels nog geen gemeengoed. Koeling blijft dan ook een belangrijke functie, zeker in winkels die veel aandacht besteden aan de presentatie van goederen.

4.6.1 Nieuwbouw

De meeste kleinere en middelgrote winkels die nieuw worden gebouwd, maken deel uit van een groter geheel of zijn geïntegreerd in een gebouw met woon- en kantoorfuncties. Als in deze situatie alleen naar de retailfunctie wordt gekeken, dan valt op dat door de goede isolatie van de gebouwen de warmteproductie door bijvoorbeeld verlichting een grote invloed heeft op het binnenklimaat. Goede ventilatie en vaak ook koeling zijn daarom in veel retailgebouwen noodzakelijk. Verwarming van deze gebouwen is door de grote interne warmteproductie vaak van ondergeschikte betekenis. Ook het gebruik van warm tapwater is meestal niet substantieel. Al met al is er een dominante koudevraag en ligt het niet voor de hand om gaswarmtepompen in te zetten. Gaswarmtepompen zijn immers vooral geschikt voor situaties met een dominante warmtevraag.

Er zijn echter specifieke omstandigheden die een gaswarmtepomp wel interessant maken voor nieuwbouwprojecten met retail. Een specifieke situatie is bijvoorbeeld de combinatie van winkels, kantoren en woningen in één complex. In zo'n gebouw met gecombineerde functies is de balans tussen warmte- en koudevraag heel anders en is een gaswarmtepomp juist een goede optie.

4.6.2 Bestaande bouw

Energetisch gezien zijn bestaande retailgebouwen vaak niet geoptimaliseerd. Ondanks de relatief grote warmtelast (bijvoorbeeld als

gevolg van verlichting) is er in de winterperiode meestal nog een warmtevraag aanwezig. Het hangt af van de situatie of gaswarmtepompen hier zinvol zijn. Vaak is het voor de gebruiker van een pand lastig om het bestaande systeem aan te passen. Als geen gebruik kan worden gemaakt van de bestaande systemen in het gebouw of als aanpassing hiervan geen optie is, kan het gebouw relatief eenvoudig worden voorzien van binnenuits geïntegreerd of boven een raam of deur geplaatst. Op deze wijze wordt ook eenvoudig voorzien in de behoefte aan verwarming en koeling.

4.7 Ontwerpaspecten

Veel warmtepompsystemen worden 'bivalent' uitgevoerd. Dit betekent dat er naast de warmtepomp nog een andere warmte- of koudeopwekker wordt ingezet. Dit extra toestel is energetisch gezien vaak minder efficiënt dan de warmtepomp, maar vergt per kilowatt thermisch vermogen een aanzienlijk lagere investering. De basislast wordt dan geleverd door de warmtepomp (dit is het preferente toestel, dat veel draaiuren maakt) en het niet-preferente toestel springt af en toe



Figuur 15 Warmtepompen op het dak van een winkelcentrum in Geleen. Bron: Gasengineering

bij voor de incidenteel optredende piekvraag. De energetische prestaties van een bivalent systeem zijn iets lager dan die van een warmtepomp die is gedimensioneerd op de piekvraag, maar het verschil is relatief gering omdat de inzet van het additionele toestel gering is. Bivalente systemen zijn interessant omdat ze energetisch en kostentechnisch gezien geoptimaliseerd kunnen worden.

Een andere reden voor het toepassen van een bivalent systeem is dat er een back-up is wanneer de warmtepomp buiten zijn toepassingsgebied treedt. Als bijvoorbeeld de brontemperatuur onder een bepaalde kritische waarde daalt of als de afgiftetemperatuur te hoog wordt, kan het systeem toch in bedrijf blijven. Globaal zijn er twee strategieën voor bivalent bedrijf:

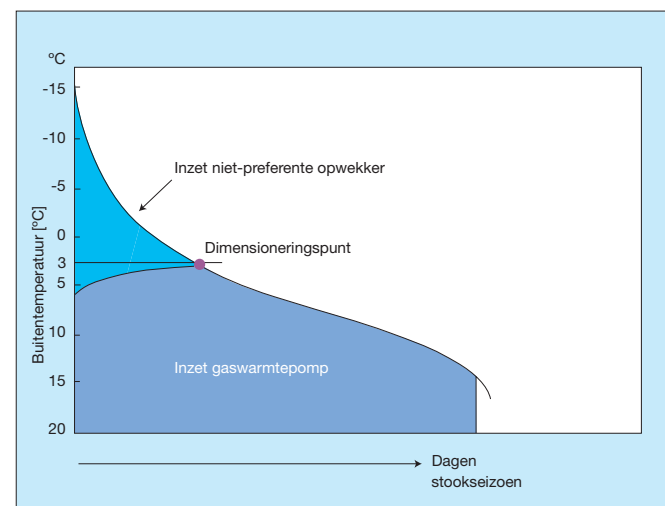
- In parallelbedrijf zijn de warmtepomp en het niet-preferente toestel tijdens de piekuren gelijktijdig in bedrijf. Beide opwekkers leveren samen de gehele warmte- of koudevraag. Hun vermogens kunnen daardoor beperkt blijven. Bij parallelbedrijf is dus óf alleen de warmtepomp in bedrijf óf zijn de warmtepomp en de bijstookvoorziening beide in bedrijf.
- In alternatiefbedrijf wordt de warmtepomp afgeschakeld zodra die buiten zijn inzetgrenzen dreigt te komen. De volledige warmte- of koudevraag wordt daarna geleverd door het niet-preferente toestel. Het niet-preferente toestel moet

voldoende vermogen hebben om de gehele warmte- of koudevraag te kunnen dekken. Bij deze strategie is dus óf alleen de warmtepomp in bedrijf óf alleen de niet-preferente opwekker.

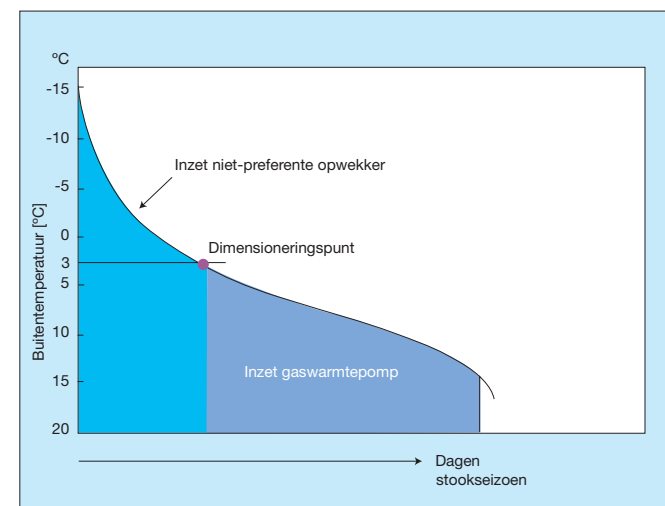
Het is niet mogelijk om op voorhand aan te geven welke strategie de voorkeur verdient. Dit is sterk afhankelijk van de investeringskosten, het vraagpatroon, het energieverbruik en de daaraan gekoppelde energiekosten. In de praktijk wordt ook nog wel eens een mix van beide strategieën toegepast. Deze mix kent drie situaties:

- Alleen de warmtepomp is in bedrijf.
- De warmtepomp en de bijstookvoorziening zijn in bedrijf.
- Alleen de bijstookvoorziening is in bedrijf.

Deze strategieën gelden niet alleen voor de verwarmingsfunctie, maar ook voor koeling en voor de bereiding van warm tapwater. Bovendien kan voor ruimteverwarming een andere strategie gelden dan voor ruimtekoeling of de bereiding van warm tapwater. De regeling van de bedrijfstoestanden is van groot belang voor de energetische prestaties en voor het functioneren van het totale systeem. Afhankelijk van het verschil in efficiency kunnen door een onjuist ingestelde regeling de prestaties van het totale systeem drastisch teruglopen. Het is daarom belangrijk



Figuur 16 Bivalente gaswarmtepompinstallatie in parallelbedrijf.
Bron: TNO



Figuur 17 Bivalente gaswarmtepompinstallatie in alternatiefbedrijf.
Bron: TNO

om tijdens het ontwerp van een systeem voldoende aandacht te besteden aan de regelstrategie. Hetzelfde geldt voor de inbedrijfstelling van de installatie; nauwgezette controle is nodig om te garanderen dat de regeling onder alle bedrijfscondities functioneert zoals beoogd.

4.7.1 Afgiftesystemen

Gaswarmtepompen geven hun warmte af aan de lucht via speciale warmtewisselaars die ook bij VRF-systemen (paragraaf 3.2.2) worden gebruikt. Met name bij gasmotorwarmtepompen is dit de standaardoplossing. Nadeel van deze uitvoering is echter dat er een relatief grote hoeveelheid koudemiddel nodig is; de leidingen naar de binneneenheden zijn immers met koudemiddel gevuld (vloeibaar of in dampvorm). Een systeem met binneneenheden heeft als voordeel dat het als een driepijpsysteem kan worden uitgevoerd, waardoor voor iedere unit gelijktijdig gekozen kan worden tussen koelen en verwarmen. De warmte die uit de ene ruimte afgevoerd wordt, kan direct in een andere ruimte worden gebruikt. In situaties waarbij er per vertrek grote verschillen zijn in de warmte- en koudevraag, kan dit een groot voordeel zijn.

Gasabsorptiesystemen bieden deze mogelijkheid van koelen en verwarmen in een beperkte vorm ook niet. Het aansluiten en inregelen van deze systemen is wel afhankelijk van het type en het fabrikaat. Hiervoor zijn geen vuistregels te geven. Voor specifieke informatie verwijst dit handboek dan ook naar de productinformatiebladen en de installatiehandleiding van de toestellen.

Temperaturniveaus van het afgiftesysteem

Diverse leveranciers van gasmotorwarmtepompen hebben speciale hydro-eenheden in hun pakket. Deze eenheden dragen de door de warmtepomp geproduceerde warmte over aan water en kunnen worden toegepast met vloerverwarming, betonkernactivering, lagetemperatuurradiatoren of *fancoil units*. Deze systemen lijken dus meer op de conventionele verwarmingssystemen.

De hydraulische schakeling is bij een warmtepompsysteem sterk bepalend voor het uiteindelijke rendement en het functioneren van het systeem. Als grondregel geldt dat het mengen van waterstromen met verschillende temperaturen zoveel mogelijk moet worden vermeden. Het gevolg van deze menging is immers dat de warmtepomp een hogere aanvoertemperatuur moet leveren

Efficiencyverbetering in de basislast

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 en paragraaf 4.7 heeft TNO Bouw en ondergrond op basis van de Nederlandse belasting/duurkromme berekend dat de combinatie van een gaswarmtepomp en een CV-ketel voor veel situaties de optimale combinatie is. De relatief dure gaswarmtepomp wordt gedimensioneerd op ongeveer 30% van de maximale verwarmingscapaciteit in kW. Met deze 30% kan de installatie 88% van de jaarlijkse verwarmingsvraag invullen. De resterende 12% van de (piek-)verwarmingsvraag en desgewenst de bereiding van warm tapwater neemt de goedkope HR107 CV-ketel voor zijn rekening.

Deze combinatie is toepasbaar in nieuwe en bestaande installaties. De aanzienlijke efficiencyverbetering in bestaande installaties maakt de combinatie (milieu)technisch en economisch zeer aantrekkelijk. In de praktijk is aangetoond dat bijschakeling van gaswarmtepompen op bestaande installaties, ter grootte van 30% van de totale verwarmingscapaciteit, besparingen van tientallen procenten kan opleveren.

dan aan de afgiftezijde nodig is. Dit is nadelig voor de energetische prestatie van de warmtepomp.

Om een zo hoog mogelijk rendement te bereiken, moet de ontwerptemperatuur van het afgiftesysteem zo laag mogelijk zijn. Daarom wordt in combinatie met warmtepompen vaak vloerverwarming of betonkernactivering toegepast. Ook komen gemengde systemen voor, met vloerverwarming en lagetemperatuurradiatoren of *fancoils*. Bij vloerverwarmingssystemen in combinatie met conventionele hogetemperatuuropwekkers (zoals CV-ketels) wordt meestal een standaard mengregeling toegepast. Deze verlaagt de ketelaanvoertemperatuur tot onder de maximaal toegestane temperatuur voor vloerverwarming. Dit is bij warmtepompen niet wenselijk. Het rendement van de warmtepomp is maximaal als de warmtepomp zelf het juiste (lage) temperaturniveau afgeeft. Een vloerverwarming wordt dus bij voorkeur op dezelfde manier in de hydraulische schakeling opgenomen als een radiator, dus zonder mengsysteem en zonder extra circulatiepomp (figuur 18 en 19).

Aanbevelingen

- Kies gelijke ontwerptemperaturen voor alle afgiftesystemen, ook als ze niet gelijksoortig zijn.
- Pas vloerverwarming en betonkernactivering toe zonder mengregeling en zonder extra pomp.

Wanneer gekozen wordt voor een gemengd afgiftesysteem, bijvoorbeeld vloerverwarming in combinatie met laagtemperatuurradiatoren, geldt hetzelfde. De ontwerptemperaturen van beide afgiftesystemen moeten gelijk zijn. Zijn de ontwerptemperaturen niet gelijk, dan kunnen de volgende problemen optreden:

- Bij een regeling met stooklijn zal deze op het systeem met de hoogste ontwerptemperatuur (in dit geval de radiatoren) moeten worden afgesteld. Deze instelling is altijd te hoog voor de vloerverwarming. Om dit te compenseren moet de vloerverwarming met een mengregeling worden uitgerust. Hiermee wordt het voordeel van vloerverwarming als laagtemperatuursysteem (namelijk een hoger energetisch rendement) teniet gedaan.
- Werkt het systeem met een ruimtethermostaat, dan wordt de systeemtemperatuur zo ingesteld dat nog net aan de warmtevraag van de betreffende ruimte kan worden voldaan. De ingestelde temperatuur kan dan voor een van de afgiftesystemen veel lager zijn dan de ontwerptemperatuur.

Figuur 19 toont de aanbevolen schakeling voor een gemengd afgiftesysteem, waarbij in het vertrek met de ruimtethermostaat gekozen is voor vloerverwarming en in de andere vertrekken voor radiatoren.

4.7.2 Buffers

Warmtepompsystemen beschikken vaak over een warmtebuffer. De buffer kan verschillende functies hebben, die goed onderscheiden moeten worden:

- Een buffer om een volledige scheiding te maken tussen het primaire en secundaire circuit (open verdeler).
- Een buffer om de warmtepomp rustiger te laten schakelen (minder snelle temperatuurveranderingen, minder aan- en uitschakelingen).
- Een buffer om perioden zonder elektriciteit of gas te kunnen overbruggen. Deze functie lijkt qua schakeling op de eerste, maar wordt anders gedimensioneerd, namelijk op de warmtevraag over een bepaalde periode.

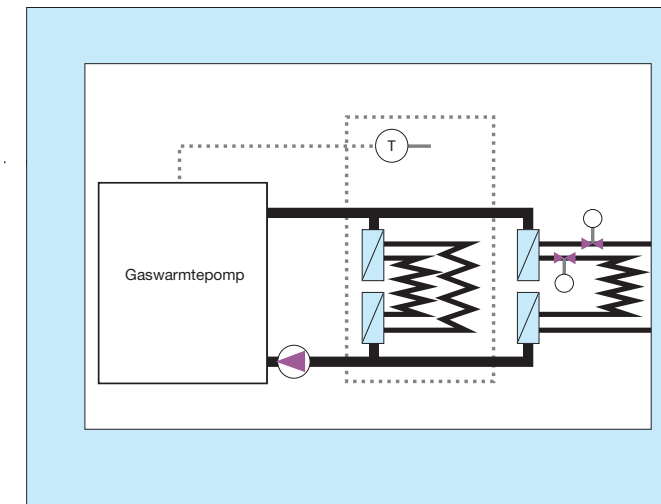
Leveranciers van warmtepompen bevelen meestal aan om een minimale volumestroom over de condensor te handhaven. Dit is onder meer nodig om een goede warmteoverdracht in de condensor te garanderen en te voorkomen dat de opwarming van het verwarmingswater in de warmtepomp te groot wordt, waardoor de overdrukbeveiliging geactiveerd zou kunnen worden.

In de praktijk wordt er vaak voor gekozen om deze minimale volumestroom te garanderen door een *bypass* met een overstortventiel of een open verdeler/verzamelaar in het systeem op te nemen. Daarbij ontstaat het risico dat de warmtepomp gaat pendelen, zeker als hij op basis van een stooklijn wordt geregeld. Het pendelen ontstaat doordat er in het kortgesloten systeem (bypass-leiding of open verdeler) te weinig capaciteit (warmte-inhoud) aanwezig is. Komt de warmtepomp in bedrijf dan wordt het kortgesloten circuit snel opgewarmd, waarna de warmtepomp weer uit bedrijf gaat. Dit leidt tot pendelgedrag.

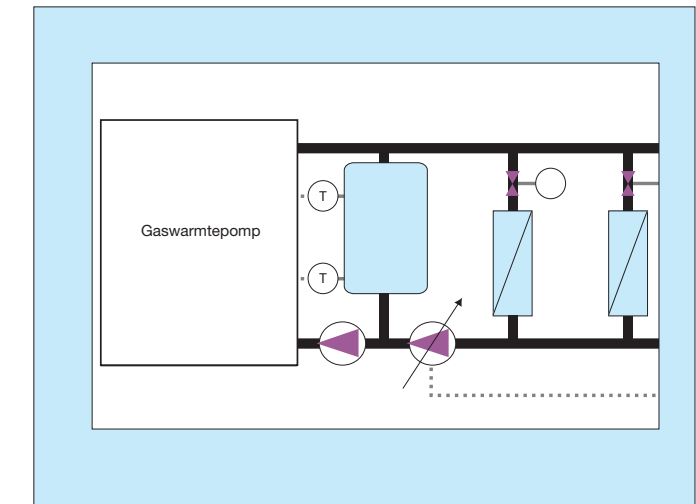
De beste oplossing is de toepassing van een schakelbuffer waarover de bypass-stroom circuleert. Wanneer de volumestroom over de warmtepomp te sterk beïnvloed wordt door het afgiftesysteem (alle afgiftegroepen kunnen dichtlopen), zorg dan voor een hydraulische ontkoppeling door middel van een parallelgeschakelde buffer (figuur 20). Beide circuits kunnen dan onafhankelijk van elkaar functioneren. Het secundaire circuit wordt vaak met een toerengeregelde pomp uitgerust die zorgt voor een constant drukverschil over de afgiftegroepen. De temperatuur van de buffer wordt hier via een stooklijn geregeld.

Systemen die met een (ruimte)thermostaat geschakeld worden en niet voorzien zijn van een schakelbuffer, moeten zo zijn geïnstalleerd dat het afgiftesysteem in het geregelde vertrek niet afgesloten kan worden. Zo is dus altijd een minimale volumestroom over de warmtepomp gewaarborgd (figuur 21). Is de warmte-inhoud in dit circuit voldoende groot om pendelgedrag te voorkomen, dan is in principe geen schakelbuffer nodig.

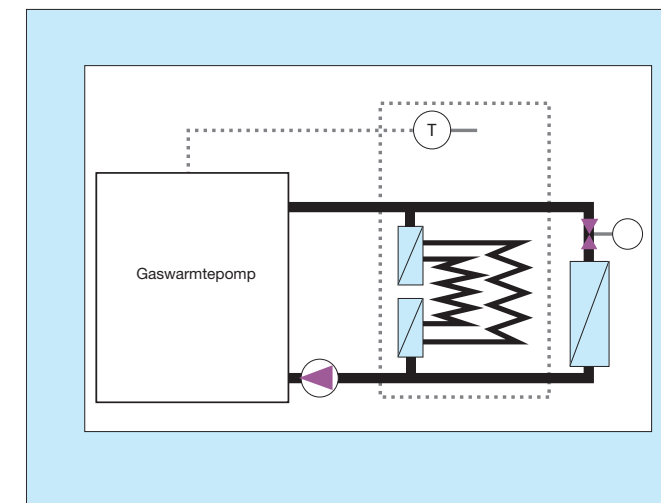
Als het nodig is voor een rustiger bedrijf van de warmtepomp (bijvoorbeeld wanneer er onvoldoende traagheden in het systeem zijn ingebouwd), wordt soms een buffer in serie toegepast. Deze vergroot de warmte-inhoud van het systeem en daarmee de traagheid. Het plaatsen van de buffer in de aanvoerleiding heeft als nadeel dat bij warmtevraag de aanvoertemperatuur vertraagd stijgt, zodat de installatie minder snel aan de warmtevraag voldoet. De temperatuur in de buffer en in het afgiftesysteem veranderen immers gelijktijdig. Daarom kan de buffer beter in de retour worden opgenomen.



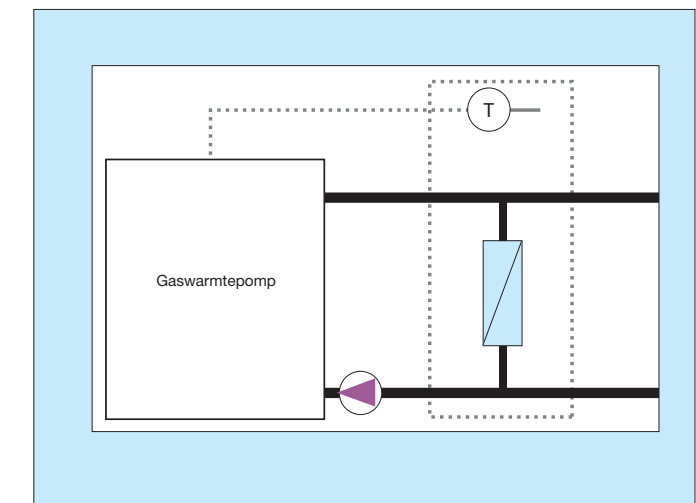
Figuur 18 Aanbevolen schakeling van vloerverwarming in een warmtepompsysteem. Bron: TNO



Figuur 20 Hydraulische ontkoppeling via een buffer. Bron: TNO



Figuur 19 Aanbevolen schakeling van een gemengd afgiftesysteem. Bron: TNO



Figuur 21 Minimaal debiet door de warmtepomp gegarandeerd door niet afsluitbaar afgiftesysteem in het geregelde vertrek. Bron: TNO

Het toepassen van buffers in serie wordt echter niet aanbevolen. Als een buffer in het systeem nodig is, verdient parallelschakeling de voorkeur.

Aanbevelingen

- Let bij het ontwerpen van een bypass op de warmte-inhoud van het gebypaste circuit; deze mag niet te klein zijn.
- Gebruik geen buffers in serie met de warmtepomp.

4.7.3 Bronnen

De warmtebron is één van de belangrijkste deelsystemen van het totale warmtepompsysteem. Dit wordt niet altijd onderkend. De warmtebron levert meestal 'gratis' omgevingswarmte, die de energie uit de warmtepomp een duurzaam karakter geeft. Onbruikbare omgevingswarmte (lage temperatuur) wordt met toevoeging van relatief weinig hoogwaardige energie opgewaardeerd tot een temperatuur waarbij die warmte wél bruikbaar is. De prestaties en de kosten van het totale systeem worden dan ook in hoge mate bepaald door de warmtebron.

Een belangrijke eigenschap van sorptiewarmtepompen is dat zij een kleinere broncapaciteit vragen dan een compressiewarmtepomp met hetzelfde verwarmingsvermogen. Uit de Sankeydiagrammen in paragraaf 4.1 blijkt dat bij een gasmotorwarmtepomp voor iedere eenheid geleverde warmte 0,75 eenheid aan de bron wordt onttrokken. Bij gasgedreven sorptiewarmtepompen wordt 0,37 – 0,56 eenheid aan de bron onttrokken. Algemeen kan gesteld worden dat hoe beter de warmtepomp presteert (hoe hoger de PER), hoe groter de hoeveelheid energie is die door het (duurzame) bronsysteem wordt geleverd. Gezien de benodigde bronvermogens voor de commercieel verkrijgbare gasgedreven warmtepompen zijn grondwater en buitenlucht de meest voor de hand liggende warmtebronnen. Gasmotorwarmtepompen gebruiken over het algemeen buitenlucht als warmtebron. Dit betekent dat dit type warmtepomp geen gebruik kan maken van warmte- en koudeopslag in de bodem. Investerings in extra voorzieningen zijn dan ook niet nodig. Het nadeel is dat gasmotorwarmtepompen geen gebruik kunnen maken van vrije koeling (zie pagina 84). Als een vorm van koudeopslag nodig is, is gebruik van de bodem of van grondwater (met twee putten) noodzakelijk.

Grondwater als warmtebron

Gezien de beschikbaarheid en het temperatuurniveau is grondwater een ideale warmtebron voor warmtepompen. Daar komt bij dat de grond zich uitstekend leent voor het opslaan van grote hoeveelheden koude en warmte in aquifers (waterdragende bodemlagen). Het in de winterperiode afgekoelde water in een aquifer kan in de zomer uitstekend worden gebruikt voor het efficiënt koelen van een gebouw.

De beperkingen voor het gebruik van grondwaterbronnen liggen op het gebied van vergunningverlening, grondwaterkwaliteit (corrosieproblemen of ijzeruitvloeking bij contact met lucht) en kosten. Buiten de waterwingebieden is grondwateronttrekking tot 10 m³/h niet gebonden aan vergunningen. Het opgepompte en afgekoelde water moet via een injectieput weer in de grond worden teruggevoerd, meestal in dezelfde watervoerende laag. De afstand tussen de onttrekkings- en injectieput moet daarbij voldoende groot zijn om *interflow* (het weer oppompen van teruggevoerd water) te voorkomen. De minimaal aan te houden afstand is onder meer afhankelijk van:

- de dikte van het watervoerende pakket;
- de grootte en de richting van de grondwaterstroming;
- de volumestroom van de grondwateronttrekking;
- de weerstand of poreusheid van het watervoerende pakket.

Gemiddeld moet worden gerekend met een afstand tussen de onttrekkings- en injectieput van minimaal 12 meter voor iedere m³/uur onttrekking. Dit getal geeft alleen een eerste indicatie. Voor de juiste afstand moet een deskundige een berekening maken op basis van lokale metingen. Het handboek van de Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag (NVOE) biedt goede aanknopingspunten voor het ontwerp en de realisatie van WKO-systemen.

Ook de kwaliteit van het grondwater is van belang voor de uitvoering van een warmtebron. Indien de grondwaterkwaliteit te laag is voor de warmtepomp, biedt de inzet van een tussenmedium mogelijk uitkomst. Dit moet echter zoveel mogelijk worden voorkomen, omdat een tussenmedium de installatie complexer, groter en duurder maakt. Ook heeft een tussenmedium een negatief effect op het rendement van de warmtepomp. Mogelijk is in zo'n geval de keuze voor een ander merk of type warmtepomp een betere oplossing.

Aanbevelingen

- Kies een warmtepomp die is afgestemd op de beschikbare kwaliteit van het grondwater en die hierbij ook gegarandeerd wordt.
- Zorg voor voldoende afstand tussen de onttrekkings- en injectieput.
- Laat het bronsysteem door een deskundige ontwerpen en realiseren.

Buitenlucht als warmtebron

Bij het toepassen van gaswarmtepompen komt buitenlucht meer en meer in beeld als warmtebron. Dat is onder meer het gevolg van de hoge kosten en de soms tegenvallende mediumtemperaturen van bodemwarmtewisselaars.

Voor het installatieontwerp vormt buitenlucht als warmtebron nauwelijks een complicatie. Wel vraagt het geluidsniveau van de toegepaste ventilatoren aandacht tijdens het ontwerpproces. Een voorziening die voorkomt dat op de luchtkoeler (verdampers) rijp neerslaat is meestal geïntegreerd in de warmtepomp. Wel moet het voor de ontwerper duidelijk zijn hoe deze voorziening werkt en wat de consequenties zijn voor de warmtelevering.

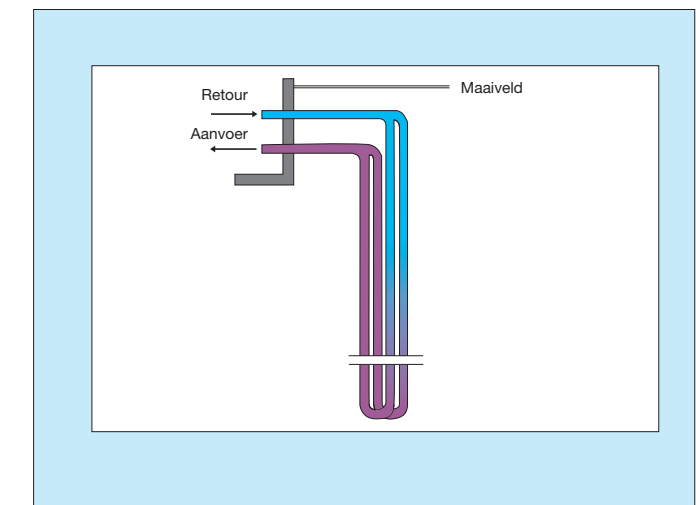
Bodem als warmtebron: verticale bodemwarmtewisselaars

In Nederland worden recentelijk veel verticale bodemwarmtewisselaars toegepast, al dan niet geïntegreerd in de bouwkundige constructie (bijvoorbeeld heipalen). Voor een maximale warmteonttrekking geldt als vuistregel 15 tot 40 Watt per meter diepte. De precieze diepte is afhankelijk van:

- de laagst toelaatbare mediumtemperatuur, zowel uit technisch oogpunt (bijvoorbeeld het voorkomen van bevriezing van de grond) als uit oogpunt van optimalisatie van de energetische prestaties;
- het onttrekkingspatroon dat gedurende het jaar optreedt, waarbij zowel het piekvermogen (in kW) als de op jaarbasis onttrokken warmtehoeveelheid (kWh/jr) van belang zijn;
- de onderlinge afstand van de bodemwarmtewisselaars;
- de mate waarin de bodem (al dan niet actief) wordt geregenererd;
- het grondwaterpeil;
- de grootte en de richting van de grondwaterstroming;
- de samenstelling van de grond.

In ISSO-publicatie 73 'Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars' worden aanwijzingen gegeven voor het dimensioneren en realiseren van dit type warmtewisselaars. Het is opvallend dat veel bodemwarmtewisselaars worden gedimensioneerd op het vermijden van permanente bevriezing van de bodem rond de warmtewisselaar, het zogenaamde permafrost-criterium. Dit leidt ertoe dat de ontwerper genoeg neemt met een warmtebrontemperatuur die gemiddeld over het jaar maar weinig verschilt van de temperatuur van een buitenluchtbron. Het is aan te bevelen de bodemwarmtewisselaar zowel vóór als na het aanbrengen op lektheid te testen. De check vooraf lijkt misschien overdreven, maar bij samengestelde sondes kunnen lekkages optreden die in een later stadium van de werkzaamheden niet of nauwelijks meer te herstellen zijn. Ook de afwerking van de boorgaten is van groot belang voor het functioneren van de warmtewisselaar. Bij het dimensioneren van de bodemwarmtewisselaar mag er niet van worden uitgegaan dat een dubbele U-buis (figuur 22) twee maal zoveel warmte uit de bodem kan onttrekken als een enkele U-buis.

Let bij de dimensionering van het bodemwarmtesysteem op het benodigde pompvermogen. Denk ook aan de geluidsproductie en het opgenomen vermogen van de bronpomp en neem waar nodig geluidswerende maatregelen.



Figuur 22 Bodemwarmtewisselaar met dubbele U-buis.

Aanbevelingen

- Wees niet te zuinig bij het bepalen van de lengte van een verticale bodemwarmtewisselaar, vooral niet wanneer er onzekerheden bestaan, bijvoorbeeld over de geohydrologische gegevens. Gebruik rekenprogramma's die met voldoende nauwkeurigheid het bedrijfsurenprofiel van de warmtepomp kunnen verwerken.
- Let bij de dimensionering van het bodemwarmtesysteem op het benodigde pompvermogen. Denk ook aan de geluidsproductie en het opgenomen vermogen van de bronpomp en neem waar nodig geluidswerende maatregelen.
- Vraag aan het bedrijf dat de bodemwarmtewisselaar aanbrengt garanties met betrekking tot de lekdichtheid en de prestaties.

Bodem als warmtebron: horizontale systemen

Wanneer er voldoende vrij grondoppervlak beschikbaar is, is de toepassing van een horizontale bodemwarmtewisselaar te overwegen. Hierbij wordt een enkele leiding in één of meer secties in de bodem aangebracht. Het piekvermogen van een systeem met horizontale bodemwarmtewisselaar ligt (per meter enkele leiding) beduidend lager dan dat van een verticaal systeem (per meter boorgat). Het piekvermogen is afhankelijk van dezelfde parameters, maar de afhankelijkheid is anders dan bij verticale systemen. Voor de plaatsing kunnen de volgende richtlijnen worden gegeven:

- Diepte 1,5 tot 2 meter, bij voorkeur beneden het grondwaterpeil.
- Onderlinge afstand minimaal 1 meter.

(Top)koeling

Warmtepompsystemen die grondwater of een bodemwarmtewisselaar als bron gebruiken, kunnen met weinig extra kosten ook een beperkte vorm van koeling realiseren. Dit wordt 'vrije koeling' genoemd. Het energieverbruik voor deze vorm van koeling is laag doordat er alleen een circulatiepomp hoeft te draaien. Door deze aanvulling wordt een verwarmingsinstallatie een comfortinstallatie. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is het voorkomen van condens op de oppervlakken die gebruikt worden voor het overdragen van de koeling (vloer, wand of radiatoren). Een mengregeling kan ervoor zorgen dat de aanvoertemperatuur bij koelbedrijf niet lager wordt dan circa 14 °C. Wordt de koeling gerealiseerd met een luchtbehandelingskast dan gelden de gebruikelijke uitgangspunten.

Wanneer de warmtepomp wordt uitgevoerd met een bodembron of een grondwaterbron, komt de levering van koude in de zomerperiode neer op een beperkte vorm van regeneratie. Hierdoor verbeteren de systeemprestaties gedurende het stookseizoen.

4.7.4 Inpassing van een gaswarmtepomp

Onbekendheid met gaswarmtepompen leidt er in de praktijk toe dat deze technologie als complex wordt gezien. Echter, systemen met gaswarmtepompen zijn in principe niet moeilijker te ontwerpen en te realiseren dan systemen met een conventionele ketel in combinatie met een airconditioner of koudwatermachine. De betrouwbaarheid en de levensduur van gaswarmtepompen zijn vergelijkbaar met die van complexe conventionele systemen. Professionele adviseurs en installateurs realiseren met ondersteuning van de leveranciers van gaswarmtepompen uitstekend functionerende warmtepompsystemen, met een *total cost of ownership* die lager ligt dan bij conventionele systemen.

Inpassing in het netwerk

In de oude binnensteden in Nederland, waar verduurzaming een belangrijk streven is, zijn elektrische warmtepompen vaak moeilijk toepasbaar omdat de capaciteit van het elektriciteitsnet begrensd is. In deze situaties zijn gaswarmtepompen een aantrekkelijk alternatief. In de bestaande bouw is vrijwel altijd een gasaansluiting aanwezig en het gasnetwerk heeft volop capaciteit, ook in de binnensteden. Het stroomgebruik van een gaswarmtepomp (voor ventilatoren, pompen en regelingen) blijft ruimschoots binnen de capaciteit van een elektrische groep van 16 ampère. Bovendien heeft een gaswarmtepomp per definitie een kleinere bron nodig dan een elektrische versie. Ook voor nieuwbouwprojecten in de binnensteden is verduurzaming met gaswarmtepompen een aantrekkelijke optie.

4.7.5 Gebruiksaspecten

Warmtepompen maken in de utiliteitsbouw meestal deel uit van een gebouwbeheerssysteem (GBS). GBS'en worden steeds complexer en de ervaringen ermee lopen sterk uiteen. Dit is vaak het gevolg van een onvoldoende gedetailleerde oplevering. Doorgaans is het ontwerp in orde en is de realisatie ook goed verlopen, maar wordt aan de oplevering weinig aandacht besteed. Een onjuiste inregeling, onvolkomenheden in de regelstrategie,

verkeerde *setpoints* en kleine afwijkingen van het ontwerp blijven daardoor vaak onopgemerkt. Een goede, onafhankelijke opleveringsmeting daarentegen brengt dergelijke afwijkingen wel aan het licht. In Nederland is zo'n opleveringsmeting (een 'functionele prestatietest') nog steeds niet gebruikelijk.

Een goede opleveringsmeting is gebaseerd op een eenduidig en transparant protocol dat door alle betrokken partijen is geaccordeerd. Volgens dit protocol worden de prestaties eenduidig vastgelegd en getoetst aan het programma van eisen (PvE). Onderdelen die hierbij aan de orde komen zijn:

- De volumestromen en de inregeling.
- De capaciteiten.
- De energetische prestaties van het systeem.
- Het functioneren van de regeling.

Voor het testen van de regelingen is het nodig dat er langere tijd aan de installatie wordt gemeten.

Het verdient aanbeveling de opleveringsmetingen door een onafhankelijke partij te laten uitvoeren.

Wanneer de installatie goed functioneert en correct is opgeleverd, is doeltreffend onderhoud mogelijk. Beheer en onderhoud moeten niet alleen worden gezien als een kostenpost, maar ook als een mogelijkheid om een probleemloze inzet van een installatie te borgen en om operationele kosten (waaronder de energiekosten) zo laag mogelijk te houden. ■

Hoofdstuk 5

Warmtepompsystemen en -componenten

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van gaswarmtepompen die momenteel op de markt zijn en stelt daarbij scherp op de techniek. Eerst komen warmtepompen met een gasmotor en een compressor aan bod, daarna warmtepompen op basis van het sorptieprincipe. De laatste categorie bestaat uit absorptie- en adsorptiewarmtepompen. Naast een gedetailleerde beschrijving van de warmtepompen zelf worden ook mogelijkheden om de rendementen te optimaliseren toegelicht.

5.1 Rendementen

Het rendement van gasgestookte warmtepompen is gedefinieerd in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4. In principe kan het rendement van een gastoestel nooit hoger zijn dan 100% op bovenwaarde. Immers, nuttig bruikbare energie kan niet uit niets ontstaan. Energie (in de vorm van warmte) kan echter wel worden verpompt en dat is precies wat warmtepompen doen. Een warmtepomp gebruikt energie om daarmee een grote hoeveelheid warmte (afkomstig uit de omgeving) naar een hoger temperatuurniveau te brengen, zodat de warmte nuttig te gebruiken is.

Voor een goed begrip van het rendement van een warmtepomp vergelijken we dit met het rendement van een bekend gastoestel: de HR-ketel. Een HR-ketel is een voorbeeld van een apparaat dat de waterdamp in de rookgassen kan laten condenseren en dat

de warmte die vrijkomt bij de verbranding van aardgas daardoor bijna volledig kan benutten. Het theoretisch hoogst haalbare rendement van een apparaat dat aardgas gebruikt van Groningenkwaliteit is bijna 111% op onderwaarde.

In figuur 1 is het verloop van het rendement van een HR-ketel gegeven als functie van de rookgastemperatuur. Bij atmosferische druk begint de waterdamp in de rookgassen te condenseren bij een temperatuur van 56 °C. Doordat de meeste HR-ketels met een luchtvermaat functioneren, ligt de condensatietemperatuur op ongeveer 53 °C. De ketel maakt gebruik van de warmte uit de condenserende waterdamp; daardoor loopt het rendement bij temperaturen onder 53 °C snel op (het blauwe deel van de grafiek in figuur 1). De best renderende HR-ketels van dit moment halen een rendement van rond de 109% op onderwaarde, in deellast (30% van het nominaal vermogen), bij een

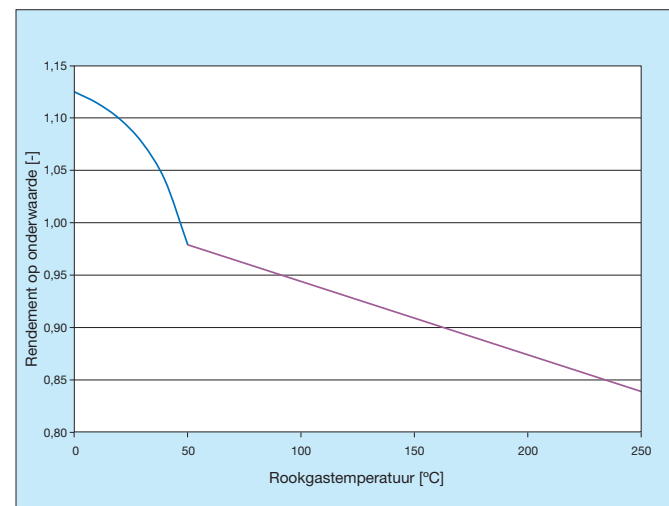
waterretourtemperatuur van 30 °C en een aanvoertemperatuur van 36 °C (dit is exclusief elektrische hulpenergie voor pomp, ventilator en regeling). Het verschil tussen dit rendement en het theoretische maximum is klein en is alleen met grote aanpassingen aan de huidige HR-ketels nog verder te verbeteren. Voor warmtepompen is de term rendement niet eenduidig toe- pasbaar, omdat maar een deel van de energie die een warmte-

Type warmtepomp	COP	PER
Gasmotor en compressor	1,2 – 2,4	1,2 – 2,4
Absorptie	1,3 – 1,8	1,3 – 1,8
Adsorptie	1,2 – 1,4	1,2 – 1,4
Elektrisch	3,0 – 5,0	1,4 – 2,2

Tabel 1 Typische waarden voor COP en PER van verschillende warmte- pompen voor verwarming. Bron: KGT

Type warmtepomp	COP	PER
Gasmotor en compressor	1,0 – 1,2	1,0 – 1,2
Absorptie	0,2 – 0,7	0,2 – 0,7
Adsorptie	0,2 – 0,4	0,2 – 0,4
Elektrisch	2,5 – 4,0	1,1 – 1,6

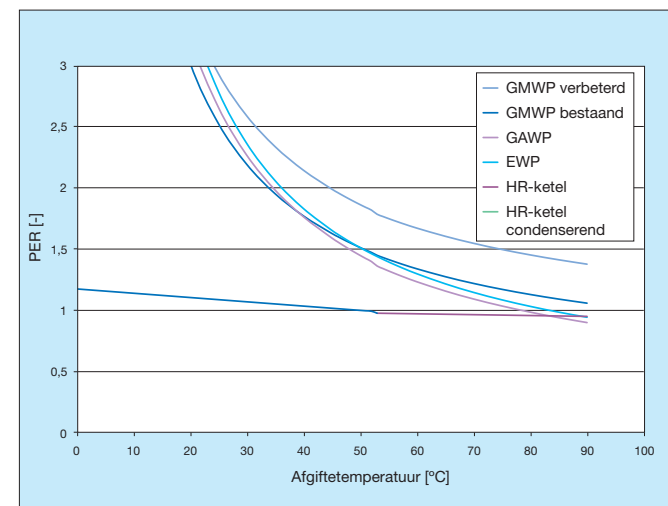
Tabel 2 Typische waarden voor COP en PER van verschillende warmte- pompen voor koeling. Bron: KGT



Figuur 1 Theoretisch haalbaar rendement van een HR-ketel als func- tie van de rookgastemperatuur. Bron: KGT

pomp gebruikt een betaalde vorm van energie is (aardgas of elektriciteit). Het andere deel is omgevingswarmte, die voldoende en vrijelijk beschikbaar is. Deze laagtemperatuurwarmte onttrekt de warmtepomp bijvoorbeeld aan oppervlaktewater of aan de bodem (via een bodemwarmtewisselaar) of uit de lucht. Voor warmtepom- pen wordt daarom de COP gebruikt als aanduiding van het rende- ment. De COP geeft aan hoeveel eenheden nuttige energie het toestel levert op basis van één eenheid betaalde energie. De defi- nitie en de systeemgrenzen van de COP zijn gegeven in paragraaf 4.2. Wanneer warmtepompen met elkaar worden vergeleken, is de PER een nuttig gegeven. Hierin is de COP herleid tot een hoeveelheid primaire energie, zoals beschreven in paragraaf 4.2. De tabellen 1 en 2 geven voor verschillende warmtepompen de typische waarden voor de COP en PER in verwarmingsbedrijf en in koelbedrijf. De omstandigheden zijn voor alle warmtepompen in de tabellen gelijk.

Een warmtepomp kan warmte afgeven op een temperatuur- niveau van ongeveer 55 °C maximaal. Algemeen geldt dat de prestaties van een warmtepomp beter zijn bij lagere temperaturen. In figuur 2 is voor verschillende warmtepompen en een HR-ketel weergegeven hoe de PER afhangt van de afgiftetempera- tur. De rendementen zijn bepaald aan de hand van het Carnotrendement



Figuur 2 Berekende Primary Energy Ratio (PER) voor verschillende ap- paraten als functie van de afgiftetempera- tur. De HR-ketel is dezelfde als die in figuur 1. Bron: KGT

voor de betreffende warmtepomp. Het rendement van een gas- motor $\eta_{mechanisch}$ is gesteld op 30% en het rendement van centrale opwekking $\eta_{centrale}$ is gesteld op 42% op onderwaarde of 39% op bovenwaarde, conform de geldende EPN. De Carnotrendementen zijn theoretische waarden (zie paragraaf 3.1) die in de praktijk niet worden gehaald. Om praktische rendementen te verkrijgen zijn de berekende rendementen voor de gasmotorwarmtepomp vermenig- vuldigd met een factor 0,6 en voor de absorptiewarmtepomp met een factor 0,58. Deze factor is gebaseerd op praktijkervaringen.

In figuur 2 worden de rendementen van de verschillende toe- stellen met elkaar vergeleken bij gelijke condities. Bij de gasmotorwarmtepomp zijn nog verdere verbeteringen mogelijk. Het effect hiervan is als een aparte kromme in de grafiek opgenomen. Voor de berekeningen is uitgegaan van een bron- temperatuur van 0 °C en (voor de gasabsorptiewarmtepomp) een generatortemperatuur van 150 °C.

Zoals te zien in de grafiek, liggen bij een afgiftetempera- tur van 45 °C de PER's van de bestaande gasmotorwarmtepomp, de gasabsorptie- warmtepomp en de elektrische warmtepomp rond 1,6. De PER van een verbeterde gasmotorwarmtepomp ligt bij 45 °C op bijna 2. Het verbeterde ontwerp van de gasmotorwarmtepomp scoort voor alle afgiftetemperaturen beter dan de andere apparaten, waarbij het ver- schil toeneemt met de afgiftetempera- tur.

Als referentie is in de grafiek een HR-ketel weergegeven. De sprong in rendement bij lagere temperaturen (het blauwe deel van de grafiek voor de HR-ketel) als gevolg van condensatie van waterdamp is ook bij de gasmotor- en gasabsorptiewarmtepompen meegenomen, maar het effect is in de grafiek niet te zien.

Uit de grafiek blijkt dat een klein verschil in afgiftetempera- tur al een groot verschil kan uitmaken in de PER van het apparaat. Hoe lager de afgiftetempera- tur, hoe beter het rendement.

Verschiede warmtepompen kunnen goed worden vergeleken aan de hand van de COP- en PER-waarden. Omdat de tempe- ratuurcondities invloed hebben op de COP en PER, schrijven de internationale normen en standaarden voor dat deze waarden bij dezelfde temperatuurcondities worden bepaald. Tabel 3 is een voorbeeld uit de EN12309 voor gasgestookte klimaatregelaars en gaswarmtepompen. Hier geven de letters de gebruikte media aan en de cijfers de (aanvoer-)temperaturen daarvan. Vóór de

Test conditie		T1	T2	T3	T4
Lucht/ water	Met ontdooi-cyclus	A7(6)/W50	A2(1,5)/W35	A15(12)/ W50	A-7(-8)/ W50
	Zonder ontdooi-cyclus	A7(6)/W50	A15(12)/W50	A7(6)/W35	
Ventilatielucht/water		A20(12)/W50	A20(12)/W35		
Water/water		W10/W50	W10/W35	W15/W50	
Brine/water		B0/W50	B0/W35	B-5/W50	
Buitenlucht of recircu- latie- lucht	Met ontdooi-cyclus	A7(6)/ W20(12)	A2(1,5)/ A20(12)	A-7(-8)/ A20(12)	
	Zonder ontdooi-cyclus	A7(6)/ W20(12)	A15(12)/ A20(12)		
Ventilatie-/recirculatielucht		A20(12)/ A20(12)			
Ventilatie-/verse lucht		A7(6)/ W20(12)			
Water/recirculatielucht		W10/A20(12)	W15/A20(12)		
Brine/recirculatielucht		B0/A20(12)	B-5/A20(12)		
Gesloten waterbron		W20/A20(12)			

Tabel 3 Temperatuurcondities voor COP-bepaling van gaswarmte- pompen volgens EN12309.

schuine streep staat de warmtebron, na de schuine streep het afgiftemedium. Conditie A7(6)/W50 betekent bijvoorbeeld dat de warmtebron lucht (air) een temperatuur heeft van 7 °C (A7), terwijl de (aanvoer-)temperatuur van het afgiftemedium water 50 °C is (W50). Naast lucht en water wordt ook wel antivries gebruikt, een mengsel van water en glycol. In het Engels wordt dit *brine* genoemd, in de tabel afgekort met B. Voor lucht bestaat de temperatuurconditie nog uit twee temperaturen: de droge- en de natteboltemperatuur. De natteboltemperatuur wordt tussen haakjes weergegeven.

5.2 De gasmotorwarmtepomp

Een gasmotorwarmtepomp wordt toegepast voor ruimteverwarming en -koeling. Gelijktijdig verwarmen en koelen van verschillende ruimtes is mogelijk en is bovendien goed voor het rendement, omdat zowel de warmte als de koude nuttig worden gebruikt.

Gasmotorwarmtepompen worden ook toegepast voor het ver- warmen van tapwater. Hiervoor kan de warmte uit het koude- middel worden gebruikt, maar de hogere temperaturen van de motorkoeling en de uitlaatgassen zijn hiervoor beter geschikt. Om die te benutten zijn wel additionele warmtewisselaars nodig. Een te lage warmwatertemperatuur kan gezondheidsrisico's met zich meebrengen (bijvoorbeeld als gevolg van legionella-

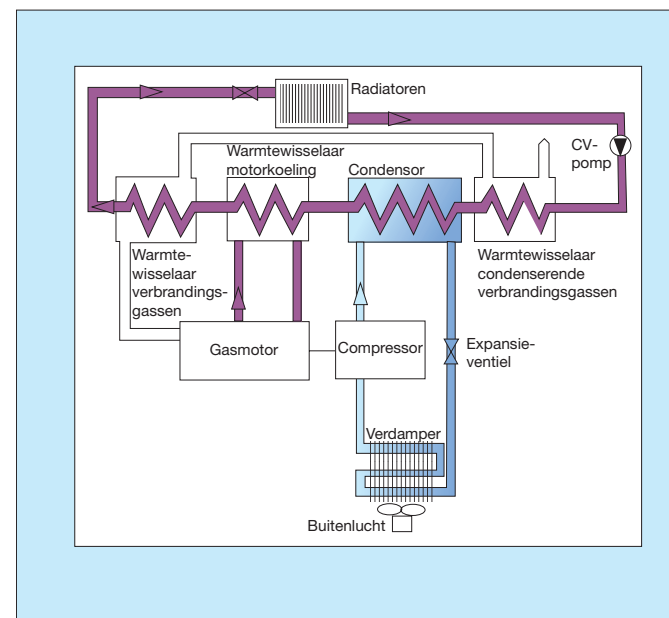
besmetting). Naverwarming van het tapwater door bijvoorbeeld een HR-ketel kan daarom nodig zijn. Overigens wordt een additionele ketel in veel systemen toegepast, zowel voor de bereiding van warm tapwater als voor het leveren van voldoende verwarmingscapaciteit tijdens piekvraag.

5.2.1 Systeemoverzicht

Een gasmotorwarmtepomp bestaat uit een gasmotor, warmtewisselaars (verdamer en condensor), een expansieventiel en een compressor. Een compleet systeem is weergegeven in figuur 3. De werking ervan is reeds beschreven in paragraaf 3.2.1.

In het systeemontwerp van figuur 3 zijn naast de condensor en de verdamer nog drie warmtewisselaars opgenomen, die het CV-water verwarmen met warmte uit de motor of uit de rookgassen. Bij de plaatsing van de verschillende warmtewisselaars in het systeem is rekening gehouden met de temperatuurniveaus van de verschillende warmtestromen.

- Een deel van de energie in de rookgassen komt vrij als de waterdamp in de rookgassen condenseert. Hoe kouder



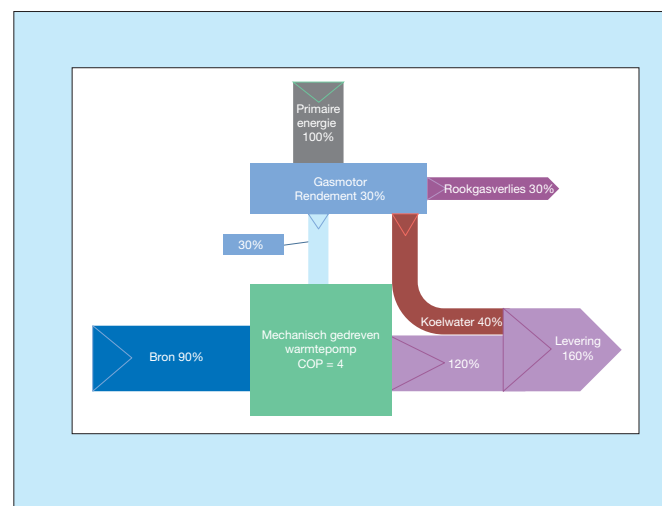
Figuur 3 Schematische weergave van een geoptimaliseerde lucht/water-gasmotorwarmtepomp. Bron: KGT

het CV-retourwater, hoe meer waterdamp uit de rookgassen kan condenseren.

- In de condensor wordt de warmte uit het koudemiddel overgedragen aan het CV-water. Dit gebeurt bij temperaturen tot ongeveer 55 °C.
- Na de condensor draagt ook de warmtewisselaar voor de motorkoeling zijn warmte over aan het CV-water. Het temperatuurniveau van de motorkoeling ligt rond 85 °C.
- In de warmtewisselaar voor de rookgassen is het temperatuurniveau het hoogst. De rookgassen die net uit de motor komen hebben een temperatuur van 500 à 600 °C.

Door de drie additionele warmtewisselaars naast de condensor kan de warmte die op verschillende temperatuurniveaus beschikbaar is optimaal worden benut. In figuur 4 zijn de warmtestromen voor een gasmotorwarmtepomp weergegeven in een Sankeydiagram.

Wanneer de verdamer lucht als warmtebron gebruikt, bestaat bij lage buitentemperaturen en hoge luchtvochtigheid de kans dat de verdamer berijpt. De rijp zal na verloop van tijd de warmteoverdracht belemmeren. De verdamer moet dus verwarmd worden totdat alle rijp is verdwenen. Dit kan door de warmtepomp korte



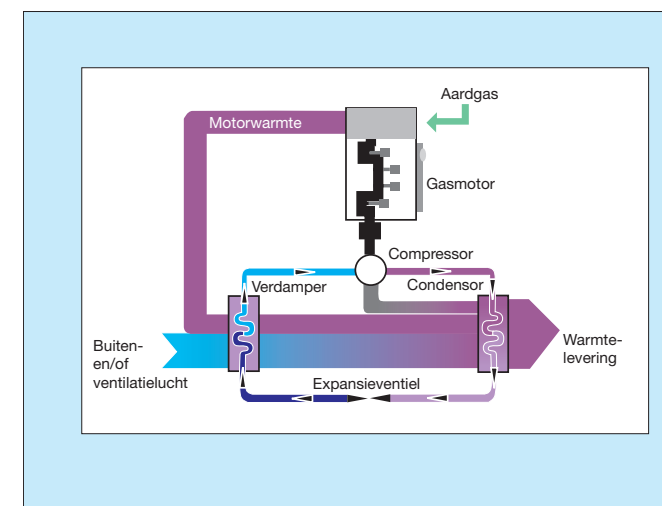
Figuur 4 Sankeydiagram van bestaande gasmotorwarmtepomp. Bron: TNO

tijd in koelbedrijf te schakelen. Daardoor werkt de verdamer als condensor en ontdooit het ijs. Ook kan het hete gas uit de compressor direct naar de buitenwarmtewisselaar geleid worden om de warmtewisselaar te ontdooien. In het geval van een open waterbron mag de verdampertemperatuur niet onder het vriespunt komen. Bij een gesloten bron wordt in de regel antivries toegevoegd.

Japanse gasmotorwarmtepompen

Het warmtepompsysteem in figuur 5 is een ontwerp dat in Japan veel wordt toegepast. Het is daar ontwikkeld als alternatief voor elektrische warmtepompen. Gaswarmtepompen zijn aantrekkelijk omdat in Japan in de zomer de piekvraag naar elektriciteit soms zo hoog is, dat de kans op storingen in het net toeneemt. Inmiddels zijn er in Japan al ruim 600.000 gasmotorwarmtepompen geplaatst.

Het Japanse ontwerp is van oorsprong een lucht/luchtsysteem dat in principe ook in Nederland toegepast kan worden. Toch is de Nederlandse situatie anders dan de Japanse. Het eerste verschil is het klimaat. In Japan is dit warmer en vochtiger dan in Nederland. Voor het gaswarmtepompsysteem in figuur 5 is ruimtekoeling daarom de belangrijkste functie. Het systeem is niet geoptimaliseerd voor verwarming, de functie die in de Nederlandse situatie belangrijker zou zijn dan de koelfunctie.



Figuur 5 Schematische weergave van een Japanse gasmotorwarmtepomp. Bron: KGT

Het tweede verschil is de manier van warmte- en koudeafgifte. De drie additionele warmtewisselaars uit figuur 3 komen in het Japanse ontwerp niet voor omdat er in Japan geen CV-watersysteem is. Dit is ook op te maken uit figuur 5, waar alleen de verdamer en de condensor te zien zijn.

Er zijn dus belangrijke verschillen tussen de Nederlandse en de Japanse situatie. Toch zijn de Japanse gasmotorwarmtepompen interessant voor de Nederlandse markt, vooral omdat ze gebruikmaken van bewezen techniek. Het rendement kan bovendien toenemen door een aantal aanpassingen in het ontwerp. Deze worden verderop besproken.

Voor de distributie van warmte en koude naar de gewenste ruimte zijn drie media beschikbaar:

- Koudemiddel.
- CV-water.
- Lucht.

De leidingdiameter die voor het distributiesysteem gebruikt moet worden, hangt af van het gebruikte medium. Voor koudemiddel kunnen relatief dunne leidingen worden gebruikt. Het koudemiddel wordt naar de warmtewisselaar in de gewenste ruimte geleid en de lucht in deze ruimte wordt vervolgens door de warmtewisselaar verwarmd of gekoeld. Dit systeem komt in Nederlandse huishoudens weinig voor. In de utiliteitsbouw komt men het vaker tegen als VRF-systeem.

In Nederland is water het meest gebruikte distributiemiddel, zowel in huishoudens als in de utiliteit. Om een gasmotorwarmtepomp breed inzetbaar te maken voor de Nederlandse situatie, moet hij dus CV-water kunnen verwarmen of koelen. Met enkele aanpassingen aan het bestaande ontwerp (door bijschakeling van een zogeheten hydromodule) is dat mogelijk. Het water wordt in de hydromodule verwarmd of gekoeld en vervolgens gedistribueerd naar de gewenste ruimte, waar het afgiftesysteem (dat bestaat uit radiatoren) de ruimte verwarmt of koelt. Doorgaans worden de radiatoren alleen gebruikt om te verwarmen, maar vaak zijn ze (al dan niet met kleine aanpassingen) ook geschikt om mee te koelen. De leidingen die gebruikt worden in distributiesystemen met water hebben een grotere diameter dan koudemiddelleidingen.

De leidingdiameters in een distributiesysteem voor lucht zijn het grootst; er is zelfs sprake van kanalen. De lucht wordt in de warmte-

pomp verwarmd of gekoeld en vervolgens naar de gewenste ruimten geleid. In Nederlandse huishoudens komen klimaatsystemen op basis van lucht sporadisch voor. In utiliteitsbouw worden luchtsystemen vaker ingezet, doorgaans in combinatie met het ventilatiesysteem.

Ook bij Japanse gasmotorwarmtepompen is een voorziening getroffen die voorkomt dat bij lage buitentemperaturen waterdamp op het oppervlak van de verdamper aanvriest. In het ontwerp van figuur 5 gaat de motorwarmte die wordt onttrokken voor motorkoeling naar de verdamper, zodat er ook bij lage buitentemperaturen (bijvoorbeeld $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) voldoende warmte aanwezig is om het koudemiddel te verdampen.

Voor buitentemperaturen lager dan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ zal de COP dan ook op ongeveer één uitkomen. Door de gaswarmtepomp uit te breiden met additionele warmtewisselaars die de motorwarmte op hoge temperatuur aan het CV-water afgeven, zoals weergegeven in figuur 3, kunnen ontwerpers het rendement verhogen. Zoals gezegd bestaat een gasmotorwarmtepomp uit een gasmotor, warmtewisselaars, een expansieventiel en een compressor. Deze hoofdcomponenten komen in de volgende paragrafen aan de orde.

5.2.2 Gasmotor

De gasmotoren die worden gebruikt in warmtepompen zijn Ottomotoren. Kleinere gasmotoren zijn afgeleid van heftruck- en scheepsmotoren. De grotere gasmotoren ($> 60\text{ kW}_{\text{as}}$) zijn meestal afgeleid van industriële motoren die ontworpen zijn voor een lange levensduur en lage toerentallen. Een grote revisiebeurt vindt doorgaans iedere 20.000 tot 30.000 draaiuren plaats. De motoren zijn zo ontworpen dat alle aan slijtage onderhevige onderdelen vervangen kunnen worden. De levensduur van een warmtepompmotor wordt bovendien gunstig beïnvloed doordat de motor, anders dan bijvoorbeeld een automotor, weinig starts en stops maakt, op een laag toerental draait en lange tijd op bedrijfstemperatuur functioneert.

Emissies

Gasmotoren vallen onder het Besluit emissie-eisen stookinstallaties (BEES). Voor de NO_x -uitstoot van gasmotoren geldt 140 g/GJ vermenigvuldigd met één dertigste van het motorrendement (in procenten) als bovengrens. Bij een asvermogen van 50 kW of

minder is 800 g/GJ vermenigvuldigd met één dertigste van het motorrendement de norm.

Verbrandingsprocessen heten 'stoichiometrisch' wanneer de hoeveelheid lucht die wordt toegevoerd precies genoeg is om een bepaalde hoeveelheid brandstof volledig te laten verbranden. Er is geen lucht-overmaat, wat wordt aangeduid met $\lambda = 1$. Om aan de emissie-eisen te kunnen voldoen werken de meeste gasmotoren met een lucht-overmaat ($\lambda > 1$). Luchtvermaat zorgt voor een lagere verbrandingstemperatuur en daarmee een lagere NO_x -emissie. In figuur 6 is voor gasmotoren het verloop van de verschillende emissies en het rendement weergegeven als functie van de luchtvermaat. Stoichiometrisch draaiende gasmotoren ($\lambda = 1$) hebben een hoog specifiek vermogen. Bij een luchtvermaat neemt het vermogen af.

Een andere methode om aan de emissie-eisen te voldoen is het toepassen een driewegkatalysator, vergelijkbaar met die in auto's. Een driewegkatalysator reduceert NO_x tot N_2 en CO , en zet onverbrande koolwaterstoffen om in CO_2 en H_2O . De katalysator werkt alleen goed als er een kleine luchtvermaat heerst ($\lambda \approx 0,99$). De NO_x -reductie is in dat geval meer dan 95%.

De luchtfactor λ wordt geregeld door middel van een lambda-sensor. Deze sensor kan in de loop der tijd verouderen, waardoor de gasmotor steeds rijker gaat draaien. Periodiek (om het uur) afstellen van het *setpoint* kan dit voorkomen. Bij sommige regelsystemen gebeurt dit automatisch. De levensduur van een λ -sensor is doorgaans zo'n 5.000 tot 6.000 uur.

Een driewegkatalysator is gevoelig voor *misfiring* en voor het uitvallen van een bougie. Onverbrand methaan komt dan in de katalysator, waardoor deze oververhit kan raken. Een temperatuurbeveiliging in de rookgasafvoer net achter de katalysator of een bewaking van de ontsteking van de bougies kan dit voorkomen.

Onderhoud

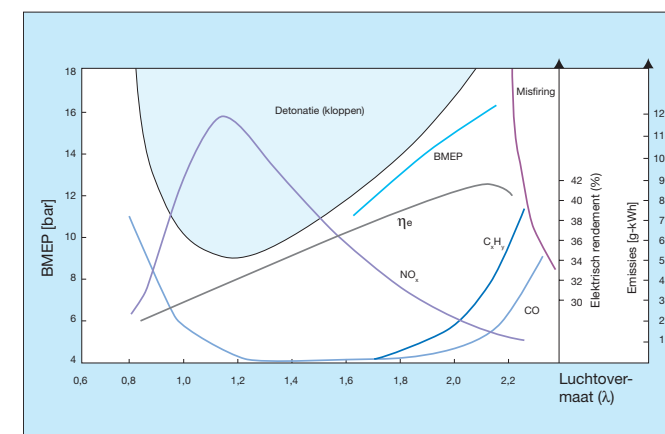
Net als iedere verbrandingsmotor heeft een gasmotor onderhoud nodig. Gebruikers kunnen een onderhoudscontract afsluiten met de leverancier. Bij grote installaties of installaties met oude motoren is een regelmatige visuele inspectie (op onder meer lekkages en slijtage of veroudering van aandrijfriemen en slangverbindingen) aan te raden. Het onderhoudsinterval varieert per gasmotor. Als indicatie geldt dat na elke 1.000 tot 1.500 draaiuren onderhoud moet plaatsvinden. Dit bestaat onder meer uit:

- Kleppen stellen.
- Inspectie van bougies (zo nodig vervangen).
- Vervangen van olie- en luchtfilter.
- Inspectie van de brandstof/luchtverhouding.
- Compressiemeting op alle cilinders.
- Schoonmaken van de carterontluchting.

De huidige generatie gasmotoren vergt aanzienlijk minder onderhoud. Deze worden steeds meer gebruikt in gasmotorwarmtepompinstallaties. De intervalltijden voor onderhoud zijn verlengd tot wel 10.000 draaiuren voor het vervangen van oliefilter, bougies, V-riem en het controleren van de kleppen en tot 30.000 draaiuren voor olieversen. Deze motoren hebben onder meer een vergrote carterinhoud, een aangepaste ontsteking en speciale bougies. De motoren worden gesmeerd met synthetische olie. Bij sommige typen gasmotoren moeten om de 30.000 draaiuren de cilinderkappen worden vervangen. Een grote revisiebeurt vindt plaats na 30.000 tot 35.000 draaiuren voor snel lopende en 25.000 draaiuren voor langzaam lopende gasmotoren.

Starten

Een goede capaciteitsregeling voor een gasmotorwarmtepomp zorgt ervoor dat de motor niet onnodig vaak wordt gestart en gestopt. Voor het starten kunnen accu's worden gebruikt, maar deze kunnen defect of leeg raken. Als de startmotor gebruikmaakt van elektriciteit uit het net neemt de bedrijfszekerheid verder toe.



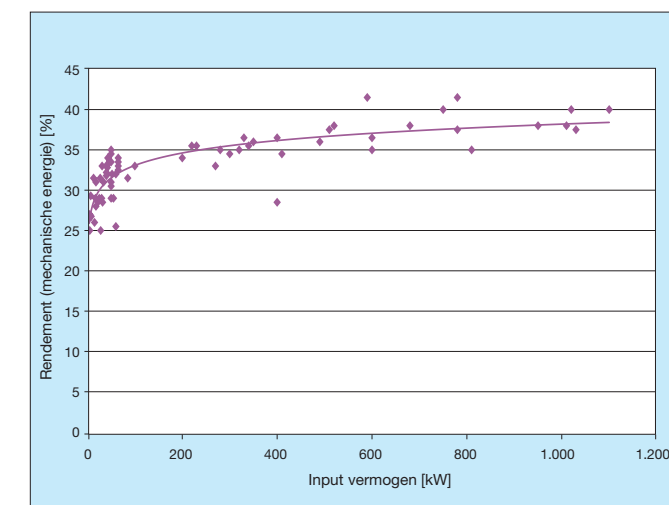
Figuur 6 Motor karakteristieken en emissies als functie van de luchtfactor (BMEP is de werkdruk in de gasmotorcilinders). Bron: KGT

Asrendement

Het maximale asrendement varieert per merk, type en vermogen. Het vollastrendement ligt tussen 25 en 38%. Grotere gasmotoren hebben in de regel een hoger rendement. Figuur 7 geeft een overzicht van motorrendementen als functie van de vermogensinput.

Het asrendement is sterk afhankelijk van de belasting van de motor. Bij vollast heeft een gasmotor het hoogste rendement. Bij halfvast kan het rendement acht procentpunten lager liggen. Wanneer het nuttig toegepaste asvermogen en de nuttige warmte worden samengenomen, ook wel totaalrendement genoemd, ligt het rendement van een gasmotor tussen de 90% en 100% (op onderwaarde). Verliezen treden op in de vorm van uitstoot van onverbrand gas (1 tot 4%), warmteverliezen door de uitstoot van verbrandingsgassen (3 tot 10%) en stralings- en convectieverliezen (3 tot 5%). Het aandeel onverbrand gas in de emissies (CH_4 -emissie in de uitlaatgassen) ligt bij kleinere motoren rond 1%, bij grotere gasmotoren met voorkamerontsteking kan dit oplopen tot 4%. In vollast is de nuttige motor- en rookgaswarmte ongeveer gelijk.

De COP van gasmotorgedreven warmtepompen blijft beperkt als de warmtepompen alleen de mechanische energie van de motor



Figuur 7 Rendement van verbrandingsmotoren (op asvermogen) als functie van het (gas-)inputvermogen. Bron: KGT

gebruiken. Met een aantal aanpassingen, zoals te zien in figuur 3, kan de COP aanzienlijk worden verbeterd. Deze aanpassingen worden besproken in paragraaf 5.2.6.

Capaciteitsregeling

De capaciteitsregeling van een gasmotorwarmtepomp heeft grote invloed op het rendement. Het rendement van de gasmotor is hoog als de motor een hoog koppel moet leveren. In figuur 9 is het gasverbruik van een gasmotor uitgezet tegen het koppel. Toerentalregeling is de manier om het vermogen van een warmtepomp te regelen. Het vermogen neemt toe of af met het toerental, terwijl het koppel gelijk blijft. Japanse gasmotorwarmtepompen gebruiken meerdere kleine snaargedreven scrollcompressoren. De capaciteit van de gasmotorwarmtepompen wordt behalve met het motortoerental ook geregeld door in- en uitschakelen van de individuele compressoren met behulp van magnetische koppelingen. Figuur 11 geeft de warmteproductiefactor van een gaswarmtepomp als functie van het verwarmingsvermogen en de capaciteit van de compressor. Hierin is het effect van dit aan- en uitregelen geïllustreerd.

5.2.3 Compressor

In mechanische warmtepompsystemen (gasmotorwarmtepompen) is de compressor een belangrijke component. De efficiency van de compressor bepaalt in belangrijke mate de COP van de warmtepomp. Hieronder wordt een aantal veelvoorkomende compressoren behandeld.

Op de plek waar de aandrijving van de compressor door de behuizing gaat, ontstaat in potentie een kans op lekkage van koudemiddel. Bij elektrische warmtepompen is het mogelijk de compressor en de elektrische aandrijving in dezelfde behuizing onder te brengen, zodat alleen nog een doorvoer nodig is voor de voeding. Bij gasmotorwarmtepompen is dit niet mogelijk. Hier moet altijd een bewegende as door de compressorbehuizing worden gevoerd.

Zuigercompressoren

Zuigercompressoren (figuur 8) zijn zeer geschikt voor het realiseren van grote compressieverhoudingen. Bij vermogens van minder dan 1 kW tot meer dan 16 MW liggen de volumestromen tussen 1 en 50.000 m³/h. Zuigercompressoren zijn vrijwel altijd oliegesmeerd.

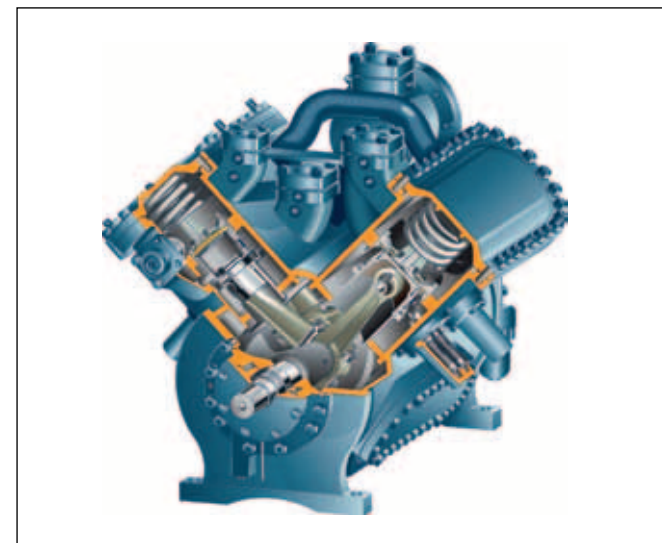
Bij een zuigercompressor wordt het gasvormige koudemiddel

in een cilinder gezogen bij de neergaande slag van de zuiger. Bij de opgaande slag sluit de inlaatklep en wordt het gas gecompriemd. Als de druk voldoende hoog is geworden, gaat de uitlaatklep open en kan het gecompriemde gas in de leiding naar de condensor stromen.

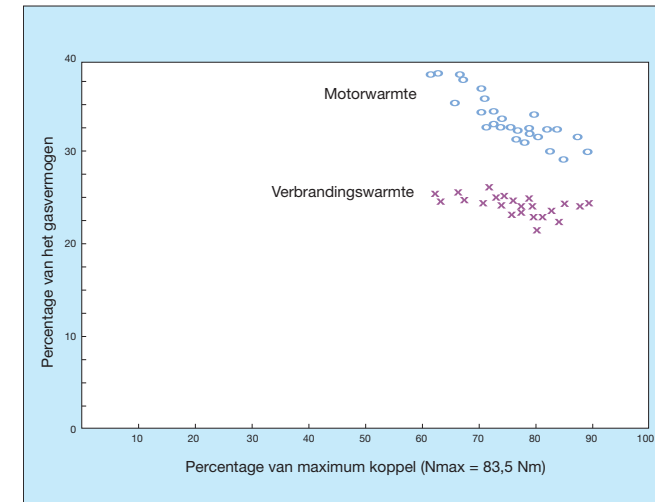
De in- en uitlaatkleppen worden gewoonlijk dichtgedrukt door stalen veren. Bij een bepaald drukverschil gaat de klep open. De kleppen van grotere zuigercompressoren kunnen voorzien zijn van kleplichters. Hiermee kunnen één of meerdere cilinders uitgeschakeld worden. Deze deellastregeling gaat echter ten koste van de efficiency van de compressor.

Schoepencompressor

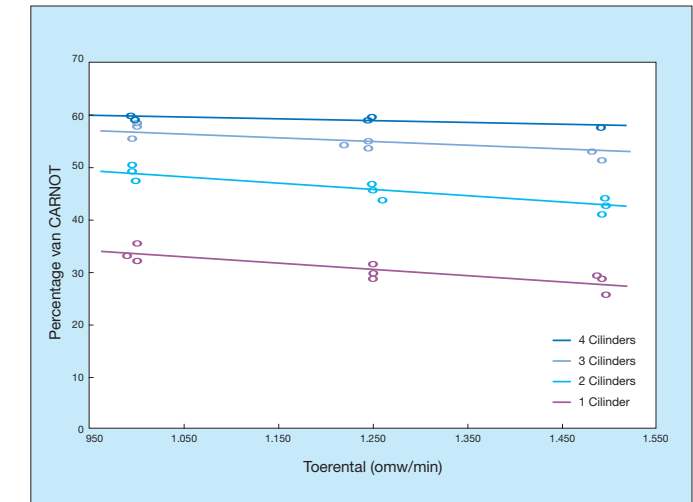
Een veel gebruikte compressor in gaswarmtepompen met kleinere vermogens is de schoepencompressor, ook wel *rotary compressor* of *rotary vane compressor* genoemd. Figuur 13 op pagina 97 toont het werkingsprincipe. De compressor bestaat uit een excentrisch draaiende rotor met schoepen. Deze schoepen worden door de centrifugaalkracht naar buiten geduwd, tegen het huis van de compressor aan. Hierdoor ontstaat een kamer waarvan het volume varieert onder invloed van het draaien van de rotor. Daarbij wordt het gas in de kamer gecompriemd.



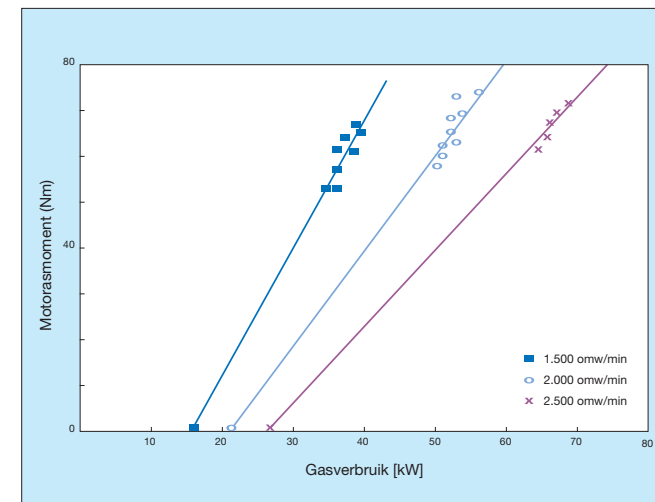
Figuur 8 Dwarsdoorsnede van een zuigercompressor. Bron: GEA Grasso



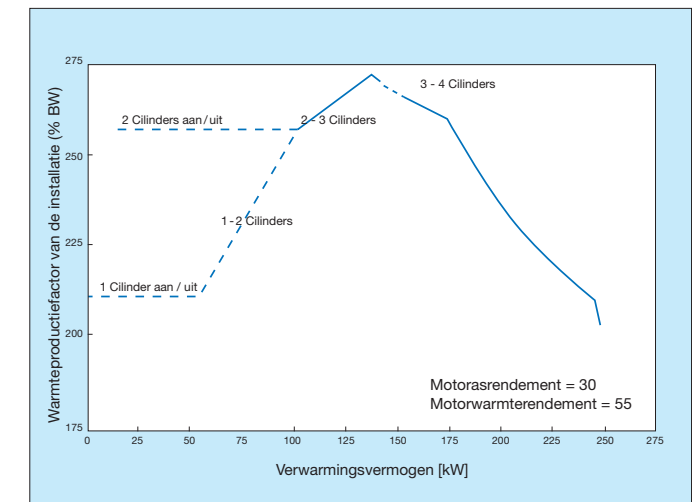
Figuur 9 Percentage motor- en verbrandingsgaswarmte in relatie tot het geleverde koppel. Bron: KGT



Figuur 11 Invloed van toerental- en capaciteitsregeling op het Carnotrendement. Bron: KGT



Figuur 10 Gasverbruik in relatie met het koppel van de gasmotor. Bron: KGT



Figuur 12 De warmteproductiefactor van een gasmotorwarmtepomp als functie van het verwarmingsvermogen en de capaciteit van de compressor. Bron: KGT

Schoepencompressoren zijn in de regel compacter dan zuigercompressoren. Ze zijn ook stiller en kunnen hogere compressieverhoudingen realiseren. Schoepencompressoren zijn wel meer gevoelig voor storingen en vergen zorgvuldig onderhoud. Voor een goede werking en een hoge efficiency is oliesmering van de schoepen nodig. Volumestromen gaan tot ongeveer 15.000 m³/h voor de grootstecompressoren.

Scrollcompressoren

De scroll- of spiraalcompressor wordt op grote schaal gebruikt in de koudetechniek, met name voor de kleinere capaciteiten. De compressor is aantrekkelijk omdat het aantal bewegende delen klein is en omdat hij weinig geluid en trillingen produceert. Vergeleken met zuigercompressoren zijn scrollcompressoren meestal efficiënter. De compressieverhoudingen die haalbaar zijn liggen in dezelfde orde als die van een zuigercompressor. Naarmate de compressieverhouding groter wordt, is de scrollcompressor minder efficiënt.

De compressor bestaat uit een spiraal die in een stationaire contraspiraal grijpt (figuur 14). Door de verdringende beweging van de bewegende spiraal ontstaan holtes tussen de wanden van beide spiralen en wordt de koudemiddeldamp naar het midden van de spiralen gedreven. De damp wordt bij deze beweging gecompriëerd. Een scrollcompressor heeft maar één bewegende spiraal en geen kleppen. Dit betekent dat hij minder gevoelig is voor slijtage en dus een hoge betrouwbaarheid heeft.

Schroefcompressoren

Schroefcompressoren hebben bij middelgrote vermogens (> 500 kW) de zuigercompressoren grotendeels verdrongen. Figuur 16 toont een schroefcompressor, een zogeheten *monoscrew*.

Schroefcompressoren kunnen een hogere compressieverhouding realiseren dan zuigercompressoren. Doordat er minder bewegende delen zijn, zijn ze beter geschikt om te functioneren onder zware en langdurige belasting. Afhankelijk van de constructie en de geometrie heeft een schroefcompressor een vaste volumeverhouding. Bij één bepaalde drukverhouding heeft de compressor een hoge capaciteit en een relatief laag rendement.

De tweeschroefcompressor (figuur 15) beschikt over twee rotoren (met een spiraalvormige vertanding, die in elkaar grijpen. Eén of

twee rotoren worden aangedreven. Het gas wordt ingesloten tussen de rotorlobben en vervolgens wordt het volume bij het draaien van de rotoren steeds verder verkleind waardoor de druk stijgt. Een variant is de schroefcompressor met een enkele rotor. Een getande schijf aan weerskanten van de schroefrotor neemt dan de functie van de tweede rotor over. Alle schroefcompressoren zijn oliesmeerd. De olie zorgt voor een betere afdichting, voor smering en afvoer van warmte. Bij sommige schroefcompressoren kan de inwendige geometrie worden aangepast aan de gewenste drukverhouding tussen verdamper en condensor.

Keuzecriteria

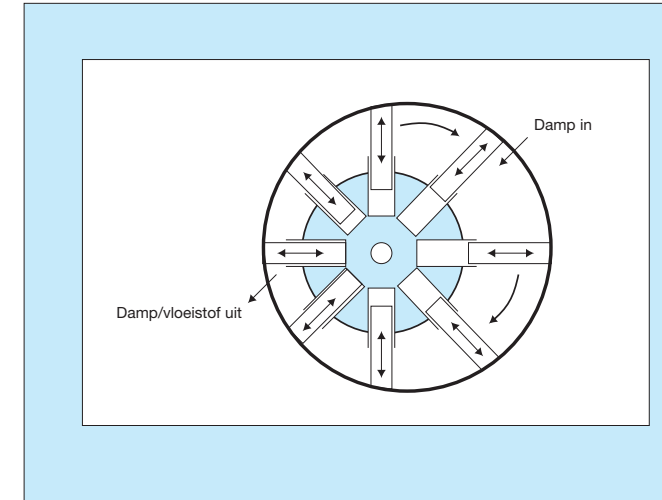
Een gaswarmtepompsysteem met grotere vermogens wordt meestal uit losse modules opgebouwd. In dat geval zijn diverse variabelen bepalend voor de keuze van het meest geschikte compressortype. Naast de gevraagde capaciteit zijn ook de gewenste compressieverhouding en het gewenste regelbereik van belang. De manier waarop de compressor wordt geregeld, heeft invloed op het compressorrendement in deellast. De onderstaande tabel geeft een aantal kengetallen voor verschillende typen compressoren.

Categorie	Volumedebiet [m ³ /h]	Drukverhouding (per trap)	Isentropisch rendement
Verdringercompressoren			
• Roots (rolzuiger)	100 – 60.000	1 – 1,1	40 – 65%
• Schroef	500 – 35.000	2 – 6	60 – 80%
• Schoepen	10 – 15.000	1 – 13	40 – 60%
• Zuiger	100 – 3.000	4 – 6	50 – 67%
• Scroll	10 – 60	1 – 10	40 – 60%

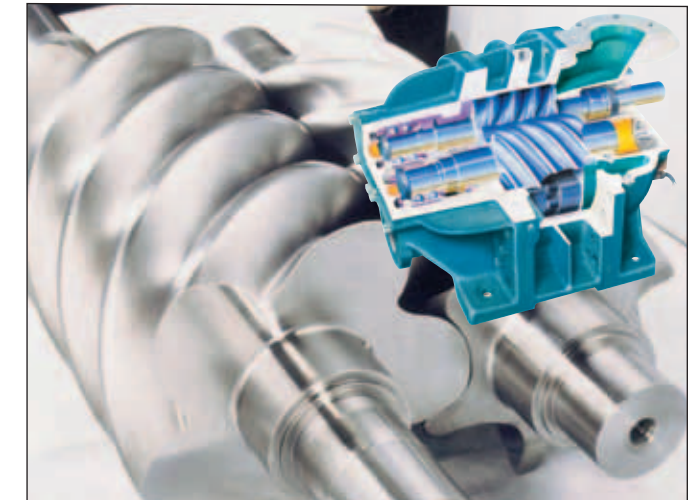
Tabel 4 Kengetallen voor verschillende typen compressoren. Bron: KGT

5.2.4 Expansieventiel

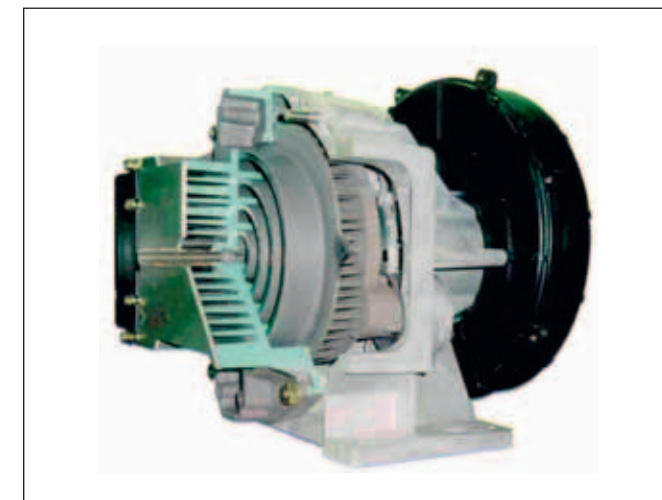
Het expansieventiel, ook wel smoorventiel genoemd, is in feite een vernauwing in de koudemiddelleiding, waarover een drukval optreedt. De functie van een expansieventiel is het regelen van de toevoer van koudemiddel aan de verdamper. Daarmee is het ventiel bepalend voor de oververhitting van het koudemiddel (zie tekstkader pagina 100). Het expansieventiel is geplaatst tussen de condensor (stroomopwaarts) en de verdamper, zoals te zien in figuur 3. Een expansieventiel moet goed ingesteld worden. Wanneer het te veel koudemiddel inspuit, zal er niet voldoende oververhitting



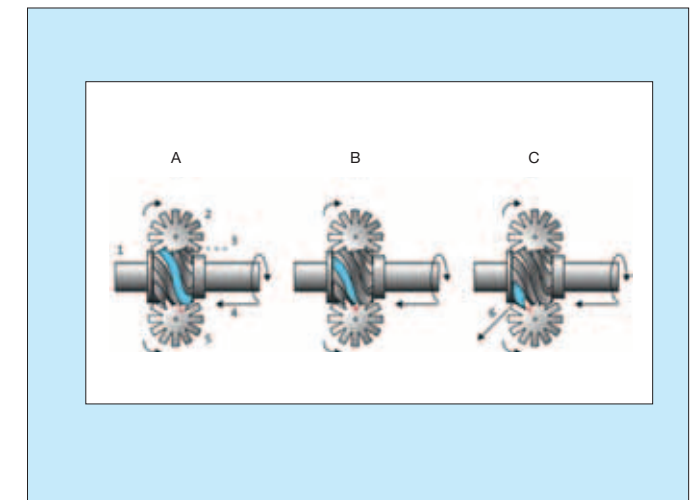
Figuur 13 Schematisch voorbeeld van rotary vane compressor. Bron: KGT



Figuur 15 De schroeven in een schroefcompressor van Howden (links) en een opengewerkt voorbeeld daarvan (rechts). Bron: KGT/GEA Grasso



Figuur 14 Voorbeeld van een scroll- of spiraalcompressor. Bron: KGT



Figuur 16 Monoscrew compressor, een bijzondere uitvoering van een schroefcompressor. Bron: KGT

optreden, met kans op 'vloeistofslag' in de compressor. Een te krap afgeregeld expansieventiel laat te weinig koudemiddel door; de oververhitting wordt te groot waardoor de verdampertemperatuur omlaag gaat.

Er zijn twee verschillende uitvoeringen van het expansieventiel; het thermostatische (mechanische) en het elektronische ventiel. Het elektronische expansieventiel wordt tegenwoordig voornamelijk in grotere systemen gebruikt. De klepstand wordt met een stappenmotor ingesteld. Hierdoor kan het elektronische ventiel de stroom van koudemiddel nauwkeuriger aanpassen

Het thermostatische expansieventiel

Een thermostatisch expansieventiel, in doorsnede weergegeven in figuur 18, is opgebouwd uit een thermisch element (1) dat door middel van een membraan van het ventielhuis gescheiden is. Het element is via een capillair met een voeler (2), een klepzitting (3) en een veer (4) verbonden. Een drukcompensatie-aansluiting (5) maakt het mogelijk om de drukval over de verdamper te compenseren. Hierdoor is het mogelijk om de oververhitting van het koudemiddel nauwkeuriger in te stellen of aan te passen aan veranderende condities. De voeler (2) is achter de verdamper geplaatst en koppelt de temperatuur van het koudemiddel achter de verdamper terug naar het expansieventiel. Op basis van dit signaal stelt het ventiel een bepaalde stand in. Wanneer alleen de temperatuur achter de verdamper bepalend is voor de stand van het expansieventiel, bestaat de kans dat er teveel koudemiddel naar de verdamper wordt doorgelaten. Door de drukval over de verdamper is het koudemiddel bij een lagere temperatuur al oververhit. De drukcompensatie compenseert dit effect en maakt bij verschillende belastingen een constante oververhitting mogelijk.

De werking van een thermostatisch expansieventiel wordt bepaald door drie drukken, weergegeven in figuur 18.

- P1, de voelerdruk die op de bovenzijde van het membraan werkt; deze opent het ventiel.
- P2, de verdampersdruk die op de onderzijde van het membraan werkt; deze sluit het ventiel.
- P3, de veerdruk die eveneens op de onderzijde van de membraan werkt en ook het ventiel sluit.

Wanneer het expansieventiel regelt, is er een evenwicht tussen de voelerdruk op de ene zijde van het membraan en de verdampersdruk plus de veerdruk op de tegengestelde zijde van het membraan. Met behulp van de veer wordt de oververhitting ingesteld.

aan veranderende omstandigheden. Dit heeft een gunstig effect op het rendement van het warmtepompsysteem. Elektronische expansieventielen kunnen doorgaans in twee richtingen doorstroomd worden, terwijl thermostatische expansieventielen maar één stroomrichting kennen. Een elektronisch expansieventiel heeft ook een groter regelbereik.

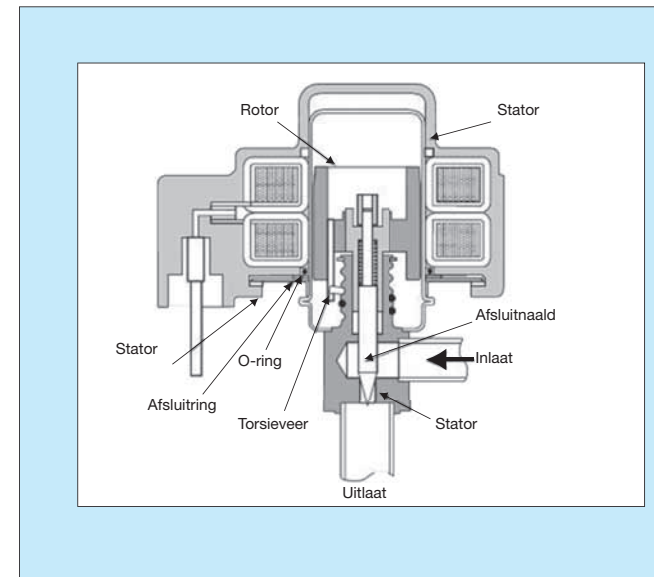
In figuur 17 is een elektronisch expansieventiel weergegeven. Het ventiel is uitgevoerd met een stappenmotor die zich binnenin de omhulling bevindt. De aansturing vindt buiten de leiding plaats. Door een elektrische stroom door een spoel te sturen wordt een magnetisch veld opgewekt in de stator. Dit magnetische veld dringt door de hermetisch gesloten omhulling heen en brengt de stappenmotor in beweging, waardoor de afsluitnaald de doorlaat groter of kleiner maakt.

5.2.5 Warmtewisselaars

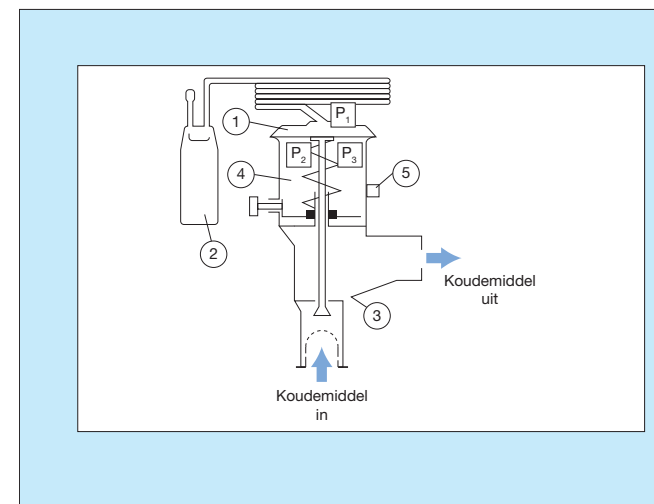
De essentie van een warmtepomp is het verplaatsen van warmte van het ene naar het andere niveau. Tussen een warmtepompsysteem en de omgeving vindt daarom uitwisseling van warmte plaats. Hiervoor zijn warmtewisselaars nodig die, afhankelijk van de functie die ze hebben, verdamper en condensor worden genoemd.

De verdamper moet voldoende warmte aan de warmtebron kunnen onttrekken. Wanneer lucht de warmtebron is, moet er veel lucht langs de verdamper kunnen stromen; lucht heeft immers een kleine warmtecapaciteit. Figuur 22 (pagina 101) toont een luchtcondensor.

In de condensor vindt bij de meeste afgiftesystemen warmte-uitwisseling plaats tussen twee vloeistoffen (de condenserende koudemiddeldamp en CV-water). De soortelijke warmte van vloeistoffen is hoger dan van gassen en de warmteoverdracht is ook beter. Hierdoor kan de condensor kleiner zijn dan de verdamper. Figuur 23 (pagina 103) toont aan de linkerkant een voorbeeld van een platenwarmtewisselaar. Rechts een schematische weergave van de koudemiddel- en waterstromen. In de figuur is goed zichtbaar dat de openingen voor koudemiddel en water verschillende diameters hebben.



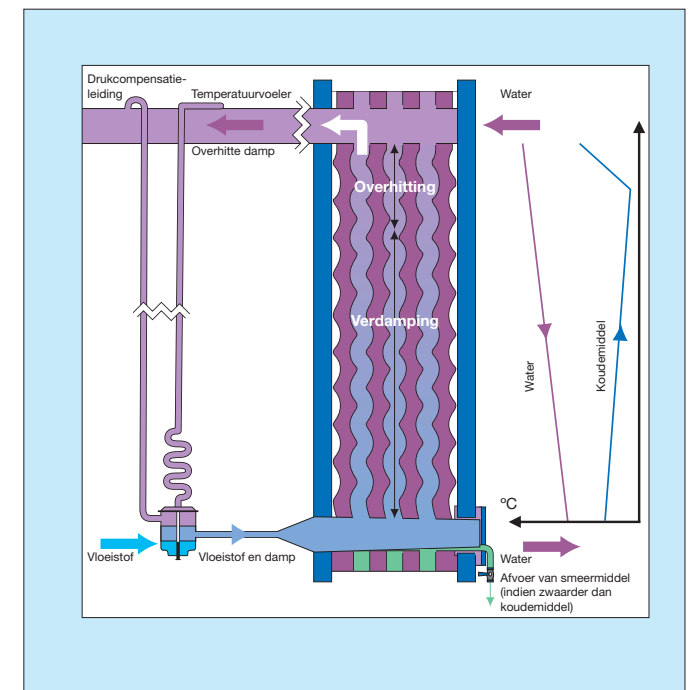
Figuur 17 Dwarsdoorsnede van een elektronisch expansieventiel. Bron: KGT



Figuur 18 Dwarsdoorsnede van een thermostatisch expansieventiel met thermisch element (1), capillair met voeler (2), klepzitting (3), veer (4) en drukcompensatie-aansluiting (5). Bron: KGT



Figuur 19 Elektronisch expansieventiel. Bron: KGT



Figuur 20 Schematische weergave van een (thermostatisch) expansieventiel met drukcompensatie en de aansluitingen in een warmtepompsysteem. Bron: Alfa Laval

Oververhitting

Oververhitting is het verschil tussen de verdampingstemperatuur van het koudemiddel en de werkelijke temperatuur van de damp uit de verdamper. De werkelijke temperatuur wordt gemeten op de plaats waar de voeler op de zuigleiding zit. In figuur 20 is een voorbeeld gegeven van een (thermostatisch) expansieventiel in een warmtepomp. Het expansieventiel gebruikt de oververhitting als signaal voor het regelen van de hoeveelheid koudemiddel die de verdamper in gaat.

Er zijn twee redenen om oververhitting van het koudemiddel toe te passen:

- **Bescherming van de compressor.** Een koudemiddel kan alleen bij een bepaalde druk en temperatuur in dampvorm bestaan. Afhankelijk van de vloeistof-damplijn van het betreffende koudemiddel kan een kleine drukval ertoe leiden dat het koudemiddel gedeeltelijk weer vloeibaar wordt. Dit is zeer schadelijk voor de werking van de compressor die niet gemaakt is om vloeistoffen te verwerken. Door oververhitting van het koudemiddel wordt voorkomen dat een deel van het koudemiddel gedeeltelijk weer condenseert.
- **Betere controle over de koudemiddelstroom.** Wanneer de koudemiddelstroom geregeld wordt bij condities in de buurt van het coëxistentiegebied (waarin het koudemiddel zowel dampvormig als vloeibaar kan zijn), is de hoeveelheid koudemiddel die naar de verdamper gaat niet of nauwelijks te regelen. Immers, binnen het coëxistentiegebied zijn druk en temperatuur constant. Als het koudemiddel wordt oververhit, kunnen druk en temperatuur weer onafhankelijk van elkaar veranderen, en is regeling mogelijk.

Bij te klein ingestelde oververhitting kan het ventiel instabiel worden (ook wel 'hunten' genoemd), waarbij het mogelijk is dat er vloeistof naar de compressor stroomt. Bij te groot ingestelde oververhitting is er een kleiner verdamperoppervlak beschikbaar om het binnenkomende koudemiddel te verdampen. Dit betekent dat het temperatuurverschil over verdamper en warmtebron groter moet zijn. Bij grotere oververhitting is het aan te zuigen dampvolume groter, doordat de dampdichtheid lager is. Afhankelijk van het gebruikte koudemiddel kan dit tot een hoge eindtemperatuur bij de compressie leiden en tot meer of minder capaciteit, afhankelijk van de soortelijke warmte van de koudemiddeldamp.

Bijkomend effect van oververhitting is dat hogere temperaturen gehaald kunnen worden aan de condensoruittrede. In figuur 21 is dit in een grafiek weergegeven. De energie in het koudemiddel komt in drie verschillende vormen voor: de enthalpie van het koudemiddel, de enthalpie van verdamping en de enthalpie van oververhitting. De enthalpie van verdamping zal voor de meeste koudemiddelen de grootste zijn, de enthalpie voor oververhitting de kleinste. Onder normale bedrijfscondities zal het koelmedium (CV-water) de warmte van het koudemiddel opnemen en zal er een klein verschil bestaan tussen de laagste koudemiddeltemperatuur en de hoogste CV-watertemperatuur, weergegeven door lijn A. Door de stroom CV-water door de condensor te verlagen heeft het medium de mogelijkheid om meer warmte op te nemen, waardoor de temperatuur van het CV-water omhoog gaat en dankzij de oververhitting zelfs boven de condensatietemperatuur van het koudemiddel uitkomt. Dit is weergegeven door de lijnen B en C. Lijn C geeft aan dat wanneer de intredetemperatuur van het CV-water lager is, de uittredetemperatuur juist hoger kan zijn.

Onderkoeling

Onderkoeling is het verschil tussen de condensatietemperatuur en de temperatuur waarmee condens de condensator verlaat. Onderkoeling is een belangrijke voorwaarde voor een zo optimaal mogelijke COP en is noodzakelijk om dampbellen in het koudemiddel vóór het expansieventiel te voorkomen. Dampbellen in het koudemiddel verminderen de capaciteit van het expansieventiel aanzienlijk.

De materiaalsamenstelling van een warmtewisselaar moet passen bij het gebruikte koudemiddel. Sommige koudemiddelen zijn corrosief. De warmtewisselaar moet hiertegen bestand zijn. Een veelgebruikt materiaal voor warmtewisselaars is roestvaststaal (RVS), dat door middel van hardsolderen wordt verwerkt tot een warmtewisselaar. De constructie van een platenwarmtewisselaar is weergegeven in figuur 24 (pagina 103).

Condensor

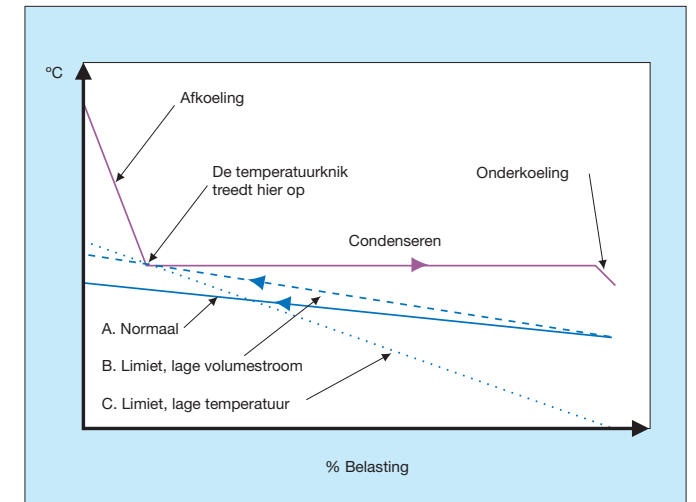
De condensor is een warmtewisselaar waarin het oververhitte, gasvormige koudemiddel condenseert. De condensor voert de condensatiewarmte van het koudemiddel af naar bijvoorbeeld lucht of water. Wanneer de warmtepomp voor verwarming wordt gebruikt is de condensor de warmtewisselaar die zich binnen bevindt. De warmte wordt dan bijvoorbeeld aan CV-water overgedragen of direct aan de lucht. Wordt de warmtepomp gebruikt voor koeling, dan is de condensor de warmtewisselaar die buiten staat. Wanneer het warmtepompsysteem gebruikt wordt om te koelen moet de condensor de warmte kunnen afvoeren die het koudemiddel heeft opgenomen. De warmteoverdracht tussen condenserend koudemiddel en afvoermedium (bijvoorbeeld buitenlucht of water) is beter naarmate het temperatuurverschil groter is. Echter, omdat de efficiency van een warmtepomp lager wordt bij hogere temperatuurverschillen, moet een economisch en efficiënt optimum worden gezocht.

In figuur 25 zijn twee warmtewisselaars weergegeven: een voor warmteoverdracht tussen koudemiddel en CV-water en een voor overdracht van koudemiddel naar lucht.

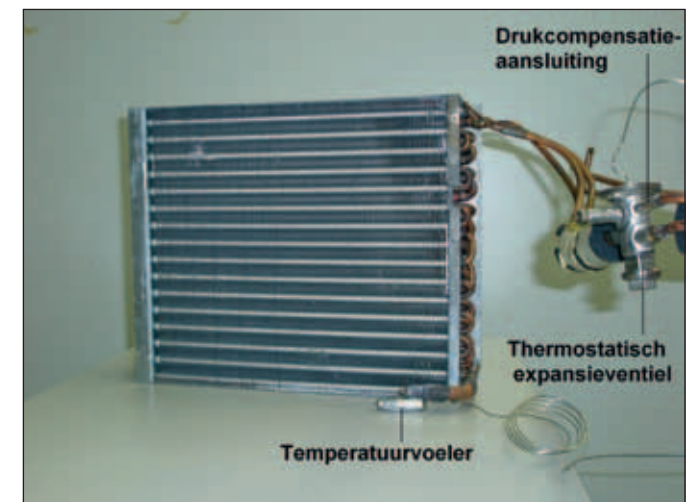
Verdamper

In de verdamper zet warmte uit de omgeving het vloeibare koudemiddel om in damp. De uitvoering van een verdamper hangt af van de functie van de warmtepomp. Ook het type warmtebron (lucht of water) is van invloed op de uitvoering van de verdamper. Om te voorkomen dat behalve damp ook nog koudemiddel in vloeistoffase uit de verdamper treedt, werken de meeste regelingen met een oververhitting aan van 2 à 3 K bij uittrede. Omdat de damp van koudemiddel een veel groter volume inneemt dan het koudemiddel in vloeibare vorm, is voor het oververhitten ongeveer een kwart van het koeloppervlak nodig.

Bij toepassingen waarbij de verdampingstemperatuur onder 0 °C komt, kan waterdamp uit de lucht op de verdamper aanvriezen.



Figuur 21 Temperatuurprofielen in de condensor, van het koudemiddel (paarse lijn) en van het koelmedium (CV-water, blauwe lijnen).
Bron: Alfa Laval



Figuur 22 Voorbeeld van een verdamper/condensor die warmte uitwisselt tussen koudemiddel (in de leidingen) en lucht.
Bron: KGT

Koudemiddelen

Gasmotorwarmtepompen werken in de regel met een condensor-temperatuur die tussen 25 en 55 °C ligt. De temperatuurlift ligt meestal tussen 20 en 45 °C. De precieze grenzen van het toepassingsgebied worden voor een deel bepaald door de eigenschappen van het koudemiddel. Bij een juiste keuze van het koudemiddel bepaalt echter de compressor de grenzen van het werkgebied. Bij de keuze van het koudemiddel zijn diverse eigenschappen van belang: de milieubelasting, de brandbaarheid, de giftigheid, de corrosiviteit, het werkgebied voor verdampings- en condensatiedrukken, het specifieke volume en de kostprijs.

Sinds het eind van de 20e eeuw worden stoffen die de ozonlaag aantasten of die het broeikaseffect versterken geleidelijk uitgefaseerd. Dit heeft geleid tot een verschuiving in de samenstelling van veel koudemiddelen. Halonen (HCFK's) en met name chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's) vormen een probleem. CFK's vallen in de bovenste lagen van de atmosfeer uit elkaar onder invloed van UV-licht, waarna de vrijgekomen halogeenatomen als katalysator optreden voor de reactie die ozon omzet in zuurstof. Het effect is dat de ozonconcentratie afneemt en daarmee ook de bescherming van het aardoppervlak tegen schadelijke UV-B-straling.

De mate waarin een stof in staat is om de ozonlaag aan te tasten wordt *Ozone Depletion Potential* (ODP) genoemd. Per definitie is de ODP van trichlorofluoromethaan (R-11) voor een periode van 100 jaar gesteld op 1. De ODP van CFK's is van dezelfde orde-grootte en de ODP van stoffen met broom ligt tussen 5 en 15. In het ideale geval zouden koudemiddelen gebruikt worden met een ODP van 0. Koudemiddelen die op dit moment veel gebruikt worden vallen in de groep van HFK's (gehydrogeneerde fluorkoolwaterstoffen) en hebben een ODP tussen 0 en 0,2. Deze lagere ODP is vooral te danken aan de kortere levensduur van HFK's in lagere delen van de atmosfeer, waardoor ze de hogere lagen nauwelijks bereiken. Ook het feit dat er geen katalytische stoffen (chloor, broom) kunnen vrijkomen, draagt bij aan een lage ODP.

Naast een ODP wordt aan koudemiddelen ook een GWP toegekend (*Global Warming Potential*). Deze geeft aan hoe groot het broeikaseffect van een stof is ten opzichte van koolstofdioxide (CO₂). Per definitie is de GWP van CO₂ gelijk aan 1.

In Nederland veelgebruikte koudemiddelen zijn R410a en R134a (beide een HFK), R290 (propan) en R717 (ammoniak) en R407C (een mengsel van HFK's). De keuze voor een bepaald koudemiddel zal invloed hebben op de warmteoverdracht in de verdamper en de condensor. In het geval van kleinere, huishoudelijke apparaten zal de keuze voor een koudemiddel bij de fabrikant liggen. Voor grotere installaties is de keuze van het koudemiddel een onderdeel van de optimalisatie van de gehele cyclus.

Wanneer dit gebeurt, wordt de warmteoverdracht van warmtebron naar het koudemiddel slechter. Uiteindelijk moet de verdamper ontdooid worden om te kunnen blijven functioneren.

Tussenkoeler

De tussenkoeler is een warmtewisselaar die het mogelijk maakt dat de koudemiddelstromen uit de verdamper en de condensor warmte uitwisselen. Het principeschema is getekend in figuur 26. Door het gebruik van een tussenkoeler wordt de warmteoverdracht in de verdamper en de condensor verbeterd, omdat de oververhitting en onderkoeling (die in energie dan ook even groot zijn) in de tussenkoeler plaatsvinden. Hierdoor is het volledige oppervlak van de verdamper of de condensor beschikbaar voor de faseovergang. Dit betekent dat het temperatuurverschil over de warmtewisselaar zo klein mogelijk is. Vloeistof die onverhoopt de verdamper verlaat wordt dan in de tussenkoeler alsnog in damp omgezet. De warmteoverdracht voor oververhitting vindt plaats in de tussenkoeler tussen damp en vloeistof. Hierdoor verloopt de warmteoverdracht beter dan wanneer het in de verdamper zou gebeuren, waar de overdracht tussen twee gasen moet plaatsvinden.

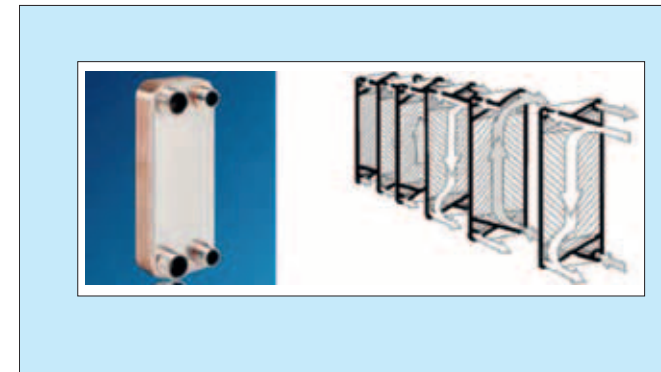
Het toepassen van een tussenkoeler is in principe altijd mogelijk, maar hangt in de praktijk sterk samen met de keuze van het koudemiddel. Afhankelijk van het gebruikte koudemiddel zal de dichtheid van de koudemiddeldamp namelijk meer of minder omlaag gaan bij oververhitting. De koel- of verwarmingscapaciteit van de gasmotorwarmtepomp hangt direct samen met de massastroom van het koudemiddel. Bij een lagere dampdichtheid moet de compressor een groter volume comprimeren om dezelfde massastroom te realiseren. Daardoor is het energetisch niet altijd meer interessant om een tussenkoeler te plaatsen.

5.2.6 Gasmotorwarmtepompen in Nederland

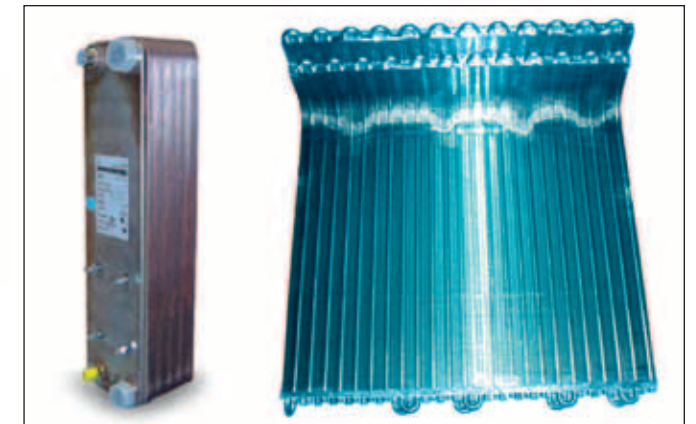
In Nederland zijn verschillende gasmotorwarmtepompen op de markt. Voor de overzichtelijkheid zijn ze ingedeeld in kleinschalig en grootschalig. De grens ligt bij 100 kW.

Kleinschalige gasmotorwarmtepompen

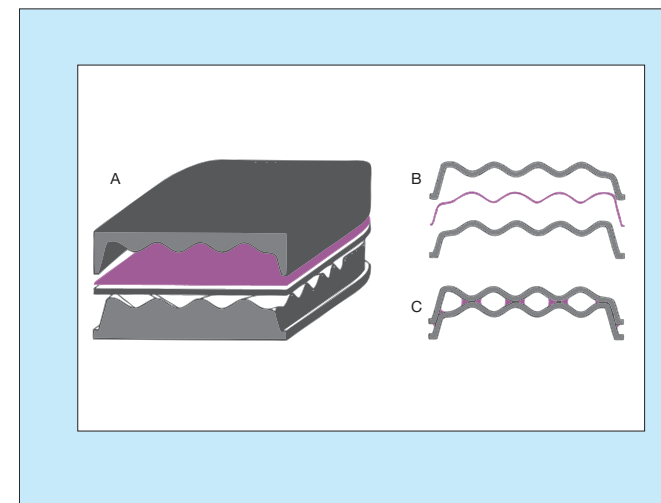
De gasmotorwarmtepompen die in Nederland verkrijgbaar zijn, zijn ontworpen als lucht/luchtwarmtepompen. Omdat de meeste bestaande afgiftesystemen in Nederland watervoerende systemen zijn, zijn enkele Japanse lucht/luchtwarmtepompen gemodificeerd tot lucht/waterwarmtepompen en water/waterwarmtepompen.



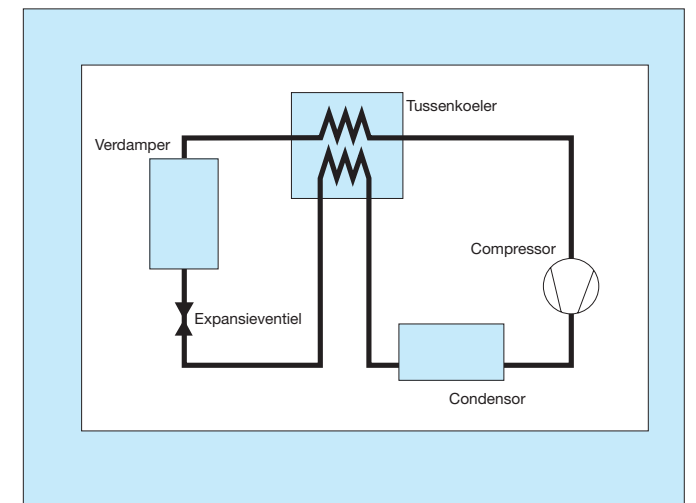
Figuur 23 Platenwarmtewisselaar (links). Rechts zijn de stromingsrichtingen aangegeven. Bron: KGT



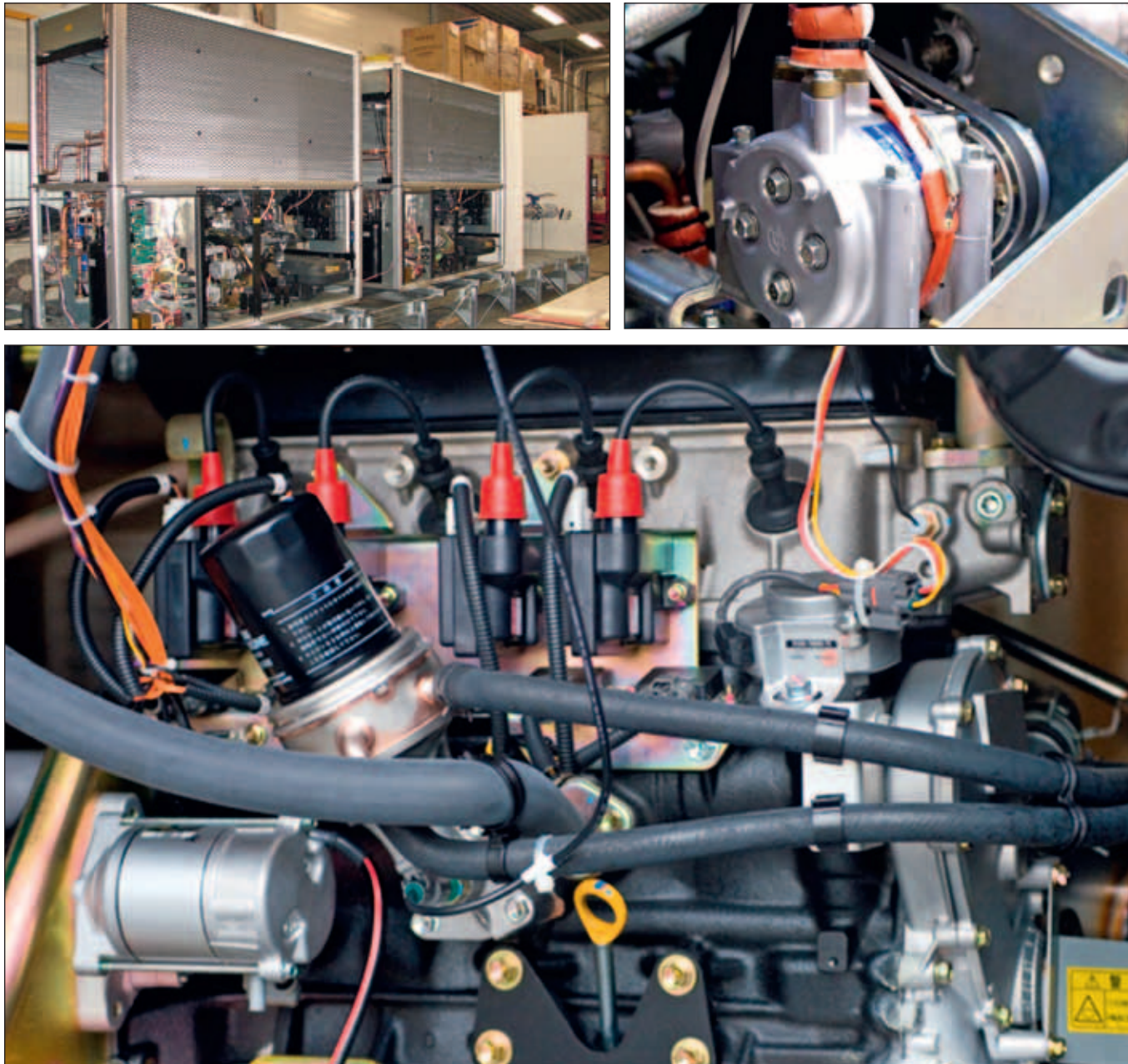
Figuur 25 Verdampers/condensoren voor warmteoverdracht van koudemiddel naar CV-water (links) en een verdampers/condensoren voor warmteoverdracht van koudemiddel naar lucht. Bron: Alfa Laval



Figuur 24 Hardsolderen van RVS-plaatwarmtewisselaars. Tussen twee uit RVS-plaat geperste profielen (grijs) wordt een dunne laag koper (paars) gelegd. Het platenpakket wordt verwarmd tot een temperatuur waarbij het koper gaat vloeien. Bron: Alfa Laval



Figuur 26 Schematische weergave van een warmtepomp met een tussenkoeler. Bron: KGT



Figuur 27 Een open gasmotorwarmtepomp (linksboven), detailfoto van een scroll-compressor (rechtsboven) en een blik op de gasmotor (onder).
Bron: Gasengineering

Temperatuurniveaus

Een gasmotorwarmtepomp kent vier temperatuurniveaus voor verwarmingsdoeleinden. Allereerst de warmte die door het koudemiddel wordt afgegeven. Deze heeft een relatief lage temperatuur van 30 tot 60 °C. De drie overige temperatuurniveaus zijn verbonden met de rookgassen en de motorkoeling. In de meeste gasmotorwarmtepompen wordt alleen de warmte uit motorcoeling gebruikt en dan ook nog alleen als de buitentemperatuur laag is. De warmte in de rookgassen wordt meestal niet gebruikt. De warmte van de motorkoeling heeft een temperatuur van 80 tot 90 °C en kan gebruikt worden voor naverwarming. De temperatuur is ook hoog genoeg voor tapwaterbereiding.

In het laagste temperatuurniveau van de rookgassen bevindt zich relatief veel warmte. Dit temperatuurniveau ligt iets onder de condensatietemperatuur van de waterdamp in de rookgassen. De waterdamp moet immers kunnen condenseren om deze warmte vrij te laten komen. De temperatuur waarbij dit gebeurt, is maximaal zo'n 50 °C. Het andere temperatuurniveau in de rookgassen ligt op 500 tot 600 °C. Dit is de temperatuur van de rookgassen direct bij het verlaten van de gasmotor. Deze warmte kan gebruikt worden voor naverwarming van CV-water of voor tapwaterbereiding.



Figuur 28 Voorbeeld van een gasmotorwarmtepomp met lucht als warmtebron. Bron: ICE

Capaciteit

Alle commercieel verkrijgbare gasmotorwarmtepompen zijn uitgerust met een toerengeregelde gasmotor en met meerdere compressoren. Hierdoor is het mogelijk het vermogen van de warmtepomp te moduleren. Wanneer de benodigde capaciteit groter is dan het vermogen van een enkele warmtepomp, kan een aantal warmtepompen in cascade opgesteld worden. Een regeling zorgt dan voor aansturing van het gehele systeem. Economisch gezien is het interessant om een warmtepomp te dimensioneren op een deel van het te installeren vermogen. Het optimum ligt ergens tussen 25 en 30% van het ketelvermogen. Bij die capaciteit voorziet de warmtepomp in 70 tot 90% van de warmtevraag. De rest is piekvermogen en kan het best worden ingevuld met een conventionele ketel.

Gasmotorwarmtepompen zijn bij uitstek geschikt voor toepassing in de utiliteitsbouw, in zorginstellingen en in andere sectoren zoals onder meer beschreven in hoofdstuk 4. Voor toepassing in individuele woningen zijn ze te groot, maar in een collectief systeem zijn ze wel toepasbaar.

Tapwater

De meeste gasmotorwarmtepompen kunnen warm tapwater produceren. Hiervoor wordt de warmtepomp gekoppeld aan een zogenoemde tapwater module, waarmee het mogelijk is om tot maximaal 30% van het opgenomen (gas)vermogen aan te wenden om tapwater van 70 °C te maken.

Grootschalige gasmotorwarmtepompen

Voor grotere vermogens (>100kW) zijn gasmotorwarmtepompen verkrijgbaar die alleen in capaciteit verschillen van de kleinschalige installaties. Gasmotorwarmtepompen van meer dan 100 kW maken meestal gebruik van schroefcompressoren.

Gelijktijdig koelen en verwarmen

De meeste typen gasmotorwarmtepompen zijn in staat om tegelijk warmte en koude te leveren. Met een driepijps of vierpijps afgiftesysteem kan de warmtepomp in verschillende vertrekken van een gebouw gelijktijdig warmte en koude leveren. Dit is voor veel utiliteitsgebouwen een interessante optie. Gelijktijdig koelen en verwarmen heeft het voordeel dat de warmtevraag en de koudevraag zoveel mogelijk ingevuld worden met de energie die al binnen het gebouw aanwezig is. Zie ook paragraaf 4.7.1. In hoofdstuk 7 zijn enkele praktijkvoorbeelden beschreven.

5.3 De absorptiewarmtepomp

Het werkingsprincipe van sorptiewarmtepompen is besproken in hoofdstuk 3. Deze paragraaf gaat in op de absorptiewarmtepomp. In het Sankeydiagram van figuur 31 (pagina 107) zijn de energiestromen in een gasabsorptiewarmtepomp weergegeven.

Op de Nederlandse markt zijn verschillende gasabsorptiewarmtepompen verkrijgbaar. Voor de duidelijkheid zijn ze ingedeeld in kleinschalig en grootschalig. De grens ligt bij 100 kW.

5.3.1 Kleinschalige absorptiewarmtepompen

Tabel 6 (pagina 113) presenteert de specificaties van enkele absorptiewarmtepompen. Figuur 30 toont voorbeelden van een lucht/waterwarmtepomp en van een water/waterwarmtepomp.

Afgifte

Voor gasgestookte absorptiewarmtepompen zijn de maximale aanvoer- en retourtemperatuur van het CV-water respectievelijk 55 en 45 °C voor de normale uitvoering, en 65 en 55 °C voor de HT-uitvoering (HT = hoge temperatuur). Dit onderscheid in retourtemperaturen is nuttig om te bepalen welke warmtepomp toegepast moet worden. In het geval van nieuwbouw kunnen installatieontwerpers rekening houden met een lage afgiftetemperatuur, bijvoorbeeld door vloerverwarming of andere lagetemperatuursystemen toe te passen. In bestaande bouw is vloerverwarming meestal niet aanwezig en moet de verwarmingsinstallatie gebruikmaken van radiatoren. Hiervoor is de HT-variant van de absorptiewarmtepomp geschikt.

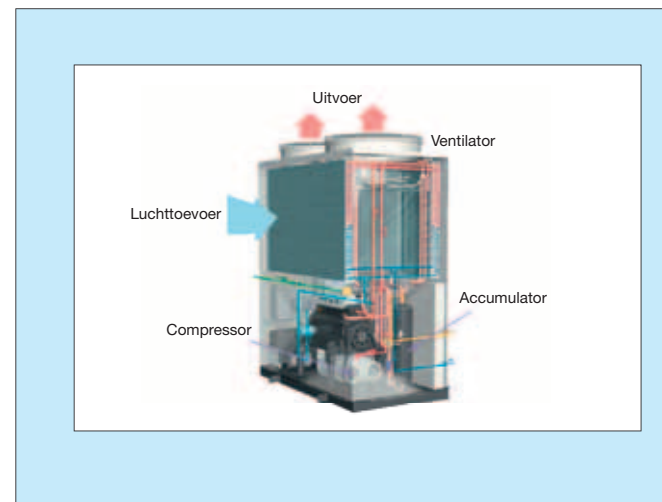
Capaciteit

Gasabsorptiewarmtepompen kunnen moduleren tot 50% van het opgegeven vermogen. Indien nodig kunnen meerdere warmtepompen in cascade opgesteld worden. Eén regeling zorgt dan voor aansturing van het gehele systeem.

Economisch gezien is het interessant om een warmtepomp te dimensioneren op een deel van het te installeren ketelvermogen. Het optimum ligt ergens tussen 25 en 35% van het ketelvermogen. Bij 15% van het ketelvermogen voorziet de warmtepomp in 70% van de warmtevraag. De rest is piekvermogen dat het best kan worden ingevuld met een conventionele ketel.

LT-CV capaciteit nom.	kW	137,2	210,2	285,4
HT-CV capaciteit nom.	kW	61,8	87,9	111,4
GKW capaciteit nom.	kW	105,8	168,2	229,4
Opgenomen vermogen compressor	kW	33,6	45,3	60,5
Gasverbruik NL aardgas	m ³ /h	11,89	16,92	21,41
	kW	110,4	157,1	199,0
PER verwarming	-	1,80	1,90	1,99
PER totaal	-	2,76	2,97	3,15
E-voeding	-	3 fase + nul		
Spanning	V	400		
Max. E-vermogen	kW	2	2,5	2,5
Luchtdebiet	m ³ /h	1000	1500	1500
Condensafvoer < 90 °C			NW 32	
Rookgasafvoer < 90 °C		NW 80	NW 80	NW 100
Geluidsdrukniveau				
Met omkasting	dB(A)	72		
Zonder omkasting	dB(A)	90		

Tabel 5 Gegevens van enkele grootschalige gasmotorwarmtepompen.



Figuur 29 Voorbeeld (opengewerkt) van een lucht/watergasmotorwarmtepomp. Bron: Sanyo

Warmtebron

Lucht/waterwarmtepompen gebruiken meestal buitenlucht en soms ventilatielucht als warmtebron. Water/waterwarmtepompen kunnen oppervlakte- of grondwater gebruiken als warmtebron, maar ook de bodem zelf. In dat geval worden bodemwarmtewisselaars toegepast. Wanneer in bodemwarmtewisselaars alleen water zou worden gebruikt om warmte te onttrekken bestaat het gevaar van bevriezing van het water in de leiding. Daarom wordt in bodemwarmtewisselaars vaak een mengsel van water en antivries (glycol) gebruikt, ook wel *brine* genoemd. Naast lucht, water en bodem kan ook afvalwarmte als warmtebron ingezet worden.

Tapwater

Alle commercieel verkrijgbare absorptiewarmtepompen zijn in staat om warmwater te produceren van maximaal 70 °C. Het tapwater wordt dan indirect in een boiler vat verwarmd.

5.3.2 Grootschalige absorptiewarmtepompen

De tweede categorie absorptiewarmtepompen is die voor grootschalige toepassingen, met vermogens tot enkele megawatts. Grootschalige absorptiewarmtepompen zijn uitgevoerd als enkeltraps of dubbeltraps warmtepomp. Deze termen zijn nader uitgelegd in hoofdstuk 3. In figuur 32 is een voorbeeld gegeven van een grootschalige *single-effect* absorptiewarmtepomp. De COP van *double-effect* absorptiewarmtepompen is doorgaans hoger dan die van *single-effect* warmtepompen, omdat de condensatiewarmte van de eerste trap de tweede generator aandrijft.

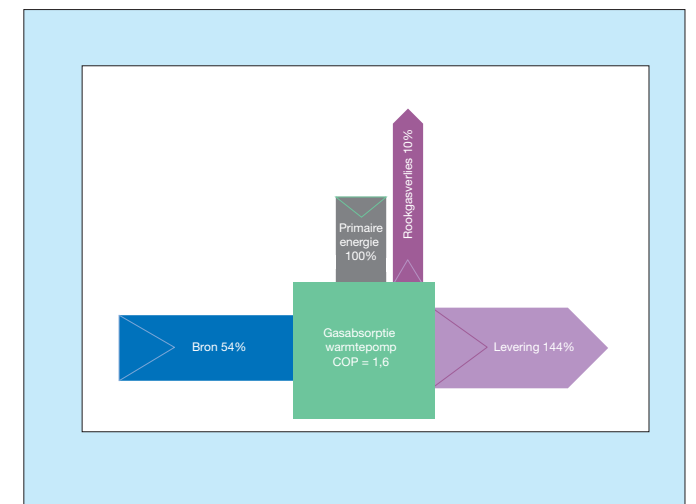
De grootschalige absorptiewarmtepompen zijn wat afgifte, warmtebron en tapwaterbereiding betreft hetzelfde als kleinschalige absorptiewarmtepompen. De capaciteiten zijn groter, maar de percentage tot waar de absorptiewarmtepompen kunnen moduleren zijn vergelijkbaar met die van kleinschalige installaties.

Afgifte

Grootschalige absorptiewarmtepompen worden vaak als koelmachine gebruikt; ze kunnen koude leveren op een temperatuurniveau van zo'n 5 °C.



Figuur 30 Voorbeeld van een lucht/watergasabsorptiewarmtepomp (links) en een water/watergasabsorptiewarmtepomp (rechts). Bron: Robur



Figuur 31 Sankeydiagram van een gasabsorptiewarmtepomp. Bron: BDH/KGT



Figuur 32 Grootchalige enkeltraps absorptiewarmtepomp. Bron: Broad

De absorptiewarmtepomp

Gasabsorptie- en gasadsorptiewarmtepompen lijken op elkaar. In hoofdstuk 3 zijn de karakteristieken van deze concepten al in detail uiteengezet. Het werkingsprincipe is hetzelfde, met als belangrijk verschil dat bij absorptiewarmtepompen het koude-middel een continue cyclus doorloopt, terwijl dat bij adsorptie een batch-proces is.

Op dit moment zijn er geen adsorptiewarmtepompen op de markt. Op het gebied van kleinschalige adsorptiewarmtepompen vinden wel ontwikkelingen plaats.

Capaciteit

De capaciteiten van de meeste warmtepompen zijn modulerbaar tot 10% van het nominale vermogen.

Warmtebron

Grootchalige absorptiewarmtepompen kunnen, evenals kleinschalige installaties, lucht, water en bodem als warmtebron gebruiken.

5.4 Optimalisatie van warmtepompsystemen

Gaswarmtepompen zijn aantrekkelijk omdat ze een hoog rendement bieden. Het rendement van bestaande gasgestookte warmtepompen kan in veel gevallen nog aanmerkelijk worden verbeterd. In deze paragraaf worden deze opties voor verbetering aangegeven voor gasmotorwarmtepompen, absorptiewarmtepompen en adsorptiewarmtepompen. Optimalisatie van de regeling komt in paragraaf 5.5 aan de orde.

5.4.1 Ontwerp gasmotorwarmtepompen

Het werkingsprincipe van de gasmotorwarmtepomp is al besproken in paragraaf 5.2. Hier is ook al gemeld dat de bestaande gasmotorwarmtepompen voor de Nederlandse situatie niet optimaal zijn, omdat in Nederland verwarming belangrijker is dan koeling. Door het bestaande ontwerp uit te breiden met drie extra warmtewisselaars en deze op de juiste plaats in het systeem in te passen, kan het rendement van de installatie aanzienlijk verbeterd worden. Figuur 33 toont de energiestromen in een geoptimaliseerde gasmotorwarmtepomp in een Sankeydiagram.

Een andere manier om het rendement van bestaande gasmotorwarmtepompen te verbeteren is het moduleren van de aanvoertemperatuur. In de standaard situatie wordt het CV-water altijd

opgewarmd naar 55 °C, terwijl het afgegeven vermogen wordt gemoduleerd door de warmtepomp in en uit te schakelen. Door continu een hoge watertemperatuur te maken wordt het rendement lager dan mogelijk is. Wanneer de watertemperatuur wordt gevarieerd afhankelijk van de warmtevraag, neemt het systeemrendement toe. Hiervoor is een aanpassing aan de regeling nodig. Dit is meer systeemoptimalisatie dan warmtepomp-optimalisatie en geldt voor alle warmteopwekkers. Dit is met name van belang bij een kleine temperatuurlift. Het aandeel van de warmtewisselaars in het temperatuurverschil dat overbrugd moet worden, is bij een dalende lift relatief steeds groter.

Bestaande warmtepompen

Om kosten en ruimte te besparen hebben ontwerpers van warmtepompen vaak gekozen voor krap gedimensioneerde verdamers en condensors. Het gebruik van grotere en betere warmtewisselaars leidt vaak tot een belangrijke verbetering van de COP.

Momenteel zijn gaswarmtepompen verkrijgbaar met een COP van 1,3 in koelbedrijf. Op grond van de regel dat de COP voor verwarming gelijk is aan de COP voor koeling plus 1, moet het dus mogelijk zijn om gasgestookte warmtepompen te maken die voor verwarming een COP van 2 of hoger halen.

5.4.2 Ontwerp absorptiewarmtepompen

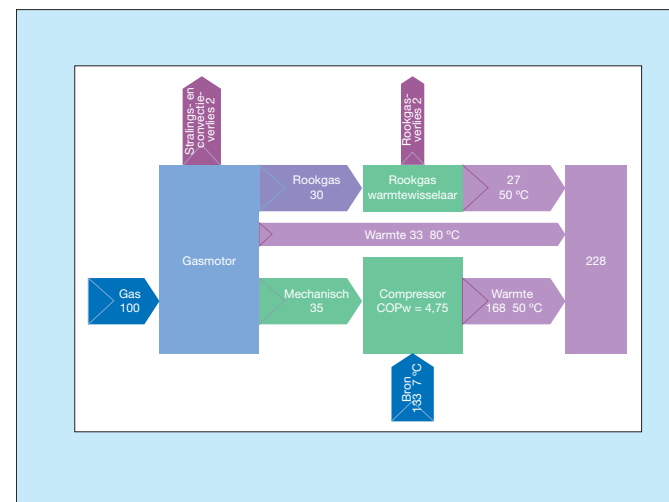
Voor kleine absorptiewarmtepompen komt het systeemontwerp al overeen met het geoptimaliseerde ontwerp in figuur 34. De huidige ontwerpen voldoen hier op hoofdlijnen al aan. Grootchalige absorptiekoelmachines kunnen als warmtepomp gebruikt worden. Optimalisatie is mogelijk door een rookgas-koeler en -condensor (ook wel economiser genoemd) toe te voegen.

5.5 Regeling

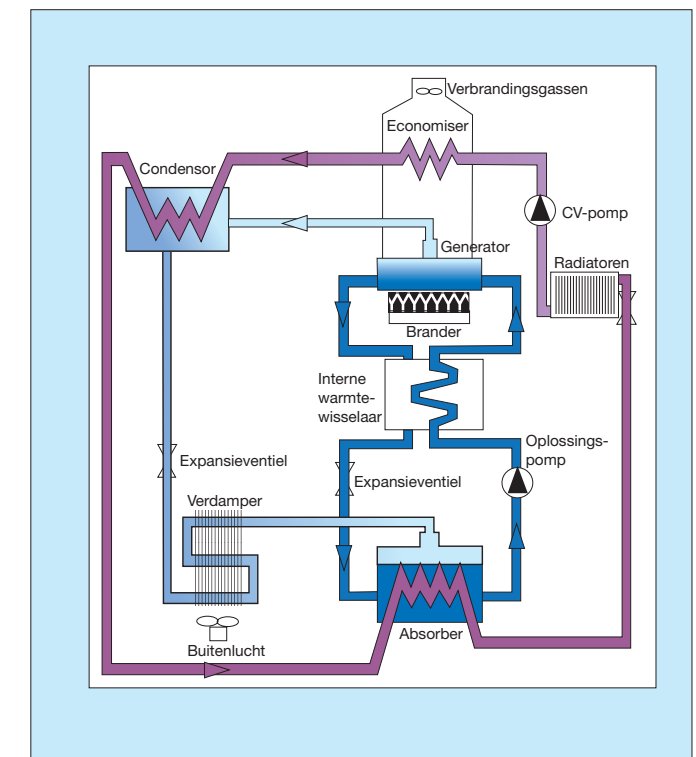
In een warmtepompsysteem worden twee regelkringen onderscheiden: de hoofdregeling en de interne regeling. In dit boek wordt alleen de hoofdregeling uitgebreid behandeld. Deze zorgt voor afstemming van het aanbod van de installatie op de warmte- of koudevraag. De interne regelkring verzorgt de onderlinge afstemming van de verschillende onderdelen van de warmtepomp. Voor de regeling is het expansieventiel, dat het drukverschil tussen de condensor en de verdamper handhaaft, belangrijk.

5.5.1 Hoofdregeling

De hoofdregeling is een capaciteitsregeling. In principe kan de capaciteit van een warmtepomp worden geregeld door de warmtepomp in en uit te schakelen. In de praktijk vindt regeling van de capaciteit ook vaak plaats door regeling van de compressor-capaciteit. Op de volgende pagina worden verschillende soorten regelingen besproken.



Figuur 33 Sankeydiagram voor optimale gasmotorwarmtepomp. Vermelde cijfers zijn eenheden energie. Bron: BDH/KGT



Figuur 34 Geoptimaliseerd ontwerp voor een absorptiewarmtepomp. Bron: BDH/KGT

Zuigercompressoren

Regeling van de capaciteit van zuigercompressoren (bij motorvermogens boven 7,5 kW) gebeurt op één van de volgende manieren:

- **Toerenregeling.** Toerenregeling is mogelijk tot het punt waarop pulsaties van de zuigerbeweging het proces gaan verstoren. De regeling moet rekening houden met het minimale toeren-tal waarbij de fabrikant nog een goede smering garandeert.
- **Kleplichting.** Door lichting van de zuigerklep(pen) tijdens de compressieslag wordt het aangezogen gas gedeeltelijk weer teruggevoerd naar de aanzuigleiding.
- **Persgascirculatie.** Omloopregeling waarbij het debiet in de koudemiddelcyclus wordt geregeld. Het verplaatste compressorvolume blijft gelijk.

Bij kleplichting en toerenregeling is het opgenomen vermogen van de compressor evenredig aan de geleverde capaciteit. Bij persgascirculatie is het opgenomen vermogen altijd constant terwijl de capaciteit varieert. De energie-efficiency is daarom lager dan bij de twee andere methoden.

Schroefcompressoren

De capaciteit van schroefcompressoren wordt op twee manieren geregeld:

- **Regeling compressievolume.** De lengte van het actieve deel van de rotor wordt door middel van een schuif geregeld, waardoor in deellast slechts een deel van de rotor wordt gebruikt voor compressie. Bij minder dan 60% deellast is deze regeling niet efficiënt.
- **Toerenregeling.** Deze regeling is mogelijk door betere fabricage- en smeertechnieken en haalt de hoogste energie-efficiency voor schroefcompressoren.

Wanneer een compressor een groot deel van de tijd in deellast draait, kan het uit oogpunt van efficiency interessant zijn om twee of meer compressoren parallel te installeren. In deellast kunnen dan compressoren geheel worden uitgeschakeld.

5.5.2 Stooklijn

Figuur 35 geeft het verwarmingsvermogen aan dat een gebouw nodig heeft om niet af te koelen, als functie van de buitentemperatuur. Uiteraard is deze grafiek afhankelijk van het type gebouw, de mate van isolatie en het gebruikersprofiel. Een woning moet worden verwarmd als de buitentemperatuur onder

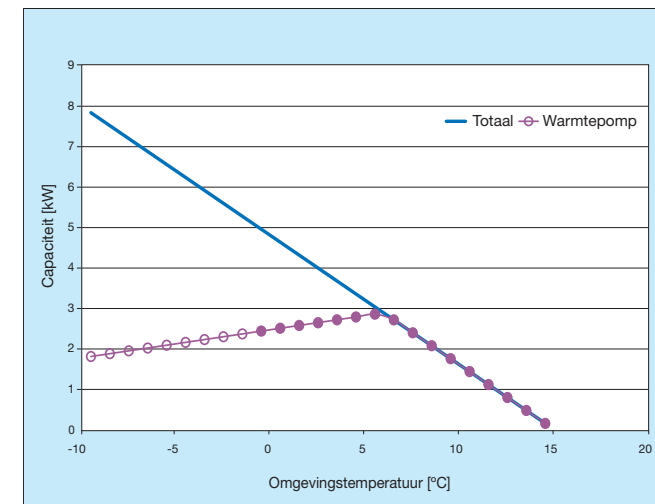
de stookgrens komt. Voor veel gebouwen zal de stookgrens rond de 15 °C liggen. In de figuur is dat ook het geval. Naarmate de buitentemperatuur daalt, neemt het vermogen toe dat nodig is om het gebouw op temperatuur te houden. Een buitentemperatuur van 7 °C komt in Nederland veel voor. In figuur 35 is dit te zien. Hier valt de vermogenslijn van de gaswarmtepomp samen met de vermogenslijn van het gebouw. Tot een buitentemperatuur van 6 of 7 °C kan de warmtepomp de vermogensvraag dus zonder hulp van de ketel afdekken.

Een stooklijn geeft het verband tussen de buitentemperatuur en de aanvoertemperatuur voor de radiatoren die nodig is om het vereiste verwarmingsvermogen te leveren. In figuur 36 is een standaard stooklijn van een ketel weergegeven met de lichtblauwe lijn. Bij een buitentemperatuur van 0 °C is de aanvoertemperatuur naar de radiatoren op ongeveer 50 °C ingesteld. Bij een buitentemperatuur van -10 °C is de aanvoertemperatuur op ongeveer 70 °C ingesteld. Het retourwater (donkerblauwe lijn) is dan ongeveer 50 °C ($\Delta T = 20$ °C). Bij deze standaard stooklijn is verwarmen met een warmtepomp niet meer mogelijk. Dit omdat bij lage buitentemperaturen de gevraagde aanvoertemperaturen hoger liggen dan de maximale temperatuur die de warmtepomp kan produceren.

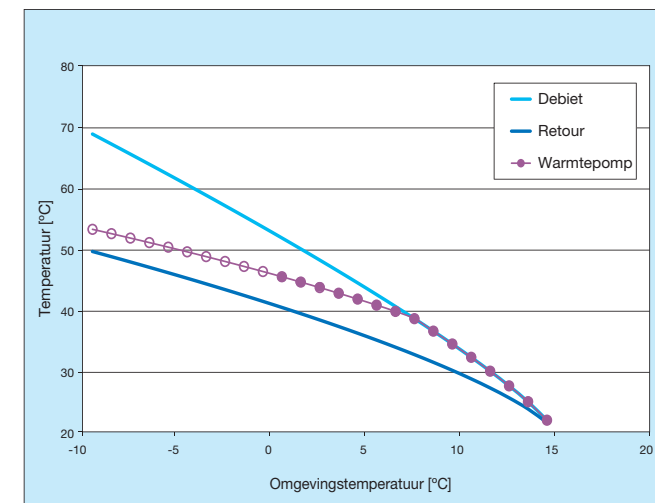
Standaardregeling

Vaak kan de bestaande temperatuurregeling van een gebouw grotendeels gehandhaafd blijven wanneer de gebouwinstallatie wordt uitgebreid met warmtepompen. Wel moet aandacht worden besteed aan de stooklijn. Deze mag niet hoger worden ingesteld dan nodig is. In veel gevallen is toevoeging van een regelaar voor de warmtepompen voldoende, waarbij mogelijk de instellingen door de installateur aangepast moeten worden aan de specifieke situatie. Hetzelfde geldt voor nieuwbouw waar naast de warmtepompen ook ketels worden gebruikt voor naverwarming en bereiding van warm tapwater.

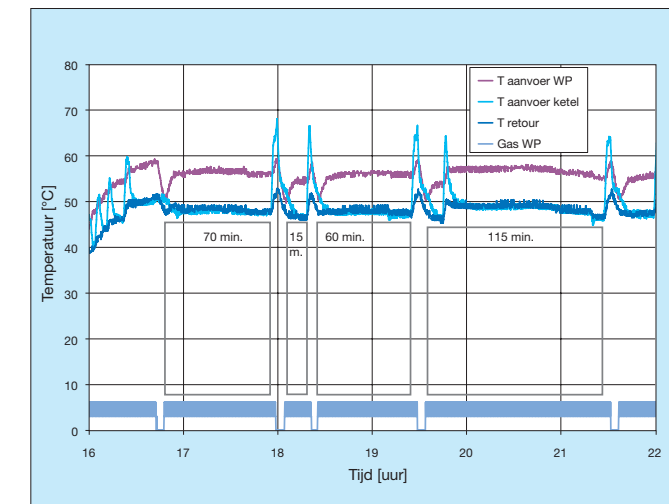
De figuren 35 en 36 gaan uit van een situatie waarbij de warmtevraag over een dag constant is. In werkelijkheid zal de warmtevraag variëren, afhankelijk van onder meer de interne en externe warmtelast. De interne warmtelast is de warmteproductie van alles in het gebouw dat warmer is dan de gewenste ruimtetemperatuur: verlichting, computers, andere apparaten en mensen. De externe warmtelast wordt vooral veroorzaakt door de zoninstraling.



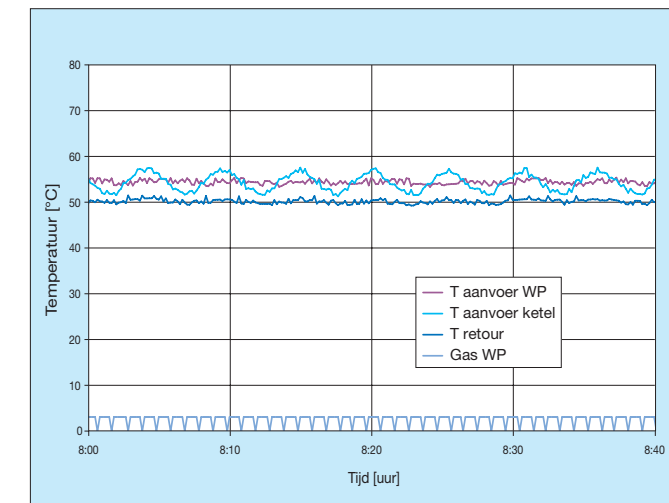
Figuur 35 Verwarmingsvermogen dat nodig is om een gebouw niet te laten afkoelen als functie van de buitentemperatuur.



Figuur 36 Voorbeeld van een stooklijninstelling. De ketel levert hogere temperaturen (lichtblauwe lijn) dan de warmtepomp (bolletjes).



Figuur 37 Temperatuurverlopen bij een normale regeling. Bron: KGT



Figuur 38 Rustiger verloop van in- en uitschakelen van warmtepomp en ketel met een puls-pauzeregeling. Bron: KGT

Als een ketel te lang doorbrandt nadat de gewenste temperatuur is bereikt, kan de retourtemperatuur oplopen waardoor de warmtepomp kan afschakelen. Dit onterecht afschakelen komt veel voor, maar het probleem is relatief eenvoudig op te lossen. Met een puls-pauzeregeling wordt, voordat de ketel wordt aangesproken, bepaald hoeveel het gevraagde vermogen bedraagt. Vervolgens wordt de ketel ingeschakeld in vaste cycli van een aantal minuten. Binnen die cyclustijd brandt de ketel het juiste percentage van de tijd, zodat het

geleverde vermogen overeenkomt met het benodigde (extra) vermogen. Door deze regeling wordt de inzet van de warmtepomp veel gelijkmatiger. In figuur 37 is het temperatuurverloop weergegeven bij een 'normale' regeling waarin ook een warmtepomp is opgenomen. De lichtblauwe lijn onderin de figuur geeft aan wanneer de warmtepomp is ingeschakeld. Goed is te zien dat de warmtepomp wordt uitgeschakeld op het moment dat de aanvoertemperatuur naar de warmtepomp te hoog wordt (60 °C). Dit gebeurt steeds rond het moment dat de ketel afgeschakeld wordt.

In figuur 38 is een voorbeeld te zien van de temperatuurverlopen bij een puls-pauzeregeling. De ketel verwarmt het systeemwater veel gelijkmatiger na en wordt niet steeds uitgeschakeld. Het resultaat is dat het schakelgedrag van de warmtepomp veel rustiger is en dat het verloop van de temperatuurgrafiek geen grote pieken en dalen meer laat zien.

De interne en externe warmtelast wordt nuttig gebruikt als de radiatoren in een ruimte voorzien zijn van thermostaatkranen. Aandachtpunten hierbij zijn dat de centraal geregelde stooklijn dan wel voorzien moet zijn van ruimtevoelers in vertrekken met een gemiddeld klimaat en dat de voelers niet direct beschenen worden door de zon of worden afgeschermd door meubilair.

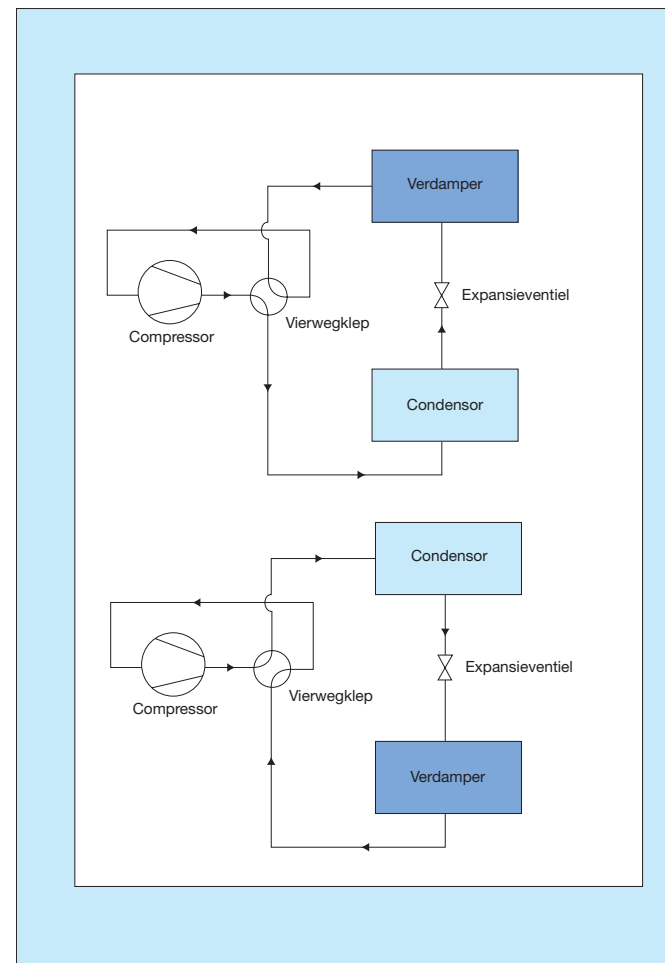
5.5.3 Koelcapaciteit

Wat koeling betreft is voor individuele ruimtes in bijvoorbeeld zorgcentra een koelvermogen van ongeveer 3 kW al voldoende voor 'topkoeling'. Dat wil zeggen koeling 3 tot 5 °C onder de buitentemperatuur. Voor koudeafgifte (eigenlijk is er sprake van warmteopname) kan in veel gevallen het bestaande warmteafgiftesysteem worden gebruikt, al dan niet gemodificeerd.

Radiatoren kunnen worden gebruikt voor koudeafgifte wanneer de radiatorcransen aan de bovenkant van de radiatoren zijn aangesloten. De radiatoren moeten als twee- of drieplaatsmodel zijn uitgevoerd.

Ook wanneer het afgiftesysteem voorzien is van vloerverwarming of convectoren, is het met enige aanpassing geschikt voor koeling.

De reversibele uitvoering van een warmtepomp is in figuur 39 weergegeven. De stromingsrichting van het koudemiddel door



Figuur 39 Gasmotorwarmtepomp en compressor met vierwegklep, waardoor de installatie reversibel is. Bron: KGT

de warmtewisselaars kan worden omgekeerd door de vierwegklep een kwart slag te draaien, zodat de verdamer de condensor wordt en andersom. Het is historisch zo gegroeid dat de unit die binnen hangt altijd de verdamer wordt genoemd, omdat de koelfunctie oorspronkelijk in veel landen buiten Nederland veel belangrijker is dan de verwarmingsfunctie. Dit is verwarrend, want in verwarmingsbedrijf is de warmtewisselaar binnen feitelijk de condensor.

Koelen of verwarmen

Continue afwisselend verwarmen en koelen (pendelen) leidt tot een hoog energieverbruik en moet dus voorkomen worden. De regeling kan zo gekozen worden dat er alleen bij een buitentemperatuur van 25 °C of hoger gekoeld kan worden en alleen bij een buitentemperatuur van 20 °C of lager wordt verwarmd. Het gevolg is dat bij een buitentemperatuur tussen 20 °C en 25 °C het systeem uit staat.

5.6 Het huidige productaanbod

In Nederland is de markt voor gaswarmtepompen voor de utiliteitsbouw nog relatief klein. Een aantal fabrikanten biedt deze apparaten aan. In tabel 6 zijn de specificaties te vinden van gaswarmtepompen, opgedeeld naar werkingsprincipe en toepassingsgebied. ■

Grootheid	Eenheid	Gasmotor en compressor	Absorptie			Adsorptie*
			Utiliteit			
			NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr		
Indirect/1-traps	Direct/2-traps					
Vermogensbereik						
Verwarming	kW	15 tot 15.000	43			5
Koeling	kW	10 tot 10.000	17	15 tot 18.000	300 tot 18.000	-
PER _{verwarmen}	-	1,2 – 2,4	1,3 – 1,8	1,3 – 1,8	2,2	1,2 – 1,4
PER _{koelen}	-	1,0 – 1,2	0,2 – 0,7	0,5 – 0,8	0,7 – 1,3	0,2 – 0,4
Koudemiddel/ stoffenpaar	-	Diversen		H ₂ O/Si H ₂ O/LiBr NH ₃ /H ₂ O		H ₂ O/Zeoliet
Maximale watertemperatuur	°C	65	65	40	40	Niet bekend
		Vanaf	Vanaf	Vanaf	Vanaf	Vanaf
Geluid	dB(A)	48	45			
Gewicht	kg	380	300	500	2.000	140
Afmetingen		Vanaf	Vanaf	Vanaf	Vanaf	Vanaf
Breedte	mm	1.100	850	1.350	2.500	600
Diepte	mm	500	690	790	2.200	595
Hoogte	mm	1.740	1.300	1.450	1.300	1.875
H ₂ O = water; NH ₃ = ammoniak; LiBr = lithiumbromide; Si = silicagel; Zeo = zeoliet. Bij stoffenparen is het koudemiddel altijd als eerste genoemd.						
* Alleen in huishoudelijke uitvoering.						

Tabel 6 Kengetallen voor verschillende typen gaswarmtepompen. Bron: KGT

Hoofdstuk 6

Economische analyse

Na de technische uiteenzetting in hoofdstuk 5 volgen in dit hoofdstuk economische analyses, waarin onder meer de exploitatiekosten, de investeringskosten en de invloed van gas- en elektriciteitsprijzen worden behandeld. Energiemarkten, subsidies, fiscale aspecten en onderhoud komen ook in dit hoofdstuk aan bod.

6.1 Economische analyse

Gaswarmtepompen worden buiten Nederland al vele jaren met succes toegepast, zowel in Europa (met name in Italië en Spanje) als in het Verre Oosten. De eerste warmtepompen stammen uit de tijd dat de noodzaak van CO₂-emissiereductie nog niet werd onderkend. Bij die eerste generaties warmtepompen waren economische motieven de primaire drijfveer. Lagere energiekosten wegen al jaren op tegen de gemiddeld 10 tot 20% hogere investeringskosten ten opzichte van conventionele technieken.

6.1.1 Investeringskosten en -baten

De extra investeringskosten van een gaswarmtepompinstallatie ten opzichte van een elektrische variant hebben vooral betrekking op de gaswarmtepomp zelf. Bij grotere installaties (meer dan 300 kW_{th}) valt een deel van de meerkosten vaak weg tegen de

investeringskosten die anders nodig zouden zijn voor verzwaring van het elektriciteitsnet. Zo'n verzwaring van het net is vaak nodig om een gelijkwaardige elektrische warmtepomp te kunnen installeren.

In utiliteitsgebouwen zijn warmtepompen in geval van nieuwbouw steeds vaker eerste keus. Warmtepompen zullen hier binnen afzienbare tijd de standaardtechnologie zijn voor verwarming en in toenemende mate ook voor koeling.

Hoewel soms anders wordt gedacht, wegen in de utiliteitsbouw de kosten vaak zwaarder dan in de woningbouw. Het is daarom voor een gefundeerde beslissing belangrijk dat het kostenplaatje verder gaat dan alleen de investering, en ook verder dan de eerste huurder of gebruiker. Belangrijker dan de verhuurbaarheid op korte termijn is een afweging op basis van *life cycle costing* (LCC), een methode die alle kosten en baten over de gehele levenscyclus van een gebouw (inclusief installaties en andere voorzieningen) in ogenschouw neemt.

Om installaties met gaswarmtepompen economisch te kunnen beoordelen, moeten we kijken naar het totaal van investeringen, afschrijvingen, subsidies en fiscale faciliteiten gedurende tenminste tien tot vijftien jaar van de technische levensduur. In de LCC moeten alle kosten meegenomen worden die nodig zijn om de vereiste technische functionaliteiten in te vullen. Eventuele alternatieven voor gaswarmtepompen moeten op dezelfde manier worden doorgerekend.

Het calculeren van alternatieven is lastig omdat die alternatieven niet altijd dezelfde mogelijkheden bieden (zoals het gelijktijdig koelen en verwarmen van individuele ruimtes of gelijktijdig verwarmen en ontvochtigen).

De economische analyse van investeringen in duurzame energiesystemen is dynamisch. Aannames en uitgangspunten zijn voortdurend aan verandering onderhevig. Dit geldt ook voor de stimuleringsmaatregelen vanuit de overheid. Daarnaast zijn de energieprijzen zeer veranderlijk, met name omdat de aardgasprijs gekoppeld is aan de prijs van aardolie. De verwachting is overigens dat energieprijzen, over een langere termijn gezien, structureel zullen stijgen. Dit betekent dat een economische analyse die is gebaseerd op de huidige prijsgegevens, over een paar jaar in positieve richting bijgesteld moet worden.

Split incentive

In de utiliteits- en woningbouw is de investeerder lang niet altijd de gebruiker van het pand. Bij het afwegen van de investeringen voor een klimaatinstallatie is het belangrijk dat de investeerder op een of andere manier de meerinvestering terug kan verdienen. Dit wordt het *split incentive* principe genoemd. Wanneer gaswarmtepompen bijvoorbeeld worden toegepast in een collectief systeem in de woningbouw, pleegt de woningcorporatie de investering en geniet de huurder de besparingen. In dat geval moeten de lagere energiekosten voor de huurders geheel of voor een deel in de huurpuntsystematiek uitgedrukt kunnen worden zodat de woningcorporatie haar investering terug kan verdienen.

In de utiliteitsbouw is de situatie vaak complex. De verhuurbaarheid van onroerend goed wordt volgens onderzoek sterk beïnvloed door de ligging van het object, de leeftijd (hoe nieuwer hoe beter) en de uitstraling. Tabel 1 geeft inzicht in de *split incentive* situatie in de utiliteitsbouw.

	Kantoren	Onderwijs	Winkels	Ziekenhuizen	Zorgsector	Totaal
eigendom - alleen	46%	60%	33%	74%	60%	53%
huur - alleen	25%	21%	48%	9%	32%	28%
eigendom - samen	8%	4%	4%	12%	4%	5%
huur - samen	20%	5%	15%	0%	4%	10%
anders	1%	10%	0%	5%	0%	4%

Tabel 1 Verdeling van belangen tussen investeerder en gebruiker in de utiliteitsbouw. Bron: Stratus marktonderzoek (2007)

Uit de laatste kolom van tabel 1 blijkt dat iets meer dan de helft van de gebruikers van utiliteitsgebouwen het gebouw in eigendom heeft. Iets meer dan een kwart van de bedrijven en instellingen huurt een gebouw als enige en tien procent huurt samen met andere bedrijven.

Het is nog maar sinds kort dat de energiekosten een rol gaan spelen in de onderhandelingen tussen huurder en verhuurder. Energieprestatielabels bieden de mogelijkheid om de energieprestaties en de energiekosten van een gebouw te objectiveren. De zakelijke verhuurder kan daarmee investeringen in duurzame energieopties tot uitdrukking brengen in de huurprijs per vierkante meter. Voor eigenaar-gebruikers ligt dit eenvoudiger. Voor hen kan echter de hoogte van de investering een blokkade vormen, ook al ziet het exploitatiemodel er gunstig uit. Het geld voor de duurdere installatie moet wel eerst op tafel komen.

Outsourcing

In de utiliteitssector komt het regelmatig voor dat de gehele energievoorziening door een externe partij gefinancierd en geëxploiteerd wordt. Omdat de verwachting is dat de energieprijzen op termijn blijven stijgen, waardoor energiebesparingen in de toekomst alleen maar waardevoller worden, zijn externe partijen in toenemende mate bereid om financiële constructies aan te bieden voor de inzet van duurzame technologie. Banken, energiebedrijven en grotere installatiebedrijven vormen hiervoor soms een samenwerkingsverband. *Outsourcing* vraagt om kennis op technisch en financieel gebied, zowel bij de opdrachtgever als bij de aanbieder.

6.1.2 Economische haalbaarheid

Bij de keuze van een gaswarmtepompsysteem zal de economische haalbaarheid doorslaggevend zijn. De technische mogelijkheden vormen nauwelijks een belemmering. De veelzijdigheid en brede inzetbaarheid van warmtepomptechnologie kan er zelfs toe leiden dat installaties te mooi en te kostbaar worden ontworpen. Het is belangrijk om van begin af aan de economische haalbaarheid in

het oog te houden. Tabel 2 (pagina 118 en 119) geeft een matrix met product-marktcombinaties (PMC's) en een indicatief overzicht van toepassingen van gaswarmtepompen en hun economische haalbaarheid. Deze matrix kan een hulpmiddel zijn bij een snelle voorselectie van de opties voor een bepaalde situatie.

6.1.3 Onderhoud en beheer

Tot voor kort was de CV-ketel de standaardtechnologie voor verwarming van utiliteitsgebouwen. Het onderhoud bestond uit enkele controles en het schoonmaken van de ketel. Gaswarmtepompen zijn complexe apparaten die een andere benadering vragen bij onderhoud en beheer. De Nederlandse wet- en regelgeving (waaronder de F-gassenverordening) vraagt daarbij ook om aandacht.

Gasabsorptiewarmtepompen

Gasabsorptiewarmtepompen zoals die in Nederland worden aangeboden, bestaan uit een gesloten circuit met een fysisch proces dat door middel van een vloeistofpomp op gang wordt gebracht. De kringloop van de warmtepomp is hermetisch gesloten en volledig onderhoudsvrij. Bij een lucht/waterwarmtepomp moet de verdampers/condensor die buiten staat opgesteld jaarlijks op vervuiling worden gecontroleerd en zonodig gereinigd. Het reinigen kost maximaal één dagdeel arbeidstijd. De hydraulische pomp in de gasabsorptiewarmtepomp is onderhoudsvrij voor een periode van circa 30.000 bedrijfsuren. Hier volstaat jaarlijkse visuele inspectie. De ervaring leert dat na 30.000 uur meestal onderhoud aan de hydraulische pomp moet worden uitgevoerd. De gasbrander is een premix-brander die na visuele inspectie in principe alleen maar schoongemaakt hoeft te worden. De locatie van de warmtepomp (en dan met name de stofbelasting van de locatie) is van grote invloed op de vervuiling van de verdampers en de brander.

Gasmotorwarmtepompen

Gasmotorwarmtepompen worden aangedreven door een specifiek voor stationair bedrijf en lage toerentallen ontwikkelde aardgasmotor met overgedimensioneerde lagering. De motor drijft via een vlakke riem één of meer compressoren aan die zorgen voor het comprimeren van het koudemiddel.

De Nederlandse wet- en regelgeving ten aanzien van koudemiddelen (de F-gassenverordening) eist een periodieke inspectie van systemen waarin deze koudemiddelen worden gebruikt.

Bij deze inspectie hoort ook de visuele inspectie van de buiten opgestelde verdampers/condensoren, inclusief reiniging indien nodig. Deze inspectie beslaat globaal één dagdeel arbeidstijd. Het hermetisch gesloten koudemiddelcircuit is in principe onderhoudsvrij.

Indien er tussen de buitenunit en het watervoerende afgiftesysteem een zogenaamde hydromodule is geplaatst, valt deze ook onder de verplichte inspectie. De compressoren (meestal scrollcompressoren) zijn volledig onderhoudsvrij. Het onderhoud aan de gasmotor beperkt zich in eerste instantie tot de genoemde jaarlijkse visuele inspectie. Eenmaal in de 10.000 draaiuren moeten de motorolie, de bougies en de V-snaar worden vervangen. Ook dit kost ongeveer een dagdeel arbeidstijd voor een standaardinstallatie. Na 30.000 draaiuren is groot onderhoud nodig, waarbij in de periferie van de motor onderdelen preventief worden vervangen. Het draaiende gedeelte van de motor blijft ongewijzigd. Gaswarmtepompen die volgens voorschrift van de fabrikant worden onderhouden, hebben een technische levensduur van minimaal vijftien jaar.

6.1.4 De energieprijzen

De kosten voor energie bestaan uit de daadwerkelijke levering, de kosten voor transport en de belastingen. Als we uitgaan van de tarieven zonder regulerende energiebelasting (REB), dan is energie in Nederland relatief goedkoop. Mèt belastingen zijn de tarieven juist relatief hoog.

De ontwikkeling van de olieprijs, waaraan de prijs van aardgas met enige vertraging is gekoppeld, heeft de energiekosten in Europa de afgelopen jaren flink opgestuwd. Omdat in Nederland een groot deel van de elektriciteit met aardgas wordt opgewekt, werkt die hogere gasprijs door in de elektriciteitsprijs.

Liberalisering van de energiemarkt heeft geleid tot een formele scheiding tussen levering en transport. Voor afnemers in de utiliteitssector geldt dat de transportkosten onafhankelijk zijn van de gekozen energieleverancier. Deze transporttarieven worden bepaald door de Energiekamer (voorheen DTe). De kosten van levering van energie zijn vrij onderhandelbaar tussen energieleverancier en afnemer. De hoogte van de aardgasprijs wordt in Nederland vastgesteld door het Ministerie van Financiën. Dit gebeurt steeds voor een periode van zes maanden. Afnemers in de utiliteitssector met een jaargebruik tot 180.000 m³ aardgas

worden kleinverbruikers genoemd. Binnen deze categorie bieden vele verschillende aanbieders uiteenlopende contractvormen en tariefstructuren aan, afhankelijk van gebruik, afnamepatroon en looptijd van het contract. De voorbeeldberekeningen in dit boek van *total cost of ownership* (TCO) worden sterk beïnvloed door de contractvormen voor de energievoorziening.

De elektriciteits- en gasprijzen spelen een belangrijke rol in de totale kostenstructuur. In het verleden was het simpel om energie te besparen. Een oude CV-ketel werd vervangen door een nieuwe die een aantal procentpunten zuiniger was. De jaarlijkse besparing kon vooraf goed worden ingeschat. Bij de beslissing om al dan niet een warmtepomp te installeren is doorgaans wat meer rekenwerk nodig. Bij de keuze voor een warmtepompsysteem, zowel in de nieuwbouw als in de bestaande utiliteitsbouw, zijn drie aspecten van belang voor de uiteinde-lijke hoogte van de energiekosten:

- De dimensionering van de warmtepomp.
- Het temperatuurniveau van het afgiftesysteem.
- De keuze van de warmtebron (bodem, water of lucht).

De juiste dimensionering zorgt ervoor dat de warmtepomp zoveel mogelijk in zijn optimale bereik draait. Starten en stoppen is voor de efficiency van een gaswarmtepomp nadelig. Een goede dimensionering beperkt het aantal starts en stops tot het minimum.

De afgiftetemperaturen hebben bij een gaswarmtepomp direct invloed op het rendement (PER) en daarmee op het energiegebruik. Als vuistregel geldt voor ieder type warmtepomp (gasgestookt of elektrisch, ongeacht het type bron) het volgende: hoe kleiner het temperatuurverschil tussen bron en afgiftesysteem, des te hoger het rendement. Aanvoertemperaturen boven de 55°C moeten worden vermeden.

In de bestaande bouw vragen deze lagere temperatuurniveaus om na-isolatie van het gebouw, of om convectoren met een geforceerde luchtstroom. Na-isolatie is ingrijpend, maar eenmaal uitgevoerd zijn de voordelen groot en blijvend:

- Reductie van de maximale warmtevraag.
- Hogere jaarprestatie van de gaswarmtepomp.
- Hogere dekkingsgraad van de gaswarmtepomp wanneer die wordt toegepast met één of meer CV-ketels voor de pieklast.
- Geïnstalleerd vermogen van de gaswarmtepomp kan lager worden gekozen.

6.1.5 Financiële en fiscale regelingen

Nederland kent een aantal regelingen die als doel hebben nieuwe technologie voor verduurzaming van de energievoorziening te stimuleren. Bij het bepalen van de terugverdientijd van een duurzame energieoptie moeten deze regelingen zeker worden meegerekend. Hun invloed op het totale kostenplaatje kan aanzienlijk zijn. De belangrijkste regelingen worden hieronder behandeld.

Energie-investeringsaftrek (EIA)

De overheid heeft in lijn met de doelstellingen van de Europese Unie beleid geformuleerd voor duurzame energie, energiebesparing en de reductie van CO₂-emissies. De Energie-investeringsaftrek (EIA) ondersteunt de aanschaf van bedrijfsmiddelen die leiden tot energiebesparing of die duurzame energie opwekken. Deze duurzame bedrijfsmiddelen zijn vaak iets duurder dan conventionele technologieën. De EIA is een fiscaal instrument.

De regeling houdt in dat van de duurzame investering 44% afgetrokken mag worden van de fiscale winst van de onderneming. Het geschatte netto voordeel voor ondernemingen is circa 11%, uitgaande van de gemiddelde tarieven voor inkomsten- en vennootschapsbelasting. Bij gasgestookte warmtepompen met een GUE (*gas utilization efficiency*) van 1,4 of groter is het maximale investeringsbedrag dat voor EIA in aanmerking komt € 200,- /kW_{th}. De EIA bestaat al langer en zal naar verwachting ook in de komende jaren een rol spelen bij het verduurzamen van de energiehuishouding. De regeling wordt uitgevoerd door Agentschap NL (voorheen SenterNovem) aan de hand van een jaarlijks geactualiseerde lijst met goedgekeurde technieken en toepassingen.

Milieu-investeringsaftrek (MIA)

Het doel van de Milieu Investerings Aftrek (MIA) is het stimuleren van investeringen in milieuvriendelijke bedrijfsmiddelen. Ondernemingen die hierin investeren krijgen daarvoor extra belastingaftrek. Tot 40% van het geïnvesteerde bedrag mag worden afgetrokken van de fiscale winst. Het daadwerkelijk toegekende percentage van aftrek is afhankelijk van de milieu-effecten en van de gangbaarheid van het bedrijfsmiddel. Dit is aangegeven in de zogeheten Milieulijst. Uitvoering en afhandeling van de MIA is in handen van de Belastingdienst en Agentschap NL.

Willekeurige Afschrijvingen Milieu-investeringen (Vamil)

De Willekeurige Afschrijvingen Milieu Investeringen, kortweg de Vamil-regeling genoemd, biedt ondernemingen een liquiditeit- en rentevoordeel doordat zij een bedrijfsmiddel willekeurig (volledig naar eigen inzicht) kunnen afschrijven. Of een investering in aanmerking komt voor de Vamil-regeling wordt aangegeven op de Milieulijst. De uitvoering en afhandeling van de regeling is in handen van de Belastingdienst en Agentschap NL.

NB: de milieu-investeringsregelingen MIA en Vamil worden in de praktijk vaak gecombineerd. Beide regelingen maken gebruik van de Milieulijst, waarop staat welke bedrijfsmiddelen in aanmerking komen.

6.2 Total cost of ownership

Een gaswarmtepomp vergt in de regel een hogere investering dan een standaard gasketel. Daar staat tegenover dat de brandstofkosten beduidend lager zijn, omdat de warmtepomp voor een deel gebruikmaakt van hernieuwbare energie. Er bestaan verschillende methoden om het kosteneffect inzichtelijk te maken en de investeringen te beoordelen. Deze paragraaf behandelt de grootheden die een rol spelen in de economische afweging om wel of niet te investeren in een warmtepomp. De nadruk ligt daarbij op installaties tot enkele honderden kilowatt. Binnen deze vermogensrange liggen de meeste toepassingen in de utiliteitsbouw en in de gestapelde collectieve woningbouw.

Bij het beoordelen van een mogelijke investering spelen niet alleen de investerings- en inpassingskosten een rol. Ook de exploitatiekosten gedurende de gebruiksperiode (onder meer de kosten voor onderhoud en energie) moeten een plaats hebben in de afweging. Het gaat dus om de *total cost of ownership*, afgekort als TCO.

Onder de TCO van een warmtepompinstallatie vallen de volgende kostensoorten:

- Investeringskosten.
- Exploitatiekosten.
- Onderhoudskosten.
- Energiekosten.
- Einde-project kosten.

Aangepast voor toepassing bij gaswarmtepompen kunnen deze kosten als volgt in formulevorm worden samengevat:

$$TCO = I + CW * \sum_{i=1}^n (E_i + O_i - R^n)$$

- I De totale investeringskosten.
- CW Contante waarde (zie hieronder).
- E_i De energiekosten in jaar i.
- O_i De onderhoudskosten in jaar i.
- Rⁿ De restwaarde in jaar n.

De contante waarde van een project ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$CW = \frac{SOM\ CF}{(1+DV)^P} [-]$$

- SOM CF De som van de *cashflows* over de looptijd.
- DV De disconteringsvoet (of rendementseis).
- P De periode in jaren.

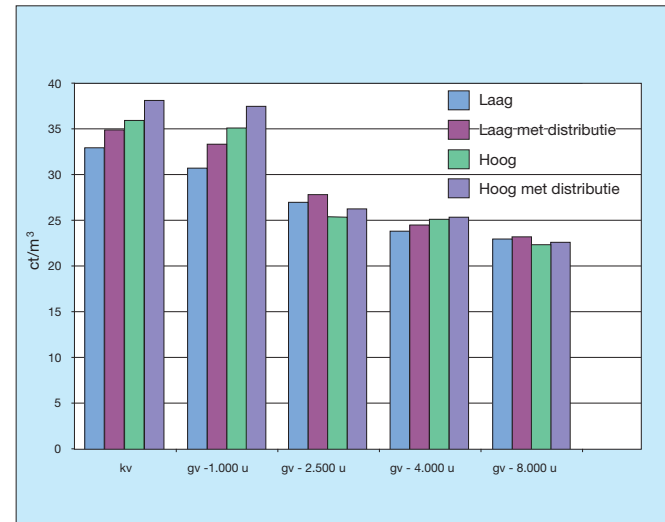
Met behulp van de contante waarde methodiek wordt de waarde van de toekomstige cashflows bepaald bij het begin van het project. Daarbij wordt uitgegaan van de rendementseis die de investeerder stelt, de zogenaamde disconteringsvoet. De verschillende kosten die in dit verband relevant zijn, worden hierna stuk voor stuk behandeld.

Investering en onderhoud

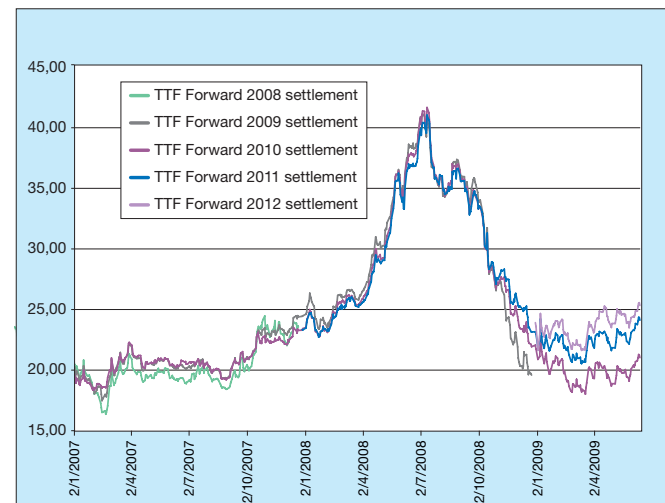
De investeringskosten voor een volledig gaswarmtepompsysteem inclusief inpassing zijn sterk afhankelijk van de toegepaste techniek (lucht/lucht, lucht/water of water/water) en van de vraag of er bijzondere voorzieningen getroffen moeten worden. Ruwweg liggen de investeringskosten in de orde grootte van honderden tot duizenden euro's per kilowatt thermisch.

Investeringsubsidies

Een investeringssubsidie is een mogelijkheid om de initiële kosten te reduceren. Op dit moment zijn er twee nationale investeringssubsidies voor gasmotorwarmtepompen. Voor toepassing in bestaande gestapelde woningbouw is de Duurzame Warmtesubsidie van Agentschap NL beschikbaar. Voor ondernemers met een winstgevend bedrijf zijn er fiscale regelingen voor energie-investeringen (EIA) en voor milieu-investeringen (MIA/Vamil) die de kosten reduceren. Deze regelingen zijn behandeld in de vorige paragraaf.



Figuur 1 Kosten van aardgas inclusief transport en distributie, exclusief belastingen, voor verschillende verbruikerscategorieën bij een commodityprijs van € 0,30/m³ (voorjaar 2009). (kv = kleinverbruik, gv = grootverbruik). Bron: Cogen Projects



Figuur 2 TTF-gasprijzen (x € 0,01 per m³) voor de toekomstige leveringen in de periode 2007 - 2009. Bron: www.endex.nl

Onderhoudskosten

Onderhoud vormt een belangrijk kostenaspect gedurende de levensduur van een installatie. Als indicatie voor de jaarlijkse onderhoudskosten voor gaswarmtepompen geldt een bedrag van 1 tot 5% van de nieuwwaarde (exclusief subsidies) per onderhoudsperiode. Onder een onderhoudsperiode verstaat men in de regel een periode van één of twee jaar.

Energiekosten

De totale energiekosten bestaan uit de kosten voor gas en elektriciteit. In vergelijking met een HR-ketel zal het gasgebruik van een warmtepomp aanmerkelijk lager zijn. Het elektriciteitsgebruik is iets hoger dan van de referentieketel. Per saldo zullen de energiekosten voor een gaswarmtepomp aanzienlijk lager zijn dan voor een HR-ketel.

In de vermogensrange die interessant is voor de utiliteitsbouw (installaties tot enkele honderden kilowatts) vallen zowel kleinverbruikers als grootverbruikers van gas en elektriciteit. De grens tussen groot- en kleinverbruik ligt bij gas anders dan bij elektriciteit. Een gasafnemer is een kleinverbruiker bij een aansluiting met een capaciteit van ten hoogste 40 m³/uur. Grootverbruikers zijn er in twee soorten: tot 170.000 m³/jr is een bedrijf een profielgrootverbruiker, daarboven is sprake van een telemetrie-grootverbruiker.

Bij elektriciteit is de verdeling eenvoudiger: bij een aansluiting tot en met 3 x 80 Ampère beschouwt het energiebedrijf een klant als kleinverbruiker. Daarboven is sprake van een grootverbruiker.

6.2.1 Kosten voor aardgas

De kosten voor gas bestaan uit een deel *commodity* (dit is de eigenlijke levering), een deel diensten (waarin het landelijk transport is opgenomen), een deel distributie en de energiebelasting. De verhouding tussen deze posten is afhankelijk van de omvang van het verbruik en van het afnamepatroon. In figuur 1 zijn de kosten voor een aantal varianten weergegeven. In de figuur wordt onderscheid gemaakt tussen aansluitingen op hoge of lage druk en tussen prijsniveaus inclusief en exclusief distributiekosten.

Commodity-deel

Voor het commodity-deel van de gasprijs zijn er twee mogelijkheden: een prijs gerelateerd aan de prijs voor olie of een vaste

prijs. In het eerste geval wordt de prijs per kwartaal (grootverbruik) of per halfjaar (kleinverbruik) vastgesteld aan de hand van de prijs voor aardolieproducten in de afgelopen periode. Voor kleinverbruikers geldt als referentie de gemiddelde prijs voor huisbrandolie over de periode van acht maanden tot twee maanden voorafgaand aan het betreffende halfjaar. Voor grootverbruikers is het ijkpunt de gemiddelde prijs voor huisbrandolie en stookolie in de zes maanden direct voorafgaand aan het betreffende kwartaal. Gas kan ook worden ingekocht op basis van een vaste prijs. Een goede indicatie is te vinden op de *Title Transfer Facility* markt (TTF). Deze markt wordt onder meer genoteerd door Endex. Op TTF worden leveringen voor de komende maanden, kwartalen en jaren verhandeld. In figuur 2 zijn de TTF-prijzen over de periode januari 2007 tot en met mei 2009 weergegeven.

De TTF-gasprijzen zijn de prijzen waarop grote partijen in de markt handelen. Een leverancier zal deze prijzen naar zijn afnemer verhogen met een opslag waarvan de hoogte afhankelijk is van het afnamepatroon van de afnemer. Ruwweg kan gerekend worden met de TTF-prijs met daarbij een opslag van € 0,02 per m³.

Transport en flexibiliteit

Ook gastransport kent een tariefstructuur voor grootverbruikers en kleinverbruikers. Voor (telemetrie)grootverbruikers zijn de posten van transport en de flexibiliteitskosten weergegeven in tabel 3.

De tarieven zijn afhankelijk van de regio en de locatie van de afnemer en van het afnamepatroon (de gecontracteerde capaciteit en het jaarvolume). De basislast-capaciteit is het jaarverbruik gedeeld door 8.760 uren. Additionele capaciteit is de gecontracteerde capaciteit verminderd met de basislast-capaciteit.

Voor kleinverbruikers en profielgrootverbruikers wordt het transport- en flexibiliteitsdeel verrekend in een toeslag per afgenomen kubieke meter gas. De hoogte van de toeslag is afhankelijk van de regio waar de afnemer zich bevindt en wordt daarom ook wel regiotoeslag genoemd. De toeslag ligt grofweg tussen € 0,10 en € 0,12 per m³.

Distributie

De kosten voor het lokale distributienet (8 bar en lager) worden apart van de transportkosten berekend. Dit zijn de distributiekosten. De tarieven zijn afhankelijk van de capaciteit van de

aansluiting. Voor aansluitingen tot en met 40 m³/uur zijn de kleinverbruikerstarieven van toepassing. Daarboven gelden de grootverbruikerstarieven.

Tabel 4 geeft de componenten weer waaruit de distributiekosten voor kleinverbruikers en profielgrootverbruikers bestaan.

Voor telemetrie-grootverbruikers (tabel 5) gelden vrijwel dezelfde kostenposten, met als verschil dat het capaciteitsdeel afhankelijk is van de gecontracteerde capaciteit en niet van de capaciteit van de geïnstalleerde meter.

6.2.2 Kosten voor elektriciteit

Hoewel de kosten voor elektriciteit maar een klein deel uitmaken van de totale exploitatiekosten van een gaswarmtepomp, worden ze voor de volledigheid wel behandeld. De kosten voor elektriciteit bestaan uit een deel *commodity*, een deel netwerkposten en de energiebelasting. De verhouding tussen deze posten

Post	Hoogte afhankelijk van	Kosten
Flexibiliteit Entry-tarief	Additionele capaciteit	Circa €100,-/m ³ /u
Basislastcapaciteit	Basislastcapaciteit	€14,15/m ³ /u
Entry-tarief additionele capaciteit	Additionele capaciteit	€18,56/m ³ /u
Exit-tarief	Gecontracteerde capaciteit	€3,- tot €40,-/m ³ /u
Connection-tarief	Gecontracteerde capaciteit	€0,50 tot €50,-/m ³ /u

Tabel 3 Transport- en flexibiliteitstarieven voor telemetrie-grootverbruikers van aardgas (GasTerra-systeem). Bron: Cogen Projects

Post	Hoogte afhankelijk van
Vastrecht transport	Vast bedrag
Periodieke aansluitvergoeding	Capaciteit van de aansluiting
Capaciteitsdeel	Capaciteit van de aansluiting
Meetdienst	Capaciteit van de aansluiting

Tabel 4 Distributiekosten voor kleinverbruikers en profielgrootverbruikers van aardgas. De te onderscheiden posten zijn bij profielgrootverbruikers en kleinverbruikers gelijk; de tarieven verschillen wel. Bron: Cogen Projects

Post	Hoogte afhankelijk van
Vastrecht transport	Constant
Periodieke aansluitvergoeding	Capaciteit van de aansluiting
Capaciteitsdeel	Gecontracteerde capaciteit (HD/LD)
Meetdienst	Capaciteit van de aansluiting

Tabel 5 Distributiekosten voor telemetrie-grootverbruikers van aardgas. Bron: Cogen Projects

is afhankelijk van de karakteristieken van de afname. Figuur 3 laat de opbouw van de kosten zien voor een aantal varianten. Te zien is dat alle posten in absolute zin afnemen als het verbruik toeneemt. Het tarief voor levering wordt lager als gevolg van het grotere aandeel daluren, het netwerktarief wordt lager door de hogere bedrijfstijd en de energiebelasting wordt lager als gevolg van het grotere volume.

Commodity

Er zijn verschillende markten waarop elektriciteit verhandeld wordt, elk met zijn eigen karakteristieken. Een van de belangrijkste markten is Endex, waar de prijzen voor levering in toekomstige maanden, kwartalen en jaren wordt bepaald (zie figuur 4). Leveranciers handelen op deze groothandelsmarkt en berekenen dan voor de eindafnemer een opslag waarin onder meer de marge van de leverancier zit.

Post	Hoogte afhankelijk van
Vastrecht transport	Constant
Periodieke aansluitvergoeding	Capaciteit van de aansluiting
Capaciteitsdeel	Capaciteit van de aansluiting
Meetdienst	Capaciteit van de meter

Tabel 6 Distributiekosten voor kleinverbruikers van elektriciteit.

Post	Hoogte afhankelijk van
Vastrecht transport	Spanningsniveau
Periodieke aansluitvergoeding	Capaciteit van de aansluiting
Vermogen gecontracteerd	Gecontracteerd vermogen
Maandmaximum	Maximum aantal kW per maand
Afname normaal	Afgenomen aantal kWh
Afname laag	Afgenomen aantal kWh

Tabel 7 Distributiekosten voor grootverbruikers van elektriciteit.

Gas		Elektriciteit	
Staffel (m³)	Tarief (x € 0,01/m³)	Staffel (kWh)	Tarief (x € 0,01/kWh)
0 – 5000	15,80	0 – 10.000	10,85
5.001 – 170.000	13,85	10.001 – 50.000	3,98
170.001 – 1.000.000	3,84	50.001 – 10.000.000	1,06
1.000.001 – 10.000.000	1,22	10.000.001 →	0,05
10.000.001 →	0,80		

Tabel 8 Staffels van de energiebelasting (2009).
Bron voor tabel 6, 7 en 8: Cogen Projects

Netwerk

Ook bij de levering van elektriciteit maakt het energiebedrijf onderscheid tussen groot- en kleinverbruikers. Dit geldt met name voor het doorberekenen van de netwerkkosten. Kleinverbruikers hebben aansluitingen met een capaciteit tot en met 3 x 80 Ampère. Bij een netspanning van 230 V betekent dit een maximaal aan te sluiten vermogen van circa 55 kilowatt.

De posten die voor kleinverbruikers worden onderscheiden, zijn te vinden in tabel 6. Grootverbruikers hebben aansluitingen op verschillende spanningsniveaus met specifieke, gecontracteerde vermogens. Voor grootverbruikers zijn de posten te onderscheiden zoals die vermeld staan in tabel 7.

Systeemdiensten

Bij zowel klein- als grootverbruikers brengen energiebedrijven voor elke verbruikte kilowattuur een bedrag in rekening voor systeemdiensten.

6.2.3 Belastingen

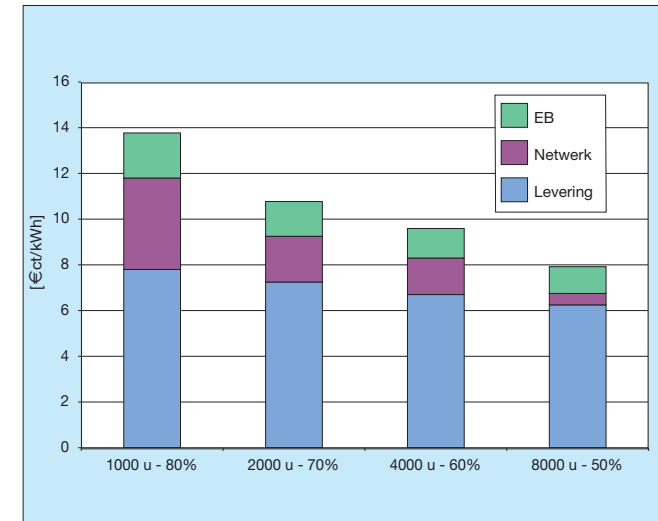
Over aardgas en elektriciteit worden energiebelasting en BTW geheven. De energiebelasting is opgebouwd uit een aantal staffels. In tabel 8 zijn de staffels voor aardgas en elektriciteit en de bijbehorende bedragen weergegeven (2009).

De energiebelasting wordt in rekening gebracht per aansluiting. Voor iedere elektriciteitsaansluiting wordt het totaal in rekening gebrachte bedrag verminderd met de heffingskorting van € 318,62 (2009).

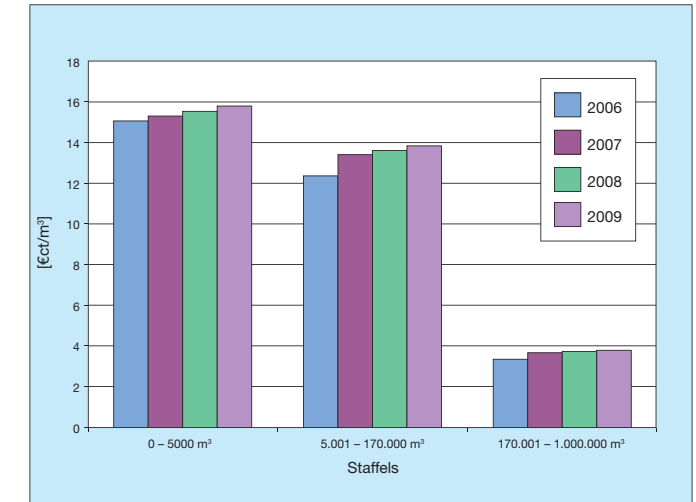
In figuur 5 is de toename van de energiebelasting op aardgas tussen 2006 en 2009 weergegeven. Duidelijk is het grote verschil tussen de staffels. In figuur 6 is het verloop van de energiebelasting op elektriciteit tussen 2006 en 2009 weergegeven. In de eerste staffel is een duidelijke trendbreuk zichtbaar. Deze heeft te maken met een wijziging in de manier waarop de netwerkkosten worden doorberekend. Deze doorberekening is sinds 2009 volledig capaciteitsafhankelijk. Om dit te compenseren is in de energiebelasting een hoger variabel tarief ingevoerd in combinatie met een eveneens veel hogere heffingskorting.

6.2.4 Exploitatieberekening

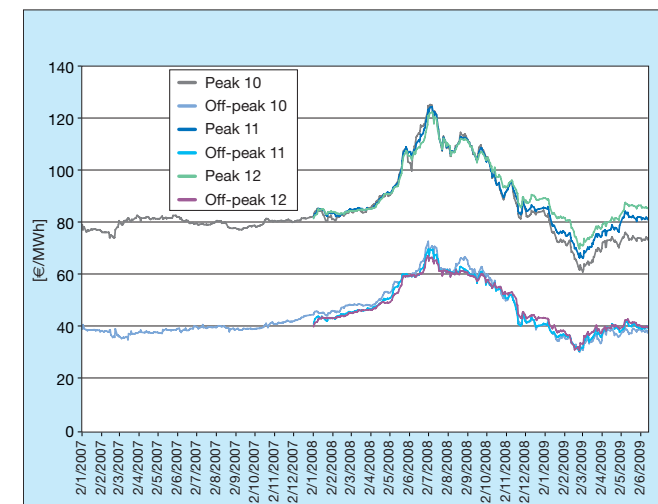
Om de *total cost of ownership* inzichtelijk te maken, bevat deze paragraaf een voorbeeld-exploitatieberekening van een warmte-



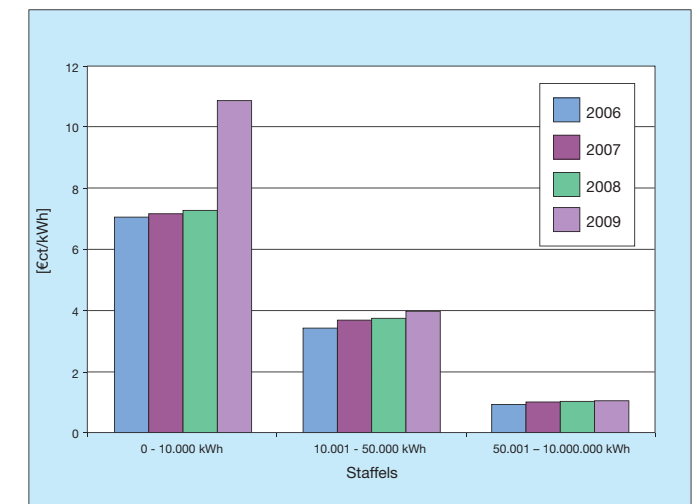
Figuur 3 Kosten voor elektriciteit bij oplopend verbruik (Weergegeven zijn de kosten van levering, netwerk en energiebelasting, indicatief op basis van forwards voor 2010 van begin april 2009, vermogen 200 kW). Bron: Cogen Projects



Figuur 5 Verloop van de energiebelasting op aardgas in de periode 2006-2009. Bron: Cogen Projects



Figuur 4 Endex-prijzen voor elektriciteit 2007-2009. Bron: www.endex.nl



Figuur 6 Verloop van de energiebelasting op elektriciteit in de periode 2006-2009. Bron: Cogen Projects

pompinstallatie. De energie-gegevens staan in tabel 9. Het aandeel van de warmtevraag dat door de warmtepomp ingevuld wordt, is bepaald aan de hand van de NEN 2916.

Om de *cashflow* over de jaren te kunnen berekenen, doen we een aantal economische aannames. De belangrijkste kostenpost is die voor het gasverbruik. Deze post wordt hieronder nader toegelicht.

De totale kosten over de gehele levensduur staan uitgewerkt in de tabellen 9, 10, 11 en 12. Daarbij is uitgegaan van een organi-

Warmtevraag	584.646 kWh
Opgesteld ketelvermogen	400 kW
Rendement ketel	95%
Vollast draaiuren ketel	1.460
Rendement gaswarmtepomp	155%
Deel van het nominale vermogen ingevuld door WP (beta)	0,4
Aandeel van de warmtevraag ingevuld door WP	0,93
Vollast draaiuren WP	3.500

Tabel 9 Energetische aannames van de voorbeeldsituatie.

Bron: Cogen Projects

Commodity prijs aardgas (excl. BTW)	€ 0,23 /m ³
Regio toeslag (excl. BTW)	€ 0,11 /m ³
Incrementele kostprijs elektriciteit	€ 0,08 /kWh
Energiebelasting op elektriciteit (staffel 2)	€ 0,0398 /kWh
Looptijd van het project	10 jaar
Disconteringsvoet	6%
Restwaarde project	€ 0,-

Tabel 10 Economische aannames van de voorbeeldsituatie.

Bron: Cogen Projects

	Referentie (ketel)	Warmtepomp + ketel
Gaskosten per jaar	€ 41.571	€ 26.605
Elektriciteitskosten per jaar	€ 833	€ 1.982
Onderhoudskosten per jaar	€ 1.600	€ 2.160

Tabel 11 Energie- en onderhoudskosten per jaar. Bron: Cogen Projects

	Referentie	Warmtepomp
Investering	€ 32.000	€ 79.610
Contante waarde	€ 323.877	€ 241.014
Totale kosten over de levensduur	€ 355.877	€ 318.623

Tabel 12 Totale kosten over de levensduur. Bron: Cogen Projects

satie die de fiscale EIA-regeling kan toepassen, maar de betaalde BTW niet kan aftrekken.

In de tabel is te zien dat de kosten van aardgas per jaar aanzienlijk lager zijn bij toepassing van een warmtepomp. Omdat voor het onderhoud een vast percentage van de investering wordt genomen, zijn de kosten voor onderhoud bij de warmtepomp hoger.

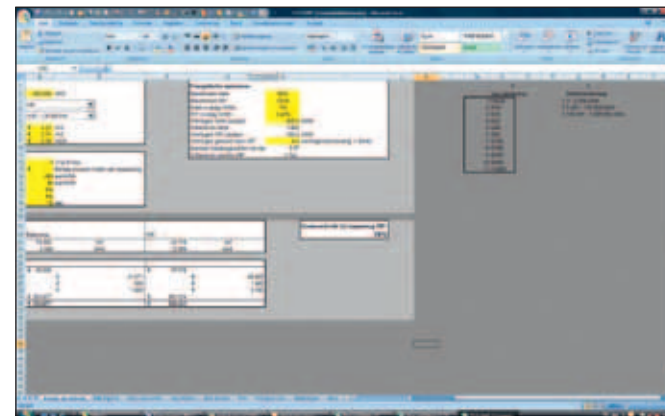
Uit tabel 12 blijkt dat de initiële investering voor een warmtepomp een stuk hoger is dan bij een conventioneel ketelsysteem. De kosten tijdens het gebruik zijn echter aanzienlijk lager. Door toepassing van een warmtepomp wordt ruim tien procent op de TCO bespaard.

Gevoeligheidsanalyse

Door inpassing van een gaswarmtepomp hoeft de eigenaar minder gas in te kopen om aan een gelijkblijvende vraag te voldoen. Dit heeft tot gevolg dat de energiekosten per jaar omlaag gaan, maar ook dat de gevoeligheid voor prijschommelingen afneemt. Bij een stijging van de gasprijs met 50% gaat de besparing als gevolg van de warmtepomp naar circa 15%. Bij een daling van de gasprijs van 50% gaat de besparing naar bijna 6%.

Berekeningen van de TCO in Excel

In een later te verschijnen digitale versie van dit boek is een Excel-sheet opgenomen voor een gedetailleerde berekening van de TCO van gaswarmtepompen in willekeurige praktijksituaties.



Figuur 7 Voorbeeld van een berekening van de TCO in Excel.

Bron: Cogen Projects

6.3 Financiering

Bij de financiering van een project in de utiliteitsbouw, zowel in de bestaande bouw als in de nieuwbouw, kijken partijen verder dan alleen de investering. Naast de primaire investeringen zijn beheer-kosten, onderhoudsgevoeligheid, energiekosten en flexibiliteit (de mogelijkheid om de installatie aan te passen aan gewijzigd gebruik) van groot belang. De zichttermijn is daarbij relatief lang, doorgaans een jaar of tien.

Om in de selectiefase verschillende energiesystemen tegen elkaar te kunnen afwegen moeten de volgende zaken duidelijk zijn:

- Investeringskosten.
- Exploitatiekosten en -opbrengsten.
- Extra inkomsten uit subsidies, fiscale regelingen en hypotheekvoorwaarden.
- De looptijd van de afschrijvingsperiode van de installatie.
- De TCO; de kosten en baten van de installatie gedurende een langere periode.

In de utiliteitssector vragen gebruikers van een gebouw in toenemende mate om inzicht in de exploitatiekosten. De energiekosten zijn hiervan een belangrijk onderdeel. Lagere exploitatiekosten door inzet van een energiezuinige installatie bieden de gebruiker c.q. de eigenaar van een gebouw extra investeringsruimte.

Nieuwe financierings- en beheersconstructies

Om knelpunten bij de financiering van energiebesparende maatregelen in gebouwen weg te nemen, zijn verschillende constructies geïntroduceerd voor financiering en beheer.

1. Een energiebesparend systeem met leverancierskrediet aanschaffen

Hierbij neemt de leverancier de investering voor zijn rekening en betaalt de afnemer op basis van een formele overeenkomst in termijnen. Het systeem is wel direct volledig eigendom van de afnemer. Juridisch gezien is hier sprake van een onderhandse transactie. Om krediet te kunnen verlenen moet de leverancier over voldoende eigen vermogen beschikken. Deze vorm van krediet staat of valt met het wederzijdse vertrouwen tussen de afnemer en de leverancier. Immers, als de afnemer niet meer aan zijn verplichtingen kan voldoen, heeft de leverancier een financieel probleem. Deze vorm is daarom vooral geschikt voor partijen die

al lange tijd met elkaar zaken doen en voor afnemers met een betrouwbare reputatie, zoals overheden, gemeentes en instellingen. De leverancier zal zeker eisen stellen op het gebied van onderhoud en beheer, zodat de installatie goed blijft functioneren.

BTW

Het BTW-tarief is een vastgesteld percentage over het gehele bedrag van de energiekosten (commodity, transport en energiebelasting). Op alle ingekochte energie is het standaard BTW-tarief van 19% van toepassing. Voor partijen die geen gebruik kunnen maken van BTW-teruggave (zoals zorgcentra) is de BTW een extra kostenpost.

2. Een energiebesparend systeem leasen

Door middel van *leasen* kan een organisatie bedrijfsmiddelen verwerven zonder daarvoor zelf de investeringen te doen. Het leasen van energiebesparende voorzieningen is met name in bestaande situaties erg interessant omdat dit vaak mogelijk is zonder extra kosten. De besparing op de energiekosten compenseert in veel gevallen de extra kosten. Voor overheden en non-profitinstellingen is deze mogelijkheid extra interessant, omdat het leasebedrijf recht heeft op de Energie Investerings Aftrek (EIA) en het voordeel daarvan kan verwerken in de tarieven naar de *lessee*. Lease kent twee varianten:

- *Financial lease*. Hierbij wordt de afnemer economisch eigenaar van het systeem. Het komt bij de afnemer op de balans te staan en de afnemer draagt ook zelf het economische risico. Het juridische eigendom blijft bij de leasemaatschappij, in verband met het onderpand.
- *Operational lease*. De leasemaatschappij is zowel economisch als juridisch eigenaar van het systeem. De leasemaatschappij schaft het systeem aan en heeft daarmee ook recht op de investeringspremies. Deze premies worden doorgaans verrekend in de leaseprijs, die daardoor lager kan worden. Het systeem staat op de balans van de leasemaatschappij en niet op de balans van de *lessee*.

In Nederland bestaan diverse kant-en-klare leaseconcepten voor klimaatinstallaties. Bij lease van energiebesparende systemen moeten het onroerend goed en de systemen expliciet van elkaar worden gescheiden, om het juridisch eigendom voor de leasemaatschappij mogelijk te maken. Het leasebedrijf zal ten aanzien van beheer en onderhoud bepaalde zekerheden van de afnemer verlangen.

3. De energievoorziening uitbesteden aan een leverancier van energiediensten

Een *Energy Service Company* (ESCO) is een constructie waarin energiebedrijven de gehele zorg voor verwarming, koeling, ventilatie en dergelijke (inclusief levering van energie) voor hun rekening nemen. Dit gebeurt zowel in de bestaande bouw als bij nieuwbouwprojecten in de utiliteitssector.

In de bestaande bouw bieden de energiediensten hun concept inclusief onderhoud, beheer, afschrijvingen en energiekosten aan. Energiediensten baseren hun concepten vrijwel altijd op *state-of-the-art* energiebesparende technologieën. De samenwerking is vaak voor een langere periode en biedt alle partijen een hoge mate van financiële en technische zekerheid.

Aandachtspunten bij het kiezen van een energiedienst zijn:

- Garantie voor tussentijdse kostenoptimalisatie.
- Duidelijkheid t.a.v. de gehanteerde systematiek voor beheer, onderhoud en energielevering.
- De keuze van een leaseconcept of een concept van totale ontzorging.

4. Samenwerken op het niveau van een bedrijventerrein of kantorenpark

Lokale samenwerking op het niveau van een bedrijventerrein of kantorenpark geeft vele mogelijkheden om de energievoorziening te optimaliseren. Voorbeelden zijn:

- Gebruik van grootschalige, efficiënt ingerichte energiesystemen.
- Bundeling van inkooppotentieel voor warmte, koude, ventilatie, verlichting enzovoort, waardoor concurrerende tarieven mogelijk zijn.
- Realisatie van een eigen energie-infrastructuur, afhankelijk van de situatie.
- Het oprichten van een eigen energiedienst of het inschakelen van een bestaande energiedienst, die voor alle betrokken partijen de zorg voor de energiesystemen op zich neemt. ■



Hoofdstuk 7

Voorbeeldprojecten

De negen voorbeeldprojecten in dit hoofdstuk illustreren de mogelijkheden en de goede prestaties van gaswarmtepompen in de praktijk. Deze projecten zijn representatief voor de gehele utiliteitssector. Zowel grote als kleinere utiliteitsgebouwen komen aan bod, waarbij de warmte- en koudevraag van de verschillende gebouwen flink uiteenloopt. Bij drie projecten worden gasabsorptiewarmtepompen toegepast en bij zes projecten gasmotorwarmtepompen. Ook worden bivalente installaties beschreven.

1. Drie gasmotorwarmtepompen voorzien een modern bioscoopgebouw in Schagen van warmte en koude. Het klimaatstelsel levert verse lucht, warmte en koeling. Het wisselt desgewenst warmte en koude uit tussen de verschillende ruimtes van het gebouw.
2. In een doorsnee kantoorpand werd een tandheelkundige praktijk met behandelkamers en operatiekamers gevestigd. Met behulp van gasmotorwarmtepompen kon aan de specifieke klimaatwensen worden voldaan.
3. Een moderne sportschool met zwembad en *wellness*voorzieningen kreeg een unieke klimaatinstallatie met onder meer vier gasmotorwarmtepompen. De installatie zorgt voor een aanzienlijke energiebesparing en een hoog comfortniveau.
4. Negen flatgebouwen in de Haarlemse wijk Schalkwijk werden gerenoveerd en geïsoleerd. De eigenaar koos voor grootschalige toepassing van zonne-energie en warmtepompen. In totaal werden zestien gasabsorptiewarmtepompen geïnstalleerd. Het energieverbruik per woning daalde met gemiddeld 70%.
5. Een bivalente installatie met een gasabsorptiewarmtepomp en twee HR-ketels levert in het Kinderdagcentrum De Lotusbloem te Aalsmeer een energiebesparing op van 30 tot 50%. De warmtepomp voorziet via een buffervat de vloerverwarming van warmte en houdt het zwembad op temperatuur.
6. Sportfondsen Nederland beheert in Nederland zo'n 300 zwembaden. Drie daarvan zijn nu voorzien van een gasabsorptiewarmtepomp. Eén warmtepomp is voldoende om het zwembad op temperatuur te houden. Er worden rendementen gehaald van 200 procent op onderwaarde.
7. Een nieuw winkelcentrum in Geleen is voorzien van twaalf in cascade geschakelde gasmotorwarmtepompen met hydro-modules. Daardoor is het mogelijk om separate warm- en koudwatercircuits aan te leggen in het gehele complex.
8. Het nieuwe Natuurcentrum op Ameland is voorzien van diverse duurzame energie-opties. Voor de verwarming zijn twee gasmotorwarmtepompen opgesteld die via de vloerverwarming en de luchtbehandeling het pand voorzien van warmte en zomerkoeling.
9. Technisch adviesbureau Genie in Grootebroek wilde zijn nieuwe kantoorpand voorzien van duurzame energietechnologie. De keuze viel op een geoptimaliseerde gasmotorwarmtepomp met warmteterugwinning uit ventilatielucht.

7.1 Bioscoop CineMagnus, Schagen

Bioscoop CineMagnus in Schagen is na een uitgebreid haalbaarheidsonderzoek gebouwd in 2006 en 2007 op een klein bedrijventerrein even buiten de woonkern van Schagen. Aanvankelijk werd een standaardbestek uitgeschreven met alleen verwarming (luchtverwarming) en topkoeling. Nadat het project aanbesteed was, is een projectteam geformeerd dat in detail naar het klimaatsysteem heeft gekeken. Uitgangspunt was een verbetering van het klimaat zonder overschrijding van het budget. Omdat voor het eerdergenoemde standaardstelsel een nieuw transformatorhuis nodig was, mochten de kosten hiervan worden meegenomen in het budget. Als alternatief is een geoptimaliseerde installatie met gasmotorwarmtepompen doorgerkend.

De installatie leverde de volgende voordelen op:

- Geen zware elektrische aansluiting nodig.
- Dankzij het driepijps systeem is onderlinge uitwisseling van warmte en koude tussen de ruimtes binnen het gebouw mogelijk.
- Eenvoudige regeling en aansturing van de installatie, ook op afstand via internet.

Project	CineMagnus Schagen
Gebruik	Bioscoop
Locatie	Grotewallerweg 2 1742 NM Schagen
Omvang gebouw	Circa 1.700 m ² BVO 70.000 bezoekers per jaar
Jaar van oplevering	2006 - 2007
Type installatie	Drie gasmotorwarmtepompen, driepijps VRF-systeem voor koelen en/of verwarmen
Fabriek	Sanyo
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Koelen en verwarmen gelijktijdig
Capaciteit	Totaal 190 kW voor verwarming Totaal 170 kW voor koeling
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	20 °C (+/- 2 °C)
Warmtebron	Buitenlucht
Afgiftesysteem	Directe expansie (DX)
Watertemperatuur	n.v.t.
Gebouwbeheersysteem	LonWorks / TA Control Systems / Schneider Electric
Energieprestaties gemonitord	Nee

Bron: ICE

- Warmtepompen worden geplaatst op het dak waardoor geen inpandige machinekamer nodig is.
- Een lager energiegebruik.

Uiteindelijk zou het systeem iets duurder worden dan gebudgetteerd, maar gezien de voordelen en de verwachte besparing heeft de opdrachtgever gekozen voor het geoptimaliseerde systeem.

De gerealiseerde installatie is uniek te noemen. Onder de zitplaatsen is een groot inblaas- en verdeelplenum gecreëerd, van waaruit de zitplaatsen via de geperforeerde centrale stoelpoten worden geconditioneerd. De gasmotorwarmtepompen regelen de temperatuur in het centrale plenum. De zaal wordt op CO₂ geregeld, waarbij de ventilatielucht met 90% warmteterugwinning wordt afgevoerd. De twee bioscoopzalen en een deel van de foyer en de overige gebruiksruidtes zijn via het systeem met elkaar gekoppeld, waardoor desgewenst continu warmte en koude worden uitgewisseld. De installatie is in 2006 zonder problemen gebouwd en in bedrijf genomen. De bioscoop staat in de regio bekend om zijn aangename klimaat.



Figuur 1 Vooraanzicht bioscoop CineMagnus. Bron: ICE



Figuur 2 Gasmotorwarmtepomp opgesteld op het dak. Bron: ICE

7.2 Orfeokliniek, Zoetermeer

De Orfeokliniek in Zoetermeer is gevestigd in een standaard kantoorpand, dat volledig is aangepast aan de eisen en wensen van de gebruikers. In de kliniek is een reguliere tandartsenpraktijk gevestigd. De locatie beschikt over een aantal volledig ingerichte operatiekamers voor gecompliceerde kaakchirurgische ingrepen.

Praktijkgebouwen als deze (en hun specifieke gebruik) stellen hoge eisen aan de installaties voor verwarming, koeling en ventilatie. Bij de inrichting van de Orfeokliniek is gekozen voor twee op het dak geplaatste gasmotorwarmtepompen van Sanyo. De kleine capaciteit van de elektrische aansluitingen en de beperkte afmetingen van de technische ruimte speelden hierbij mede een rol.

De warmtepompen leveren warmte en koude aan twee grote buffervaten, die warm of koud water leveren aan een luchtbehandelingskast met *fancoil units*. Via de ventilatielucht worden de behandelruimtes in het pand van koeling of verwarming voor-

zien. Om het binnenklimaat zo zuiver mogelijk te houden, wordt het pand met een overmaat aan lucht geventileerd. Deze opzet zorgt voor een hoge mate van comfort en hygiëne. De installatie is goed regelbaar en het energetische rendement ten opzichte van een conventionele installatie (een CV-ketel en een koud-watermachine) is uitstekend.

Project	Orfeokliniek Zoetermeer
Gebruik	Tandheelkundige kliniek
Locatie	Orfeeschouw 38 2726 JG Zoetermeer
Omvang gebouw	Circa 1.200 m ² BVO
Jaar van oplevering	2008
Type installatie	Twee gasmotorwarmtepompen, tweepijps systeem voor koelen en/of verwarmen met watermodule en heetwaterproductie
Fabriek	Sanyo
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Koelen en verwarmen (eventueel) gelijktijdig, ontvochtiging, productie warm tapwater
Capaciteit	120 kW voor verwarming 100 kW voor koeling 40 kW voor productie tapwater
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	20 °C
Warmtebron	Buitenlucht
Afgiftesysteem	Directe expansie (DX), water
Watertemperatuur	Verwarmen: 40 – 45 °C Koelen: 7 – 12 °C
Gebouwbeheersysteem	Ja
Energieprestaties gemonitord	Nee

Bron: ICE



Figuur 3 Twee gasmotorwarmtepompen op het dak van de kliniek. Bron: BDH



Figuur 4 Eén van de operatiekamers. Bron: BDH

7.3 Vital Centre, Raalte

Het klimaatsysteem van Vital Centre in Raalte is met een combinatie van driepijps en tweepijps gasmotorwarmtepompen en de terugwinning van koude en warmte uit de ventilatielucht uniek in Europa. In totaal zijn vier gasmotorwarmtepompen geïnstalleerd: één driepijps systeem (VRF) voor koelen en/of verwarmen, twee tweepijps systemen (VRF) voor koelen of verwarmen en één tweepijps systeem voor koelen of verwarmen met een watermodule. De drie tweepijps systemen zijn voorzien van een generator voor stroomlevering en heetwaterproductie. Drie van de vier gasmotoren leveren tijdens koelbedrijf restwarmte (75 °C) voor de heetwaterproductie van het zwembad. Warm tapwater wordt gemaakt met een HR-gasboiler, omdat hier het risico van legionellabesmetting zwaarder weegt dan het energieverbruik. Om diverse redenen koos de opdrachtgever voor gaswarmte-

Project	Vital Centre Raalte
Gebruik	Sportschool met zwembad
Locatie	Hammerweg 8b 8101 NE Raalte
Omvang gebouw	Circa 3.300 m ² BVO 2.000 – 2.500 sportende bezoekers per week
Jaar van oplevering	2008 – 2009
Type installatie	Vier gasmotorwarmtepompen
Fabriek	Sanyo
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Koelen en verwarmen, eventueel gelijktijdig
Capaciteit	250 kW voor verwarming 225 kW voor koeling 60 kW heetwaterproductie 12 kW elektrisch opwekvermogen
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	18 °C (in de sportzalen) 21 °C (in de kantoren) 31 °C (in het zwembad)
Warmtebron	Buitenlucht
Afgiftesysteem	Directe expansie (DX) en water (LTV)
Watertemperatuur	35° – 55 °C voor verwarming 75 °C voor voetenbad, zwembad en LBK (restwarmte tijdens koelbedrijf)
Gebouwbeheerssysteem	Sanyo regeling in combinatie met zelfontwikkelde PLC-besturing. Alle ruimten individueel regelbaar op temperatuur
Energieprestaties gemonitord	Nee

Bron: ICE

pompen in plaats van een standaard installatie met CV-ketels en een elektrische warmtepomp:

- Reductie van het energieverbruik (en van de energiekosten).
- Reductie van de CO₂-uitstoot (met 40.000 kg per jaar).
- De mogelijkheid om de warmte van sporters te hergebruiken in het zwembad.
- Reductie van de capaciteit van het transformatorhuis.
- Flexibele regelbaarheid per vertrek.
- De mogelijkheid van ontvochtiging per vertrek.

Dankzij de EIA-regeling kon de installatie binnen het budget van Vital worden gerealiseerd.

In het zwembadgedeelte wordt een elektrische warmtepomp met hoog rendement ingezet om de lucht te ontvochtigen en daarbij de restwarmte te hergebruiken. Om corrosieproblemen te voorkomen zijn hier kunststof warmtewisselaars toegepast.

Sinds de opening van Vital Centre Raalte wordt het klimaat in het pand als zeer comfortabel ervaren. In het eerst halfjaar lag het gasverbruik op slechts 27.000 m³.



Figuur 5 Vital Fitness Centre, Raalte. Bron: ICE



Figuur 6 Opstelling van vier gasmotorwarmtepompen op het dak. Bron: ICE

7.4 Flatgebouwen Schalkwijk, Haarlem

De negen flatgebouwen 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 en warmtepompen.

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.

Door verbeterde isolatie en de toepassing van zonnepanelen, gasabsorptiewarmtepompen en warmteopslag verbruiken de woningen op jaarbasis gemiddeld per woning 1.350 m³ minder aardgas. Dit 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 hoger zijn. Een voordeel voor de bewoners is dat ze de ruimtetemperatuur in hun woning zelf kunnen regelen, wat in de oude situatie niet mogelijk was.

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 in combinatie met zonneboilers
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

Bron: Techneco



Figuur 7 Wooncomplex in de Haarlemse wijk Schalkwijk. Bron: Techneco



Figuur 8 Opstelling van twee van de zestien gasabsorptiewarmtepompen. Bron: Techneco

7.5 Kinderdagcentrum De Lotusbloem, Aalsmeer

De Lotusbloem is een Kinderdagcentrum voor kinderen van 0 tot 18 jaar die een ontwikkelingsachterstand of een verstandelijke, zintuiglijke of meervoudige handicap hebben. De kinderen en hun begeleiders kunnen beschikken over meerdere speelzalen en een zwembad.

Een gasabsorptiewarmtepomp produceert warmte voor de vloerverwarming en voor het zwembad. Andere onderdelen (verwarmingsradiatoren, luchtbehandeling en warmwatervoorziening) worden gevoed door twee nieuwe CV-ketels. De bestaande regelinstallatie is intact gehouden en uitgebreid met losse componenten.

Wanneer de warmtevraag groter is dan de capaciteit van de warmtepomp, worden de CV-ketels bijgeschakeld. De warmtepomp is via een buffertank van 1.000 liter ontkoppeld. De temperatuur van de buffer wordt op 45 °C gehouden en de \ van de warmtepomp bedraagt 10 tot 15 °C. De aansluitleidingen tussen de buffer en de warmtepomp zijn voorzien van een circulatiepomp en een inregelafsluiter voor het instellen van het primaire debiet. Secundair is de buffer aan-

gesloten op de menggroep van het zwembad en de groepen van de vloerverwarming. Door middel van twee wisselkleppen kan geschakeld worden tussen de warmtepomp en de CV-ketels. Door het inzetten van de gasabsorptiewarmtepomp bespaart het kinderdagcentrum 30 tot 50% op het totale energieverbruik. De gasabsorptiewarmtepomp is geplaatst op het dak. Gekozen is voor een geluidarme versie.

Project	Kinderdagcentrum De Lotusbloem
Gebruik	Kinderopvang met zwembad
Locatie	Apollostraat 66 1431 WT Aalsmeer
Omvang gebouw	Circa 1.000 m ² BVO Circa 40 kinderen en begeleiders dagelijks
Jaar van oplevering	2009
Type installatie	Gasabsorptiewarmtepomp
Fabriek	Robur
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Ruimteverwarming, zwembadverwarming
Capaciteit	38,4 kW voor verwarming
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	20 °C
Warmtebron	Buitenlucht
Afgiftesysteem	Water (vloerverwarming plus warmtelevering aan zwembadwater)
Watertemperatuur	45/35 °C
Gebouwbeheersysteem	StaeFa Control
Energieprestaties gemonitord	Ja

Bron: Techneco



Figuur 9 Buitengevel zwembadgedeelte kinderdagcentrum. Bron: Techneco



Figuur 10 Opstelling van de gasabsorptiewarmtepomp op het dak. Bron: Techneco

7.6 Sportfondsenbaden

Gasabsorptiewarmtepompen zijn zeer geschikt als energiezuinige warmteopwekker in zwembaden. Sportfondsen Nederland heeft drie van de ruim 300 zwembaden die de organisatie beheert, voorzien van een gaswarmtepomp. De zwembaden in Rotterdam (Recreatiecentrum Oostervant), Didam (Zwembad De Hoevert) en Roelofarendsveen (Sport- en Recreatiecentrum De Tweesprong) hebben elk aan één absorptiewarmtepomp genoeg om het zwembadwater op de gewenste temperatuur van 30 °C te houden. Daarbij worden rendementen gehaald van 200%, afhankelijk van de buitentemperatuur. Doordat de warmtepompen op de daken van de zwembaden zijn geplaatst, ontstaat er geen ruimteprobleem in de bestaande technische ruimtes. Het gasverbruik is ongeveer de helft van dat van een vergelijkbaar zwembad met een conventionele installatie.

Project	Sportfondsenbaden
Gebruik	Recreatiezwembad
Locatie	Rotterdam, Didam en Roelofarendsveen
Omvang gebouw	Circa 600 m ³ water per zwembad 100 – 500 bezoekers per dag per zwembad
Jaar van oplevering	2009
Type installatie	Gasabsorptiewarmtepomp
Fabriek	Robur
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Zwemwaterverwarming
Capaciteit	38,4 kW voor verwarming
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	30 °C (zwembadwater)
Warmtebron	Buitenlucht
Afgiftesysteem	Water
Watertemperatuur	30 °C
Gebouwbeheersysteem	Nee
Energieprestaties gemonitord	Ja

Bron: Techneco



Figuur 11 Opstelling van de gasabsorptiewarmtepomp op het Sportfondsenbad in Didam. Bron: Sportfondsen Nederland



Figuur 12 Opstelling van de gasabsorptiewarmtepomp op het Sportfondsenbad in Rotterdam. Bron: Sportfondsen Nederland

7.7 Winkelcentrum, Geleen

De projectontwikkelaar van een nieuw winkelcentrum in het stadshart van Geleen zocht een energiezuinige oplossing voor de warmte- en koudevraag van het complex. Kenmerkend voor een winkelcomplex is de combinatie van warmte- en koudevraag. De presentatieverlichting in winkels veroorzaakt een dermate hoge warmtelast, dat er zelfs in de winter behoefte aan koeling is. De voordelen van een gaswarmtepomp zijn in dit geval duidelijk: goede inpasbaarheid, de mogelijkheid om tegelijk warmte en koude te leveren en de relatief lage CO₂-uitstoot. De keuze voor een gaswarmtepomp in plaats van een elektrische variant levert een aanzienlijke besparing van primaire energie op.

Voor het winkelcentrum is een installatie ontworpen die bestaat uit twaalf in cascade geschakelde gasmotorwarmtepompen met hydromodules. Het watersysteem is in het hele complex vierpijps uitgevoerd. Dit betekent dat in alle winkelruimtes zowel koude als warmte beschikbaar is. Het verbruik wordt per winkelunit gemeten en afgerekend. Het systeem is vérgaand geoptimaliseerd; zo wordt de motorwarmte die vrijkomt bij de productie van warmte en koude nuttig gebruikt (en zo nodig gebufferd) in het warmwatersysteem.

Project	Winkelcentrum Geleen
Gebruik	Detailhandel
Locatie	Stadshart Geleen
Omvang gebouw	Circa 11.500 m ²
Jaar van oplevering	2008
Type installatie	Twaalf gasmotorwarmtepompen
Fabriek	AISIN Toyota
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Ruimteverwarming en koeling gedurende het hele jaar, deels gelijktijdig
Capaciteit	1.008 kW voor verwarming 852 kW voor koeling
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	A7/W35
Warmtebron	Buitenlucht en motorwarmte
Afgiftesysteem	Water
Watertemperatuur	Koelen 7/11 °C, verwarmen 35/41 °C
Gebouwbeheersysteem	Ja
Energieprestaties gemonitord	Ja

Bron: Gasengineering

Het seizoensgemiddelde rendement voor verwarming ligt volgens opgave van de leverancier bij het toegepaste vierpijps systeem op 170% (op onderwaarde) of hoger.



Figuur 13 Gasmotorwarmtepompen op het dak van het winkelcentrum in Geleen. Bron: Gasengineering



Figuur 14 Opstelling van de gasmotorwarmtepompen vanuit een ander gezichtspunt. Bron: Gasengineering

7.8 Natuurcentrum, Ameland

Het Natuurcentrum Ameland is een modern museum annex bezoekerscentrum, gevestigd in een fraai nieuwbouwpand bij Nes, Ameland. Op initiatief van diverse energiepartners die via het project Duurzaam Ameland bij de inrichting van het centrum betrokken zijn, is de optie van een klimaatinstallatie met gaswarmtepompen onderzocht. Het bezoekerscentrum is een goed voorbeeld van een modern publieksgebouw, waar door het treffen van goede isolatiemaatregelen de warmtebehoefte relatief laag is. Daarentegen is er gedurende een groot deel van het jaar behoefte aan koeling. Warmte- en koudevraag treden soms gelijktijdig op. In dit soort gebouwen is een gaswarmtepomp zeer interessant. De meerinvesteringen ten opzichte van een CV-ketel met koelmachine kunnen binnen een beperkt aantal jaren worden terugverdiend.

Het bezoekerscentrum is uitgerust met een laagtemperatuur vloerverwarmingssysteem. Naverwarming en zomerkoeling vinden plaats via de luchtbehandeling. Twee gasmotorwarmte-

pompen zijn buiten naast het pand opgesteld; plaatsing op het dak was niet mogelijk, gezien de architectuur van het pand. Het inpandige deel van de installatie is achter een glazen wand geplaatst en maakt deel uit van een energie-expositie. Gekozen is voor een vierpijps systeem met een waterbuffer voor eventuele opslag van motorwarmte. De installatie wordt op afstand gemonitord door TNO.

Project	Natuurcentrum Ameland
Gebruik	Bezoekerscentrum
Locatie	Strandweg 38 9163 GN Nes
Omvang gebouw	2.300m ² BVO, circa 60.000 bezoekers per jaar
Jaar van oplevering	2008
Type installatie	Twee gasmotorwarmtepompen
Fabriek	AISIN Toyota
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Ruimteverwarming en -koeling. Gelijktijdige warmte- en koudelevering gedurende de tussenseizoenen
Capaciteit	134 kW voor verwarming 112 kW voor koeling
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	Kantoren: 21 °C Expositieruimtes: 18 °C
Warmtebron	Buitenlucht en motorwarmte
Afgiftesysteem	Water, luchtbehandeling
Watertemperatuur	Koelen 7/11 °C, verwarmen 35/41 °C
Gebouwbeheersysteem	Ja, op afstand beheerd door de installateur in Dokkum
Energieprestaties gemonitord	Ja; nog geen gegevens beschikbaar

Bron: Gasengineering



Figuur 15 Natuurcentrum Ameland. Bron: BDH



Figuur 16 Opstelling van twee gasmotorwarmtepompen naast het gebouw. Bron: BDH

7.9 Adviesbureau Genie, Grootebroek

De opdrachtgever voor dit project is een technisch adviesbureau dat in de nieuwbouw van een eigen kantoorpand aanleiding zag om hier mooie, maar vooral ook rendabele techniek te realiseren. Na uitgebreid onderzoek viel de keus op een installatie met een gaswarmtepomp en een vierpijps distributiesysteem voor warmte en koude.

Het nieuwe kantoorpand van Genie BV is een voorbeeld van een pand met een sterke noord-zuidoriëntatie en veel ramen op het zuiden. Daardoor komt het regelmatig voor dat er aan de ene kant van het gebouw warmte wordt gevraagd en aan de andere kant koude. In dergelijke panden is een gaswarmtepomp doorgaans een interessante optie. Alternatieve systemen bieden óf niet hetzelfde comfort, óf verbruiken aanmerkelijk meer energie. Een van de onderzochte opties was een warmtepompsysteem met warmte- en koudeopslag (WKO) in de bodem. Zo'n installatie heeft, mits goed ontworpen, een hoog seizoensrendement. In het geval van Genie Grootebroek was WKO te complex en te kostbaar. Het eerstvolgende alternatief was een installatie met een geoptimaliseerde gasmotorwarmtepomp met hergebruik

van motorwarmte, een vierpijps watersysteem en warmteterugwinning uit ventilatielucht. Zo'n installatie haalt niet helemaal het rendement van een WKO-installatie, maar is eenvoudiger en goedkoper te realiseren. In de praktijk is deze optie het best renderende alternatief in die gevallen waarbij een WKO-installatie niet haalbaar is.

Het seizoensgemiddelde rendement ligt volgens opgave van de leverancier op 170% (op onderwaarde) of hoger. Adviesbureau Genie monitort het energieverbruik van het eigen pand nauwgezet. Eind januari 2010 was het aardgasverbruik ongeveer 110 m³ per week. Op jaarbasis verwacht men uit te komen op 6.000 m³ aardgas per jaar, voor verwarmen en koelen. Dat is extreem laag voor een gebouw van deze omvang.

Project	Adviesbureau Genie BV te Grootebroek
Gebruik	Kantoor
Locatie	Bedrijfsweg 16 1613 DX Grootebroek
Omvang gebouw	500 m ² kantoor, 14 werkplekken
Jaar van oplevering	2009
Type installatie	Gasmotorwarmtepomp
Fabriek	AlSIN Toyota
Energievoorziening	Aardgas en elektriciteit
Functionaliteit	Ruimteverwarming en -koeling. Gelijktijdige warmte- en koudelevering gedurende de tussenseizoenen
Capaciteit	42,5 kW voor verwarming 35,5 kW voor verwarming
Ontwerptemperatuur bij -7 °C	22 °C
Warmtebron	Buitenlucht en motorwarmte
Afgiftesysteem	Water
Watertemperatuur	Koelen 7/11 °C, verwarmen 35/41 °C
Gebouwbeheersysteem	Ja, merk Trend
Energieprestaties gemonitord	Ja

Bron: Gasengineering



Figuur 17 Het nieuwe kantoorpand van technisch adviesbureau Genie BV. Bron: Gasengineering



Figuur 18 Technische ruimte met hydromodule. Bron: Gasengineering

Bijlage

Rekenen aan gaswarmtepompen

Om een juiste vergelijking tussen de rendementen van verschillende warmtepompsystemen mogelijk te maken, is het nodig de energetische prestaties om te rekenen naar primaire energie. Deze bijlage geeft een overzicht van de belangrijkste grootheden, definities en systeemgrenzen. Hieruit kan een aantal praktisch bruikbare formules voor systeemrendementen worden afgeleid.

Definities

Het is van groot belang dat bij het vergelijken van verschillende warmtepompsystemen dezelfde terminologie wordt gehanteerd. Om te voorkomen dat verschillende beelden ontstaan, geeft deze paragraaf een overzicht van de belangrijkste grootheden en de bijbehorende definities. De drie meest voorkomende systeemgrenzen zijn in figuur 1 weergegeven. Hierin zijn het rendement van de warmtepomp zelf, het rendement van het opslag- en distributiesysteem en het rendement van het gehele systeem duidelijk te onderscheiden.

De *Seasonal Performance Factor (SPF)* omvat de systeemgrenzen van zowel de separate warmtepomp als het opslag- en distributiesysteem. Het gaat dus om de nuttige energie (warmte en koude) die door de systeemgrens gaat.

In tabel 1 zijn de definities van de verschillende grootheden weergegeven. De verschillende grootheden en begrippen worden vervolgens nader toegelicht.

COP en GUE

Bij elektrisch gedreven warmtepompen wordt de energetische prestatie (het rendement) van de warmtepomp de *Coefficient of Performance (COP)* genoemd. Hiervoor worden verschillende definities gebruikt. In essentie is de COP de verhouding tussen de door de warmtepomp geleverde hoeveelheid energie en de totaal opgenomen hoeveelheid energie. De opgenomen energie is dus de aandrijfenergie van de compressor, de energie voor de regeling en de energie die nodig is om het medium door de verdamper en de condensor te laten stromen.

Bij gaswarmtepompen wordt het energetische rendement vaak aangeduid als de *Gas Utilization Efficiency* (GUE). Dit is de verhouding tussen de nuttige warmte die door de warmtepomp wordt geleverd en de door de warmtepomp gebruikte hoeveelheid gas (omgerekend naar een energiehoeveelheid op basis van de onderste verbrandingswaarde van het gas). Hierin is dus niet de elektrische energie verdisconteerd die nodig is voor de pompen en de regeling. Voor de COP en de GUE geldt dat ze zowel momentaan als over een bepaalde periode kunnen worden vastgesteld.

Voor elektrische warmtepompen geldt dat de COP het quotiënt is van de door de warmtepomp geleverde energie (Q_{WP}) en de aandrijfenergie van de warmtepomp ($E_{WP, aandrijf}$). Voor de elektrische warmtepomp geldt dus:

$$COP_{EWP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP, aandrijf}} [-]$$

Voor gasgedreven warmtepompen geldt:

$$GUE_{GWP} = \frac{Q_{WP}}{G_{WP, aandrijf}} [-]$$

Elektrische warmtepomp	Gasgedreven warmtepomp
$COP_{EWP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP, aandrijf}} [-]$	n.v.t
n.v.t	$GUE_{GWP} = \frac{Q_{WP}}{G_{WP, aandrijf}} [-]$
$PER_{EWP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP, aandrijf} / \eta_{el}}$	$PER_{GWP} = \frac{Q_{WP}}{G_{WP, aandrijf} + E_{WP, aandrijf} / \eta_{el}}$
$SPF = \frac{Q_{Tap} + Q_{CV}}{E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{hulp}} [-]$	n.v.t
$SPF_{prim} = \frac{Q_{Tap} + Q_{CV}}{(E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{hulp}) / \eta_{el}} = PER_{sys} [-]$	$SPF_{prim} = \frac{Q_{Tap} + Q_{CV}}{(G_{WP, aandrijf} + E_{hulp}) / \eta_{el} + G_{WP, aandrijf} + G_{bijstook}} = PER_{sys} [-]$
$Combiprestatie = \frac{Q_{warmte} + Q_{koude}}{E_{WP, aandrijf\ totaal}} [-]$	n.v.t
$Combiprestatie_{prim} = \frac{Q_{wp, warmte} + Q_{wp, koude}}{E_{WP, aandrijf} / \eta_{el}} [-]$	$Combiprestatie_{prim} = \frac{Q_{WP, warmte} + Q_{WP, koude}}{G_{WP, aandrijf} + E_{WP, aandrijf} / \eta_{el}}$
$Dekkingsgraad = D = \frac{Q_{wp}}{Q_{tap} + Q_{CV}} [-]$	
$Aandeel\ aandrijfenergie = \Phi = \frac{E_{WP, aandrijf}}{E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{hulp}} [-]$	
$\eta_{systeem} = \frac{SPF}{COP_{EWP}} = \frac{1}{D} * \Phi$	

Tabel 1 Overzicht van de belangrijkste grootheden.

Primary Energy Ratio (PER)

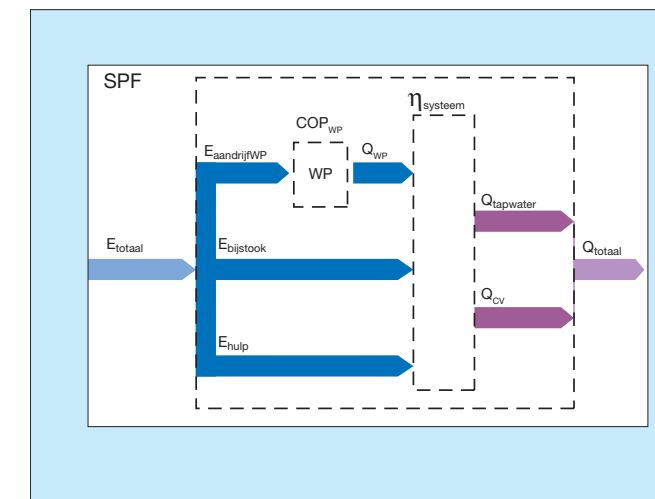
De grootheden COP en GUE kunnen niet zonder meer met elkaar worden vergeleken. Om een vergelijking tussen de rendementen van elektrische en gasgedreven warmtepompen mogelijk te maken, is het nodig deze grootheden om te rekenen naar de *Primary Energy Ratio* (PER). De PER relateert de energetische prestaties van het systeem aan primaire energie. Daardoor is het mogelijk verschillende energiedragers te vergelijken (in dit geval elektriciteit en aardgas). Gas wordt gezien als primaire energiedrager, elektriciteit niet. Het elektriciteitsgebruik moet worden omgerekend naar primaire energie door het gemiddelde rendement van de elektriciteitsvoorziening (opwekking en distributie) te verrekenen. Voor het gemiddelde rendement van de elektriciteitsvoorziening wordt in dit handboek 42% (op onderwaarde) aangehouden, wat overeenkomt met de waarde in de EPN.

Voor elektrische warmtepompen geldt:

$$PER_{EWP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP, aandrijf} / \eta_{centrale}} [-]$$

Voor gasgedreven warmtepompen geldt:

$$PER_{GWP} = \frac{Q_{WP}}{G_{WP, aandrijf} + E_{WP, aandrijf} / \eta_{el}} [-]$$



Figuur 1 Systeemgrenzen van de verschillende grootheden die het rendement (SPF) van een warmtepompsysteem aangeven. Bron: TNO

Grootheden

- Q_{WP} De door de warmtepomp geleverde warmte (energie)
- Q_{Tap} De door het systeem geleverde energie via het warme tapwater
- Q_{CV} De door het systeem geleverde energie via het verwarmingssysteem
- Q_{warmte} De door het systeem geleverde warmte ($Q_{tap} + Q_{CV}$)
- Q_{koude} De door het systeem geleverde koude
- $Q_{WP, warmte}$ De door de warmtepomp geleverde warmte
- $Q_{WP, koude}$ De door de warmtepomp geleverde koude
- $G_{WP, aandrijf}$ De door de warmtepomp opgenomen hoeveelheid gas, omgerekend naar energiehoeveelheid op basis van de onderste verbrandingswaarde
- $G_{bijstook}$ De door het systeem opgenomen hoeveelheid gas voor de bijstookvoorziening, omgerekend naar energiehoeveelheid op basis van de onderste verbrandingswaarde
- η_{el} Het rendement voor de elektriciteitsopwekking en transport (42% op basis van de onderste verbrandingswaarde)
- $E_{WP, aandrijf}$ De door de warmtepomp opgenomen elektrische energie voor de compressor, regeling en in de warmtepomp aanwezige circulatiepompen
- $E_{bijstook}$ De door het systeem opgenomen elektrische energie voor de bijstookvoorziening
- $E_{bijkoeling}$ De door het systeem opgenomen elektrische energie voor de additionele koeling
- E_{hulp} De door het systeem opgenomen elektrische hulpenergie
- $E_{hulpGWP}$ De door de gaswarmtepomp opgenomen elektrische hulpenergie

Seasonal Performance Factor (SPF)

De systeemgrens van de *Seasonal Performance Factor* (SPF) omvat de systeemgrenzen van de separate warmtepomp en het opslag- en distributiesysteem. Het gaat dus om de nuttige energie (warmte en koude) die door de systeemgrens gaat en aan het gebouw wordt geleverd.

$$SPF = \frac{Q_{tap} + Q_{CV} + Q_{koude}}{G_{WP, aandrijf} + E_{WP, aandrijf}/\eta_{el}} [-]$$

De SPF wordt bij voorkeur over een heel seizoen bepaald, maar een kortere periode (per stookseizoen of jaargetijde of kwartaal) is uiteraard ook mogelijk. De teller van de breuk bestaat uit de geleverde warmte voor de functie tapwater (Q_{tap}), de functie ruimteverwarming (Q_{CV}) en de koelfunctie (Q_{koude}). In de noemer staat de totale hoeveelheid aan het systeem toegevoerde (elektrische) energie. Deze energiestroom bestaat uit de aandrijfenergie (aardgas) voor de warmtepomp ($G_{WP, aandrijf}$), de hulpenergie voor de aandrijving van de pompen, de ventilatoren, de regeling en de beveiliging ($E_{hulpGWP}$).

Een belangrijk aandachtspunt is dat de SPF sterk afhangt van het gebruikersgedrag, omdat de verliezen van het systeem hierin verdisconteerd zijn. De systeemverliezen komen bij deze benadering tot uiting in het systeemrendement $\eta_{systeem}$:

$$SPF = \eta_{systeem} * PER_{GWP}$$

ofwel:

$$\eta_{systeem} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV}}{G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}} * \frac{1}{PER_{GWP}} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV}}{E_{totaal} * PER_{GWP}}$$

In deze uitdrukking staat in de teller de totaal door het warmtepompsysteem geleverde warmte en in de noemer de hoeveelheid warmte die zou zijn opgewekt als de totale elektriciteitsinput E_{totaal} als aandrijving van de warmtepomp zou zijn gebruikt. $\eta_{systeem}$ is dus de verhouding tussen de werkelijk geleverde warmte en de warmte die geleverd zou worden bij een ideaal systeem.

Verder geldt:

$$\eta_{systeem} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV}}{G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}} * \frac{1}{PER_{GWP}} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV}}{E_{totaal} * PER_{GWP}}$$

$$\eta_{systeem} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV}}{Q_{WP}} * \frac{G_{WP, aandrijf}}{G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}}$$

$$\eta_{systeem} = \frac{1}{D} * \Phi$$

$$Dekkingsgraad: D = \frac{Q_{WP}}{Q_{tap} + Q_{CV}} [-]$$

$$Aandeel aandrijfenergie \Phi = \frac{E_{WP, aandrijf}}{G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}} [-]$$

$$SPF = \frac{1}{D} * \Phi * PER_{GWP}$$

In deze afleiding is te zien dat het systeemrendement afhankelijk is van de dekkingsgraad (D) van de warmtepomp en de verhouding (Φ) tussen de aandrijfenergie van de warmtepomp en de totale energietoevoer aan het systeem.

De dekkingsgraad van een systeem is de verhouding tussen de hoeveelheid warmte die door de warmtepomp kan worden geleverd en de hoeveelheid warmte die wordt gevraagd voor warm tapwater en ruimteverwarming. Bij een bivalent systeem zal dit getal kleiner zijn dan 1 (de warmtepomp neemt maar een deel van de totale warmtevraag voor zijn rekening), terwijl een monovalent systeem een dekkingsgraad zal hebben van 1 (100%).

De factor 'aandeel aandrijfenergie' geeft een beeld van de hoeveelheid hulpenergie die wordt gebruikt. Een hoge waarde voor deze grootheid geeft aan dat er weinig energie gebruikt wordt voor pompen, ventilatoren etcetera. Een lage waarde vraagt om een kritische analyse van het hulpenergiegebruik.

De grootheden PER_{GWP} , D en Φ geven gezamenlijk dus een goed beeld van het functioneren van het warmtepompsysteem. Uit deze gegevens kunnen het systeemrendement ($\eta_{systeem}$) en de SPF worden berekend.

Ook voor de SPF geldt dat er een omrekening naar primaire energie nodig is om gasgedreven systemen en elektrische systemen onderling te kunnen vergelijken. Deze SPF op basis van primaire energie SPF_{prim} kan ook als de *Primary Energy Ratio* van het hele systeem (PER_{sys}) worden aangegeven.

$$SPF_{prim} = \frac{Q_{tap} + Q_{CV} + Q_{koude}}{(G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}/\eta_{el} + G_{bijstook})} = PER_{sys} [-]$$

Begrippen bij verwarming en koeling

Een warmtepomp komt uitstekend tot zijn recht in een situatie waar gelijktijdig wordt verwarmd en gekoeld. Vaak worden in zo'n situatie de COP's voor koeling en voor verwarming eenvoudig bij elkaar opgeteld. Dit is niet correct. Wel correct is de geleverde energie in de vorm van warmte en koude bij elkaar te nemen en deze te delen door de primaire energie die nodig is voor de aandrijving van de warmtepomp.

$$combiprestatie_{prim} = \frac{Q_{WP, warmte} + Q_{WP, koude}}{G_{WP, aandrijf}} = [-]$$

$$combiprestatie_{prim} = \frac{Q_{WP, warmte} + Q_{WP, koude}}{G_{WP, aandrijf} + E_{hulpGWP}/\eta_{el}} = [-]$$

De SPF wordt meestal over een heel seizoen bepaald. Indien de warmtepomp naast verwarming ook zorgt voor koeling geldt:

$$SPF = \frac{Q_{warmte} + Q_{koude}}{E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{bijkoeling} + E_{hulp}} [-]$$

$$SPF_{prim} = \frac{Q_{warmte} + Q_{koude}}{(E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{bijkoeling} + E_{hulp})/\eta_{el} + G_{WP, aandrijf} + G_{bijstook}} = PER_{sys} [-]$$

Q_{warmte} De door het systeem geleverde warmte ($Q_{tap} + Q_{CV}$).

Q_{koude} De door het systeem geleverde koude.

In de teller zijn de nuttige hoeveelheid warmte en de nuttige hoeveelheid koude opgenomen. In de noemer staat de totale hoeveelheid energie die nodig is om dit te kunnen realiseren.

De systeemverliezen komen tot uiting in het systeemrendement

$\eta_{systeem}$.

$$SPF = \eta_{systeem} * combiprestatie$$

ofwel:

$$\eta_{sys} = \frac{SPF}{combiprestatie} =$$

$$\frac{Q_{warmte} + Q_{koude}}{E_{WP, aandrijf} + E_{bijstook} + E_{bijkoeling} + E_{hulp}} * \frac{E_{WP, aandrijf}}{Q_{WP, warmte} + Q_{WP, koude}}$$

De factor D wordt in dit geval de combidekkingsgraad genoemd:

$$\frac{1}{D} = \frac{Q_{warmte} + Q_{koude}}{Q_{WP, koude} + Q_{WP, warmte}}$$

In deze uitdrukking staat in de teller de totaal door het warmtepompsysteem geleverde warmte en koude en in de noemer de hoeveelheid warmte die zou zijn opgewekt als de totale elektriciteitsinput E_{totaal} als aandrijving van de warmtepomp zou zijn gebruikt.

Verder geldt:

$$Dekkingsgraad D_{koude} = \frac{Q_{WP, koude}}{Q_{koude}} [-]$$

$$Aandeel aandrijfenergie \Phi = \frac{G_{WP, aandrijf}}{G_{WP, aandrijf} + (E_{bijkoeling} + E_{hulpGWP}) \eta_{el}}$$

Het aandeel van de additionele energie kan hieraan eenvoudig worden ontleend:

$$Aandeel additionele energie \phi = 1 - \Phi$$

Definities

Aanvoertemperatuur Temperatuur van CV-water dat naar de radiatoren gaat.

Aanwarmtoeslag Extra capaciteit die wordt meegerekend bij het bepalen van het op te stellen vermogen. De aanwarmtoeslag is nodig om het gebouw snel op temperatuur te krijgen wanneer de warmtevraag snel toeneemt.

Absorptie Fysisch proces waarbij een koudemiddeldamp wordt aange-trokken door een vloeistof (de absorbens) en de damp in de absorbens wordt opgenomen en ermee vermengt.

Absorptiewarmtepomp Warmtepomp waarvan de werking berust op het absorptieprincipe.

Adsorptie Proces vergelijkbaar met absorptie, waarbij de moleculen zich hechten aan een vaste stof in plaats van een vloeistof. De moleculen van het koudemiddel hechten zich aan die van de adsorbens, maar mengen er niet mee, zoals bij absorptie.

Adsorptiewarmtepomp Warmtepomp waarvan de werking berust op het adsorptieprincipe.

Antivries Een mengsel van water en glycol, ook wel 'brine' genoemd.

Asrendement Het rendement van een (gas-)motor, gedefinieerd als het quotiënt van het uitgaande vermogen, gemeten aan de as, en het ingaan-de vermogen in de vorm van brandstof.

Bodemwarmtewisselaar Leiding die horizontaal of verticaal in de bodem is aangelegd, waar een werkmedium doorheen stroomt dat warmte of koude aan de bodem onttrekt.

Brontemperatuur De temperatuur van het medium dat de warmtepomp als warmtebron gebruikt (meestal lucht of water).

Carnotfactor Maximale rendement dat met een thermodynamische energieomzetting gehaald kan worden. De methode waarmee dit rende-ment bepaald wordt is ontwikkeld door Carnot.

Carnotrendement Maximale (theoretische) rendement dat met een thermodynamische energieomzetting gehaald kan worden.

Cascade Parallelschakeling van meerdere gelijksoortige apparaten (bij-voorbeeld warmtepompen).

Coëxistentiegebied Het gebied binnen de vloeistof-damplijn waarbinnen twee fasen van dezelfde stof (bijvoorbeeld damp en vloeistof) naast elkaar kunnen bestaan. Buiten dit gebied kan slechts één fase bestaan bij de heersende condities.

Compressievolumeregeling Capaciteitsregeling van een warmtepomp gebaseerd op aanpassen van het compressievolume. De lengte van het actieve deel van de rotor wordt door middel van een schuif geregeld, waar-door slechts een deel van de rotor wordt gebruikt voor koudemiddelcom-pressie. Onder 60% deellast is deze regeling niet efficiënt.

Compressor Eén van de hoofdcomponenten van een gasmotorwarmte-pomp. De compressor zorgt voor het comprimeren van het koudemiddel en het verlagen van de druk aan de zuigzijde, waardoor het koudemiddel-kookpunt verlaagd wordt.

Condensor Warmtewisselaar die wordt gebruikt in warmtepompen. De condensor staat condensatiewarmte van het koudemiddel af aan de omgeving.

Directe expansie Wanneer het koudemiddel als distributiemedium wordt gebruikt en expandeert in de ruimte waarin koeling nodig is, zodat de lucht ter plaatse door het koudemiddel wordt gekoeld.

Distributiemedium Het medium dat warmte of koude transporteert van een ketel of warmtepomp naar de gewenste ruimtes van een gebouw. In Nederland is het distributiemedium (of afgiftemedium) meestal water. In de utiliteitsbouw komt lucht als distributiemedium ook voor. In landen waar koeling belangrijk is (zoals Japan) wordt ook wel het koudemiddel zelf gebruikt voor distributie.

Drogeboltemperatuur Methode om de luchtvochtigheid te bepalen. Hierbij worden twee thermometers in een luchtstroom geplaatst (minimale snelheid 5 m/s). Bij één van de twee thermometers wordt om het kwikre-servoir een katoenen kousje aangebracht dat via een katoenen draad is ver-bonden met een waterreservoir. Het verschil in aangegeven temperatuur is een maat voor de vochtigheid van de luchtstroom.

Economizer Rookgascondensor waarmee het rendement van een gas-warmtepomp verhoogd kan worden.

Expansieventiel of smoorventiel Eén van de hoofdcomponenten van een warmtepomp. Een expansieventiel is een vernauwing in de koudemid-delleiding tussen de condensor (stroomopwaarts) en de verdamper, waar-over een drukval optreedt. Er zijn twee uitvoeringen, het elektronisch en het thermostatisch expansieventiel.

Externe warmtelast Externe warmtebron die een bijdrage levert aan de opwarming van een ruimte. Meestal is dit de zoninstraling. Deze varieert affhan-kelijk van onder meer het moment van de dag en de hoeveelheid bewolking.

Faseovergang Overgang van een stof van de ene naar de andere aggre-gatietoestand, bijvoorbeeld van de vloeibare naar de dampvormige fase.

Generatortemperatuur De temperatuur die een sortiewarmtepomp gebruikt om het koudemiddel uit het mengsel van koudemiddel en sorbent te dampen.

Hoofdregeling Capaciteitsregeling die het vermogen van een installatie afstemt op de warmte- of koudevraag.

HR-ketel Hoogrendementketel; ketel voor centrale verwarming die een hoger rendement haalt dan een gewone CV-ketel. HR-ketels kunnen rendementen halen tot 109% op onderwaarde (bij 30% van het nominaal vermogen, een waterretourtemperatuur van 30 °C en een aanvoertempe-ratuur van 36 °C).

Hunten Instabiele werking van een expansieventiel door te laag inge-stelde oververhitting.

Interne regelkring Verzorgt de onderlinge afstemming van de verschil-lende onderdelen van de warmtepomp.

Interne warmtelast Alle interne warmtebronnen die een bijdrage leveren aan de opwarming van een ruimte, zoals verlichting, computers, televisies en mensen.

Kleplichting Capaciteitsregeling van een zuigercompressor door middel van lichting van de zuigerklep(-pen) tijdens de compressieslag. Daardoor wordt het aangezogen gas gedeeltelijk weer teruggedrukt naar de aanzuigleiding.

Koolwaterstoffen Chemische verbindingen die voornamelijk bestaan uit koolstof (C) en waterstof (H). Voorbeelden zijn aardgas en vloeibare fossiele brandstoffen.

Lagetemperatuursysteem CV-systeem dat is ontworpen voor een temperatuurtraject van bijvoorbeeld 45 °C / 30 °C, aanmerkelijk lager dus dan het gebruikelijke traject van 90 °C / 70 °C.

Lamellenblok Warmtewisselaar die bestaat uit gevinde pijpen die in een blokvorm zijn samengebouwd. Lucht wordt hier geforceerd doorheen gevoerd.

Lucht/waterwarmtepomp Warmtepomp die gebruikmaakt van de buitenlucht als warmtebron en die daarom bijna overal toepasbaar is. Voor de koelfunctie wordt warmte aan de (buiten-)lucht afgegeven.

Luchtfactor (λ) Verhoudingsgetal dat aangeeft hoe het brandstof/luchtmengsel voor een verbrandingsmotor is samengesteld. Voor stoichiometrische verbranding is de luchtfactor $\lambda = 1$.

Luchtvermaat Van luchtvermaat is sprake wanneer aan het brandstof/luchtmengsel voor een verbrandingsmotor meer lucht is toegevoegd dan nodig is voor stoichiometrische verbranding. Voor de luchtfactor geldt bij luchtvermaat: $\lambda > 1$.

Misfiring Van een misfiring is sprake wanneer het brandstof/luchtmengsel in een verbrandingsmotor niet ontsteekt.

Nachtverlaging Het instellen van een lagere ruimtetemperatuur voor de tijd dat een bepaalde ruimte niet wordt gebruikt. In huishoudens gaat de nachtverlaging meestal aan het einde van de avond in. In kantoren kan de nachtverlaging vaak al aan het begin van de avond ingaan.

Natteboltemperatuur Methode om de luchtvochtigheid te bepalen. Hierbij worden twee thermometers in een luchtstroom geplaatst (minimale snelheid 5 m/s). Bij één van de twee thermometers wordt om het kwikreservoir een katoenen kousje aangebracht dat via een katoenen draad is verbonden met een waterreservoir. Het verschil in aangegeven temperatuur is dus een maat voor de vochtigheid van de luchtstroom.

Onderkoeling Verschil tussen condensatietemperatuur en de temperatuur waarmee condens uit de condensator treedt. Door middel van onderkoeling wordt voorkomen dat zich dampbellen in het koudemiddel vormen vóórdat het koudemiddel door het expansieventiel gaat.

Onverbrande koolwaterstoffen Koolwaterstoffen die zich na het verbrandingsproces nog in de rookgassen bevinden.

Ottomotor Veelgebruikt type verbrandingsmotor die werkt volgens het principe van interne verbranding. Genoemd naar Nikolaus August Otto, die het concept in 1862 uitvond.

Oververhitting Verschil tussen de verdampingstemperatuur van het koudemiddel en de werkelijke (hogere) temperatuur van de damp in de verdamper. In de meeste warmtepompen wordt de damp iets oververhit om te voorkomen dat hij vroegtijdig condenseert in de leiding naar de condensor.

Persgascirculatie Capaciteitsregeling waarbij het debiet in de koudecyclus wordt geregeld. Het verplaatste compressorvolume blijft gelijk.

Piekvraag Maximum in de energievraag. De piek in de warmtevraag van een gebouw treedt op bij lage buitentemperaturen en weinig zoninstraling; de piek in de koelvraag treedt op bij hoge buitentemperaturen en veel zoninstraling.

Puls-pauzeregeling Regeling waarbij een apparaat binnen de cyclustijd wordt in- en uitgeschakeld. Het schakelpatroon is afhankelijk van de vraag.

Rendement Nuttige energie gedeeld door de toegevoerde energie.

Retourtemperatuur Temperatuur van het CV-water dat terugkomt van de radiatoren.

Reversibel Omkeerbaar. Een warmtepomp is reversibel als deze door het omkeren van de stroomrichting van het koudemiddel gebruikt kan worden voor zowel verwarmen als koelen.

Rijk Aanduiding van de brandstof/luchtverhouding voor een verbrandingsmotor. Een rijk mengsel bevat verhoudingsgewijs veel brandstof; een arm mengsel bevat relatief veel lucht.

Rijp Ijsafzetting als gevolg van het aanvriezen van waterdamp uit de lucht op een vast oppervlak.

Sankeydiagram Figuur waarin verschillende stromen (bijvoorbeeld van energie) grafisch zijn weergegeven, waardoor de omvang en de richting van de stromen inzichtelijk worden.

Single stage In het geval van een sorptiewarmtepomp geeft 'single stage' aan dat het koudemiddel in de verdamper door het bronmedium wordt verwarmd. Het alternatief is een double stage sorptiewarmtepomp.

Sorbent Middel dat in sorptiewarmtepompen gebruikt wordt en dat het koudemiddel aantrekt.

Stoffenpaar Combinatie van koudemiddel en absorbens/adsorbens, die geschikt is om een sorptiewarmtepomp te laten functioneren.

Stoichiometrische verbranding Verbranding met een luchthoeveelheid die precies genoeg is om de toegevoerde brandstof in een verbrandingsmotor volledig te verbranden.

Stookgrens Hoogste buitentemperatuur waaraan een gebouw nog verwarmd moet worden om een aangename binnentemperatuur te krijgen. Bij veel gebouwen ligt de stookgrens rond 15 °C.

Stooklijn Verband tussen de buitentemperatuur en de benodigde aanvoertemperatuur voor de verwarmingsradiatoren en/of het benodigde verwarmingsvermogen.

Temperatuurcondities Combinatie van gegevens over de temperatuur van de warmtebron en het temperatuurniveau van de warmteafgifte. De temperatuurcondities zijn medebepalend voor het rendement (COP) van de warmtepomp.

Temperatuurlift Temperatuurverhoging of -verlaging (verschil tussen brontemperatuur en afgiftetemperatuur) die een warmtepomp kan bewerkstelligen.

Toerenregeling Capaciteitsregeling gebaseerd op het variëren van het toerental van een motor of compressor. Toerenregeling is mogelijk tot het punt waarop pulsaties van de zuigerbeweging het proces gaan verstoren.

Topkoeling Koeling tot 5 °C onder de buitentemperatuur.

Tussenkoeler Warmtewisselaar die uitwisseling van warmte tussen de verdamper en de condensor mogelijk maakt. Door het gebruik van een tussenkoeler wordt de warmteoverdracht in de verdamper en de condensor verbeterd.

Verdamper Warmtewisselaar die wordt gebruikt in warmtepompen. De verdamper neemt warmte op uit de omgeving en gebruikt deze om het koudemiddel te laten verdampen.

Vierwegklep Klep waarop vier leidingen zijn aangesloten en die twee stromen van elkaar scheidt.

Vloeistof-damplijn Grafiek die de grenzen van het coëxistentiegebied aangeeft.

Water/luchtwarmtepomp Warmtepomp die water gebruikt als warmtebron en lucht als afgiftemedium.

Water/waterwarmtepomp Warmtepomp die water gebruikt als warmtebron en een separaat watercircuit voor de afgifte van warmte of koude.

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: Agentschap NL

Afgeleide eenheden

Naam	Eenheid
Snelheid	v = afgelegde weg / tijd [m/s]
Versnelling	a = snelheid(verandering) / 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 = 1 J/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 = 3.600.000 J = 3,6 MJ (Megajoule)

Bron: Agentschap 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: Agentschap 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, Agentschap 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, Agentschap 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

Lijst van afkortingen en symbolen

CFK Chloorfluorkoolwaterstof. Categorie stoffen die veel gebruikt wordt als drijfmiddel in spuitbussen en als koudemiddel. CFK's zijn schadelijk voor de ozonlaag wanneer ze in de atmosfeer terecht komen en worden om die reden niet meer gebruikt.

CV Centrale verwarming.

COP *Coefficient of Performance*, een maat voor het rendement van een warmtepomp. De COP geeft aan hoeveel eenheden nuttige energie er kunnen worden geleverd met één eenheid betaalde energie (bijvoorbeeld aardgas).

GWP *Global Warming Potential* (broeikaspotentieel). De GWP geeft aan hoe groot het broeikas effect van een stof is ten opzichte van dat van koolstofdioxide (CO₂). Per definitie is de GWP van CO₂ gelijk aan 1.

ODP *Ozone Depletion Potential* (ozonlaag-afbrekend potentieel). Per definitie is de ODP van trichloorfluormethaan (R-11) voor een periode van 100 jaar gelijk aan 1, de ODP van CFK's ligt eveneens rond 1. De ODP van stoffen met broom is met waarden tussen 5 en 15 aanmerkelijk hoger.

$\eta_{\text{mechanisch}}$ Mechanisch rendement, bijvoorbeeld van een gasmotor.

η_{centrale} Rendement van centrale elektriciteitsopwekking.

PER *Primary Energy Ratio*. De PER geeft aan hoeveel eenheden primaire energie (bijvoorbeeld aardgas) nodig zijn om één eenheid warmte te leveren. Aan de hand van de PER kunnen gasgestookte en elektrische warmtepompen beter worden vergeleken op basis van de COP.

W., B., A.. Letter- en cijfercombinatie voor het typeren van warmtepompen. W staat voor water, B voor *brine* (brijn) en A voor *air* (lucht). De waarde achter de letter geeft de (aanvoer)temperatuur van het betreffende medium aan. Doorgaans wordt de combinatie voor de warmtebron eerst gegeven en daarna de combinatie voor het afgiftemedium. Bron en afgiftemedium worden in deze notatie gescheiden door een schuine streep.

Literatuurlijst

Alberts, M., *Gasmotorwarmtepomp vs elektrische warmtepomp*. Groningen: Gasunie Research, 2006.

ASUE, *Heizen und Kühlen mit Gaswärmepumpen 2008*. Duitsland, 2008.

Bouwkennis Jaarrapport 2007/ 2008.

Cijfers & tabellen 2007, SenterNovem.

CBS, *Het energieverbruik voor warmte afgeleid uit de energiebalans*. Den Haag: CBS, 2009.

CBS, *Duurzame energie in Nederland 2007 - 2008*. Den Haag: CBS, 2008.

Dijk, G. van, *Marktpotentieel gaswarmtepompen*. Groningen: Gasunie Research, 2004.

EnergieNed, *Energie in Nederland, 2008*.

Energie Ned, *Europe Ned - Energie in NL, 2007*.

GasTerra, *jaarverslag 2008*. Groningen: GasTerra, 2008.

GasTerra, *Aardgas als transitiebrandstof*. Groningen: GasTerra, 2008.

GasTerra, *Warmte en Kracht*. Groningen: GasTerra, 2008.

Harmsen R., M. Hammerlink, *Duurzame warmte en koude 2008 - 2020*. Utrecht: Ecofys.

IF-technology, *Evaluatie monitoring warmtepompsystemen, Onderdeel B-Studie marktrijpheid warmtepompsystemen*. IF-technology.

Menkveld M., Y. Boenakker, R. Mourik, *Energietransitie in de gebouwde omgeving*. Petten: ECN.

Mobius Consult, *Bepaling aantal utiliteitsgebouwen in Nederland*. Driebergen: Mobius Consult, 2006.

Opstelten I., E.J. Bakker, W. Sinke, F. de Bruijn, W. Borsboom, L. Knosse, *Potentials for energy efficiency and renewable energysources*. Petten: ECN, 2007.

Platform Nieuw Gas, *Gas aan het Werk!, Visiedocument Werkgroep Decentrale Gastoepassingen*. 2007.

NVB, *Thermometer winkels*. 2007.

NVB, *Kantoorgebruikers in profiel*. 2009.

NVB, *Thermometer kantoren*. 2009.

Robur, *Hydronic heating systems with modulating condensing absorption heat pump*. Italië. 2009.

Rooijers. F.J. e.a., *Green4sure, het groene energieplan*. Delft: CE Delft, 2007.

Sanyo, *Gas Heat Pump - M series*. Europe: Sanyo, 2008.

SenterNovem, *Energiezuinige gebouwen met een goed binnenklimaat*. Utrecht: SenterNovem.

SenterNovem, *Kompas, energiebewust wonen en werken*. Utrecht: SenterNovem.

SenterNovem, *Warmte in Nederland*. Utrecht: SenterNovem, 2009.

SenterNovem, *Status warmteproductie*, 2005.

SenterNovem, *EPA-U-Bouw brochure 2008*.

Stratus, *Energiemonitor gebouwde omgeving U-bouwpanel*.

SVEP, *Heat pumps technological and environmental*. Inpact, 2005.

Techniplan, *Marktrijpheid van warmtepompen voor aanscherping*. Techniplan, 2005.

Techniplan Adviseurs, *Studie marktrijpheid warmtepompen*, 2005.

TNO, *Handboek Industriële Warmtepompen*. Delft: TNO.

TNO-MEP, *De concurrentiekracht van warmtepompen in Nederland*. Delft: TNO, 2004.

Wetzelaer B., C. Volkens, *Historische analyse van kosten en opbrengsten van de Nederlandse energievoorziening*. Petten: ECN.

Register

Aanvoertemperatuur 63, 73, 74, 79, 84, 108, 110, 156, 157, 159
 Aardgas 8, 9-11, 13-16, 19, 21, 28, 29, 35, 39, 41, 43, 49, 51, 67-69, 87, 88, 106, 117, 122-126, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148, 153, 154, 158, 161-164, 170
 Absorptiewarmtepomp 27, 28, 40, 46, 55, 56, 58, 59, 65, 68, 70, 89, 105, 106-109, 142, 156
 Additionele energie 155
 Adsorptiewarmtepomp 55, 59, 63, 70, 87, 108, 156, 159
 Afgiftesysteem 23-25, 27, 31, 34, 37, 44, 79-81, 91, 105, 112, 119, 120, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148
 Ammoniak-water 55, 68
 Antivries 89, 91, 107, 156
 Aquifersysteem 138
 Arbeidgedreven 39-41, 44, 53
 Asrendement 93, 154
 ASUE 58, 165
 Basislast 31, 67, 77, 79, 123
 Bedrijfshallen 21, 72
 Bestaande bouw 11, 20, 29, 31, 33, 35, 67, 70, 74, 76, 77, 84, 120, 127, 128
 Betrouwbaarheid 27, 68, 84, 96
 Bijstook 28, 152, 153, 155
 Bijstookvoorziening 78, 153
 Biogas 16
 Bioscoopgebouw 131
 Bivalent 30-32, 41, 77, 78, 131, 154
 Bodembron 24, 25, 27, 30, 84
 Bodemwarmtewisselaar 58, 61, 63, 83, 84, 88, 107, 156
 Broeikasgas 15
 Bronsysteem 82, 83
 Brontemperatuur 42, 56, 78, 89, 156, 159
 Buffer 80-82, 140
 Buitenlucht 21, 24, 37, 41, 43, 67, 82, 83, 89, 101, 107, 132, 134, 136, 140, 142, 144, 146, 148, 158
 Capaciteitsregeling 93-95, 109, 157-159
 Carnotfactor 156
 Carnotrendement 40, 42, 43, 45-47, 50, 52, 88, 89, 95, 156
 Cascade 22, 23, 105, 106, 131, 144, 156
 CE-markering 35
 CO₂-emissie 10, 14, 15, 29, 67, 115, 120
 Collectief systeem 34, 105, 116
 Combiprestatie 152, 155
 Component 42, 44, 46, 48, 94, 123, 140
 Compressiewarmtepomp 41-44, 53, 82, 167
 Compressor 23, 42, 43, 53, 68,-70, 88, 90-92, 94-98, 100, 102, 105, 106, 110, 112, 113, 117, 151, 153, 157, 159, 168, 169
 Condensor 23, 25, 42, 43, 54, 55, 59, 60, 80, 90, 91, 94, 96, 98, 100-102, 109, 113, 117, 151, 157-159

Convector 112, 120
 COP 29, 40-43, 47, 50, 52, 54, 56-58, 61, 63, 64, 68, 69, 88, 89, 92-94, 100, 107, 109, 151-153, 155, 159, 164
 CV-ketel 21-23, 30-32, 35, 37, 59, 79, 117, 120, 134, 136, 140, 146, 157
 Dekkingsgraad 120, 152, 154, 155
 Directe expansie 35, 132, 134, 136, 157
 Distributie 68, 91, 122, 123, 153
 Distributiemedium 157
 Double-effect 57, 107
 Drogeboltemperatuur 157
 Dubbele U-buis 83
 Duurzaam 14, 27, 82, 146
 Economie 8, 13, 19, 20
 Economisch 34, 67, 74, 79, 101, 105, 106, 115, 116, 127
 Economische haalbaarheid 116, 117
 Elektriciteitsnetwerk 31
 Elektrisch gedreven 151
 Elektrische warmtepomp 24, 27-30, 35, 67-70, 72, 74, 84, 89, 91, 94, 115, 136, 152, 153, 163
 Elektronisch expansieventiel 24, 98, 99
 Emissies 14, 15, 28, 43, 92, 93, 161
 EN12309 89
 Energetische prestatie 37, 78, 83, 85, 151, 153
 Energiebesparing 15, 29, 31, 37, 116, 120, 131
 Energiekosten 78, 116, 117, 120-122, 126-128, 136
 Energieprestatie 21, 36, 37, 40, 67, 116, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148
 Energieprijs 117
 Energietransitie 9, 13, 14, 16, 164
 Energievoorziening 8, 13-15, 21, 73, 116, 120, 128, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148, 165, 170
 EPN (Energie Prestatie Normering) 37, 40, 89, 153
 Expansieventiel 24, 43, 90, 92, 96, 98-100, 109, 157, 158, 167, 169
 Exploitatieberekening 124
 Faseovergang 102, 157
 Financiering 127
 Flatgebouwen 131, 138
 Forfaitaire waarde 37
 Functionele prestatietest 85
 Gasgedreven 25, 31, 35, 37, 43, 51, 67, 68, 72, 76, 82, 152, 153, 155
 Gasabsorptiewarmtepomp 24, 27, 28, 32, 37, 56, 58, 59, 69, 70, 89, 106, 107, 117, 131, 138-143

Gasmotor 39, 40-43, 69, 87-90, 92-95, 104, 105, 113, 117, 136, 163
 Gasmotorwarmtepomp 23-28, 35, 37, 68-70, 75, 79, 82, 89-95, 102, 104-106, 108, 112, 117, 121, 131-137, 144-148, 157, 164
 Gasvoorraad 21, 170
 GBS 84
 Gebouwbeheerssysteem 84, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148
 Gebruiksaspecten 84
 Generator temperatuur 89, 157
 Groen gas 9, 11, 16, 21, 67
 Grondwater 37, 41, 42, 82-84, 107, 138
 GWP 102, 152-155, 163
 Hoofdregeling 109, 157
 Hotel 19, 21, 72, 75, 76,
 HR-ketel 10, 19, 22, 29, 35, 63, 87-90, 122, 131, 157
 HRe-ketel 10, 47
 Hunten 100, 157
 Hydromodule 25, 26, 91, 117, 144, 149
 Integraal ontwerpen 70
 Interne regeling 109
 Investeringskosten 24, 78, 115, 121, 127
 Investerings subsidie 121
 Isolatiemaatregelen 15, 146
 Kantoorpand 131, 134, 148, 149
 Kantoren 19-21, 30, 34, 72, 74, 75, 77, 116, 136, 146, 158, 165
 Keurmerk 35
 Koelcapaciteit 27, 30, 112
 Koeling 20-22, 27, 31, 33, 36, 37, 42, 46-50, 52, 54, 56, 58, 60-62, 64, 67, 70-74, 77, 78, 82, 84, 88, 89, 101, 108, 109, 112, 113, 115, 128, 131, 132, 134, 136, 138, 144, 146, 153, 155, 157, 159, 169
 Koolwaterstof 92, 102, 158
 Koudeafgifte 91, 112
 Koudemiddel 24, 42, 43, 53, 55, 62, 68, 79, 89-92, 94, 96, 98, 100-103, 112, 113, 117, 156-159, 163
 Koudevraag 20, 33, 70, 72-79, 105, 109, 144, 146, 157
 Koudwatersystemen 22
 Lagetemperatuurwarmte 44, 88
 Lamellenblok 158
 Lithiumbromide 55, 57, 68, 113
 Lucht/luchtwarmtepomp 24, 25, 102
 Lucht/waterwarmtepomp 25, 102, 106, 158
 Luchtfactor 92, 93, 158
 Luchtondermaat 92

- Luchtvermaat 87, 92, 158
 Mechanische compressor 53, 68, 70
 Methaan 14, 92, 102, 162
 Milieu-effect 28, 120
 Misfiring 92, 158
 Natteboltemperatuur 89, 158
 Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag (NVOE) 82
 Niet-preferent 77, 78
 Nieuwbouw 21, 29-31, 33, 37, 67, 70, 72-75, 77, 110, 115, 120, 127, 148
 ODP 102, 163
 Onderhoud 68, 85, 92, 93, 96, 116, 117, 121, 122, 126-128
 Onderhoud en beheer 117, 127
 Onderhoudskosten 121, 122, 126
 Onderkoeling 100, 102, 158
 Onderwijs 21, 72, 116
 Ontdoeien 91
 Ontwerp 62, 70, 73, 79, 82-85, 89, 91, 92, 108, 109
 Ontwerpaspecten 67, 77
 Ontwerpen 70, 82-84
 Onverbrande koolwaterstoffen 92, 158
 Optimalisatie 83, 102, 108, 109, 128
 Ottomotor 41, 92, 158
 Oververhitting 96, 98, 100-102, 157, 158
 Pendelen 80, 113
 PER 29, 40, 41, 47, 50, 68-71, 82, 88, 89, 106, 120
 PER-waarde 89
 Piekvraag 34, 67, 78, 90, 91, 158
 Potentieel 16, 19, 29, 30, 33, 34, 163
 Preferent 77
 Primary Energy Ratio 29, 40, 88, 153, 155
 Puls-pauzeregeling 111, 112, 158
 Recreatie- en verblijfsindustrie 21, 30
 Referentiegebouw 73-76
 Regeling 23, 24, 78-80, 84, 85, 88, 100, 101, 105, 106, 108-113, 120, 121, 127, 132, 136, 151-154, 157, 158, 161
 Rendement 10, 14, 21, 25, 27, 29, 31, 35, 37, 39, 40, 42, 43, 45-47, 50, 52, 56, 58, 61, 63, 67-70, 79, 80, 82, 87-89, 91-94, 96, 98, 108, 109, 120, 126, 131, 134, 136, 142, 144, 148, 151-153, 156, 157, 158, 163
 Restaurant 21, 72
 Retailsector 31, 76
 Retourtemperatuur 106, 112, 158
 Reversibel 56, 112, 158
 Rijk 83, 90, 159
 Ruimtethermostaat 80
 Sankeydiagram 82, 90, 106-108, 159
 Schakelbuffer 80
 Schoepencompressor 94, 96
 Schroefcompressor 96, 97, 105, 110
 Scrollcompressor 94, 96, 117
 Silicagel 59-62, 113
 Single-effect 57, 107
 Slochteren 13, 21
 Sorbens 53-55, 57, 59, 60, 62, 63
 Sorbent 55, 59, 63, 64, 157, 159
 Sorptieprincipe 87
 Smoorventiel 42, 96, 157
 SPF 151-155
 Sportaccommodatie 21, 72
 Sportschool 131, 136
 Stirlingmotor 44, 46-48
 Stirlingcyclus 44-47
 Stoffenpaar 59, 60, 68, 113, 159
 Stoichiometrische verbranding 158
 Stookgrens 110, 159
 Stooklijn 80, 110, 112, 159
 Supermarkten 76
 Systeemoverzicht 90
 Tandheekkundige kliniek 134
 Tapwater 19, 31, 34, 56, 67, 69, 73-79, 89, 90, 105, 107, 110, 134, 136, 138, 153, 154
 TCO 70, 120, 121, 126, 127
 Temperatuurconditie 50, 89, 159
 Temperatuurlift 42, 46, 58, 60, 102, 109, 140, 159
 Temperatuurniveau 23, 28, 39, 44, 46-48, 50, 54, 57, 68, 72, 74, 79, 82, 87, 90, 105, 107, 120, 159
 Thermisch gedreven 53, 54
 Thermische compressor 68, 70
 Thermo-akoestisch 44, 47-51, 53
 Thermostatisch expansieventiel 98, 99, 157
 Topkoeling 112, 132, 159
 Total cost of ownership 70, 84, 120, 121, 124
 Transitiebrandstof 15, 164
 Tussenkoeler 102, 103, 159
 Utiliteitsbouw 11, 19-25, 27, 29, 31, 36, 56, 67, 73, 84, 91, 92, 105, 113, 115, 116, 120, 121, 122, 127, 157
 Utiliteitssector 20, 21, 23, 31, 34, 57, 73, 116, 117, 127, 128
 Ventilatielucht 89, 107, 131, 132, 134, 136, 148
 Verdampers 42, 43, 53, 54, 56, 59-62, 69, 83, 90-92, 96, 98, 100-103, 109, 113, 117, 151, 157-159
 Verticale bodemwarmtewisselaar 83, 84
 Verwarming 13, 19-22, 24, 27, 29-31, 37, 40, 46, 50, 52, 54, 56, 57, 61, 62, 70-74, 76, 77, 88, 91, 101, 106, 108, 109, 113, 115, 117, 128, 131, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148, 155, 157, 163
 Verwarmingsfunctie 78, 113
 Vloeistof-damplijn 100, 157, 159
 Vloeistofsorptiesysteem 55
 Vloerverwarming 58, 79-81, 106, 112, 131, 140
 Voorbeeldproject 131
 VRF 24, 43, 136
 VRF-systeem 24, 25, 43, 91, 132
 Vrije koeling 82, 84
 Vuilleumier 51, 53
 Warmteafgifte 24, 56, 60, 159
 Warmtebron 21, 61, 67, 82-84, 89, 90, 98, 100, 101, 102, 105, 107, 108, 120, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148, 156, 157-159, 163
 Warmte- en koudeopslag 27, 82, 138, 148
 Warmtekrachtkoppeling 9, 21, 41, 50
 Warmtepomp 19, 21, 23-25, 27-31, 33-37, 39-53, 56, 58-61, 63, 64, 67-72, 74-84, 87-94, 98, 100, 101, 103, 105-112, 115, 117, 120-122, 126, 131, 132, 134, 136, 138, 140, 151-159, 163-165
 Warmteproductiefactor 94, 95
 Warmtevraag 19, 20, 22, 31, 33, 50, 70, 72-77, 80, 105, 106, 109, 110, 120, 126, 140, 154, 156, 158
 Warmtewisselaar 24, 44, 46, 48, 50, 51, 52, 55, 58, 59, 79, 83, 89-92, 98, 101, 102, 109, 113, 136, 157-159
 Water/waterwarmtepomp 102, 106, 159
 Watertemperaturen 34
 Winkelcentrum 77, 131, 144, 145
 Winkels 19, 21, 34, 36, 72, 76, 77, 116, 144, 164
 WKK 21, 40-42, 50
 WKO 27, 74-76, 148
 Zeoliet 59, 62, 63, 113
 Zorgsector 19-21, 30, 73, 116
 Zuigercompressor 94, 96, 110, 157
 Zwembad 19, 21, 27, 29, 72, 131, 136, 140, 142

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 de bevordering van de productie van Nederlands aardgas uit de kleinere gasvelden. Vanuit een klantgerichte houding wordt gestreefd 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.

De wereld van aardgas

De boekenserie 'De wereld van aardgas' is een initiatief van GasTerra, Nederlands grootste handelsbedrijf in aardgas en de derde gasleverancier van de Europese Unie. Deze serie gaat over de betekenis, de toepassingen en de toekomst van aardgas. In deze tijd van complexe discussies over klimaat, energiegebruik, energievoorraden en technische oplossingen wil GasTerra iedereen die geïnteresseerd is op de hoogte brengen van de feiten over aardgas en bijpraten over de meest belangrijke ontwikkelingen op energiegebied.

Gaswarmtepompen

'Gaswarmtepompen - efficiënt verwarmen en koelen met aardgas' is het vierde deel in de serie 'De wereld van aardgas'. Deze uitgave gaat over de inzet van aardgas bij de toepassing van warmtepompen. Gaswarmtepompen zijn bij uitstek geschikt voor moderne klimaatsystemen in bestaande en nieuwe utiliteitsgebouwen. De technologie van gaswarmtepompen is in bijna alle toepassingen bijzonder efficiënt, omdat warmtepompen voor verwarming en koeling nuttig gebruikmaken van omgevingswarmte die anders onbenut zou blijven.

Andere uitgaven in deze serie gaan over aardgas en energietransitie, warmtekrachtkoppeling en de geschiedenis van aardgas in Nederland. Deze eerder verschenen uitgaven zijn op verzoek nog verkrijgbaar.

Kennis is vermogen. Een vermogen dat GasTerra graag wil delen.

ISBN 978-90-79147-10-6



9 789079 147106 >