

Warmte en Kracht

WarmteKrachtKoppeling: een overzicht en leidraad



Warmte en Kracht

WarmteKrachtKoppeling: een overzicht en leidraad

Inhoud

Dit boek is samengesteld en geschreven door Cogen Projects te Dribergen. Cogen Projects is een expertorganisatie op het gebied van WKK en is aangesloten bij de belangenverenigingen Cogen Nederland en Cogen Europe. Naar een idee van GasTerra Communicatie.
Editie: oktober 2008

Auteurs: Peter Goudswaard, Jan Griff, Arjen de Jong, Erik Koolwijk, Stijn Schlatmann, Peter Steenberg, Margot van Gastel en Ina de Visser (allen Cogen projects), Gerard Hoek

Redactie GasTerra: Hans Overdiep, Henk Ensing en Ben Warner

Redactie Castel Mediaproducties: Arnold Assink

Eindredactie Energy Delta Institute: Pieter Overmars

Figuren en illustraties: Cogen Projects, Corbis, Asue, Nuon, Emmtec Services, Capstone Turbine Company, CFC Solutions GmbH, Gas Transport Services, MicroGen, NedStack, Daarderop, MTT, Agfa-Gevaert, Bosbad Putten, Gasterra en Axima Services

Concept en realisatie: Castel International Publishers

Vormgeving: Eldad Groenman en Susanna Kuiper (Castel Media-producties)

© 2008 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 04 5

NUR 600

www.castel.nl

www.cogen.nl

www.cogeneurope.eu

www.cogenprojects.nl

www.energydelta.com

www.gasterra.nl

Ten geleide	6	3.3 Uitwerking en realisatie	76
Voorwoord	8	3.3.1 Het definitieve ontwerp en de aanbesteding	76
Hoofdstuk 1 Visie op aardgas en warmtekracht	11	3.3.2 Regelgeving en vergunningen	78
1.1 Aardgas als nationale brandstof	11	3.3.3 Financiering	84
1.2 Aardgas en decentrale elektriciteitsopwekking	12	3.3.4 Het besluitvormingsproces	86
1.3 De rol van WKK in Nederland	12	3.3.5 Planning en realisatie	86
1.3.1 Centrales en industrie	12	3.4 Beheer en onderhoud	89
1.3.2 De gebouwde omgeving	12	3.4.1 De onderhoudsbehoefte	89
1.4 De toekomstige rol van aardgas	13	3.4.2 Beheervormen	90
Hoofdstuk 2 WKK in Nederland	15	3.4.3 Keuzecriteria voor de beheervorm	91
2.1 WKK als besparing op primaire brandstof	15	3.4.4 De aanbesteding van outsourcing	92
2.2 Aardgas als brandstof voor WKK	18	3.5 Micro-WKK	96
2.3 Voordelen van WKK	19	3.5.1 Stand van zaken anno 2008	96
2.4 De ontwikkeling van WKK in Nederland	20	3.5.2 Technologie	97
2.5 WKK-potentieel in Nederland	21	3.5.3 De inpassing van micro-WKK	103
2.5.1 WKK-potentieel in de glastuinbouw	21	3.5.4 Micro-WKK in de markt	105
2.5.2 WKK-potentieel in de utiliteitsbouw	21	Hoofdstuk 4 Voorbeeldprojecten	109
2.5.3 WKK-potentieel in de industrie	22	4.1 Project Agfa-Gevaert, Mortsel (België)	110
2.5.4 WKK-potentieel in de stadsverwarming	23	4.2 Project Bosbad Putten	113
2.5.5 WKK-potentieel in woningen	23	4.3 Project WKC Emmtec	115
2.5.6 Totaaloverzicht WKK-potentieel tot 2020	23	4.4 Project Micro-WKK	118
2.6 Milieu-effecten van WKK in Nederland	24	4.5 Project WKC De Omval	120
Hoofdstuk 3 Warmtekracht: van concept tot realisatie	27	4.6 Project Energiecentrale UMC Utrecht	123
3.1 Techniek, ontwerp en gebruik	29	4.7 Project Stadsverwarming Amersfoort-Vathorst	126
3.1.1 Conversietechnieken	30	4.8 Project WKK Gebr. de Groot Kwekerijen	129
3.1.2 WKK-ontwerp	44	Bijlage 1 Hydraulische en stoomzijdige inpassing van WKK	133
3.1.3 Gebruiksaspecten	53	Bijlage 2 De groottebepaling van een WKK-installatie	141
3.2 Economische analyse	56	Bijlage 3 WKK en belangenbehartiging	147
3.2.1 Basisprincipe economische analyse	56	Literatuurlijst	148
3.2.2 De exploitatiebaten en -lasten voor WKK	60	Register	149
3.2.3 Benodigde investeringen	65	Corporate statement GasTerra	152
3.2.4 Invloed van de energiemarkt en energiecontracten	68		
3.2.5 Subsidie en fiscale voordelen	72		
3.2.6 Bepaling van de rentabiliteit	73		
3.2.7 Haalbaarheidsberekeningen	73		

Ten geleide

GasTerra is van mening dat aardgas nog tot diep in deze eeuw een hoofdrol zal spelen in de energievoorziening wereldwijd. Deze mening is gebaseerd op feiten en prognoses. Het is een feit dat de fossiele brandstoffen in het huidige tijdsbestek voor 90% of meer in de primaire energiebehoefte voorzien. Het is ook een feit dat van deze fossiele brandstoffen aardgas in het gebruik relatief goede 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 zullen de hernieuwbare bronnen aan aandeel in de voorziening winnen. Prognoses wijzen uit dat het totaalbeeld van vraag en aanbod, van groei en besparing en van de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen bij de huidige kennis van zaken, voor duurzame bronnen halverwege deze eeuw uitkomt op een aandeel van 20 tot 30%. Zelfs bij een nu nog niet voorziene versnelling van het verduurzamingsproces is het duidelijk dat aardgas in deze eeuwhelpt samen met kolen en olie een voorname energiebron zal zijn.

Dit geeft een dubbele verantwoordelijkheid. De bestaande voorziening in aardgas moet op een hoog niveau worden nagestreefd, terwijl er tegelijkertijd met verve aan transitie zal moeten worden gewerkt. GasTerra ziet zichzelf als een expert op aardgasgebied en kijkt vanuit die hoedanigheid naar aardgasgerelateerde transitiemogelijkheden: wat kan zuiniger, schoner en doelmatiger? GasTerra acht het bovendien haar plicht kennis op dit terrein te delen. De energieontwikkelingen raken iedereen: specialist en burger. Discussies en keuzes hebben baat bij goede informatie van alle betrokkenen. Daarom brengt GasTerra de aankomende jaren – los van andere overdrachtvormen – een aantal boeken uit, die deze informatie beschikbaar maken.

‘Warmte en Kracht’ is een boek uit deze serie. De inhoud is samengesteld en geschreven door Cogen Projects te Driebergen, expertorganisatie op het terrein van warmtekrachtkoppeling. GasTerra heeft als opdrachtgever gefungeerd en heeft buiten dit Ten geleide verder geen inhoudelijke bemoeienis gehad, maar kan zich met de inhoud verenigen. Erkentelijkheid jegens Cogen Projects is op zijn plaats voor dit gedegen overzicht, waarvan ik de verwachting uitspreek, dat het zal bijdragen aan de kennis over en toepassing van WKK ter wille van een optimaal energiegebruik.

Gertjan Lankhorst
CEO GasTerra

Voorwoord



Kennis is vermogen. Een vermogen dat GasTerra graag wil delen.

De periode 1800 tot en met 2100 is een tijdvak waarin fossiele brandstoffen volop in gebruik zijn. De mensheid benut al sinds lange tijd aardgas, olie en kolen voor warmte of om te koken. Het echte grootschalige gebruik valt in onze tijd en groeide vanaf het ontstaan van de moderne leefgewoontes en de invoering van de industriële technologie naar piekhoogtes in deze decennia. Tegelijkertijd kunnen we vandaag de dag met redelijke zekerheden in de toekomst kijken als het gaat om de voorraden en het verdere gebruik van de fossiele brandstoffen. Hierdoor beseffen we dat deze voorraden – hoewel zij nog een halve tot een hele eeuw in de toekomst beschikbaar zullen zijn – zullen slinken.

De wereld staat voor de opgave grootschalig nieuwe energiebronnen ter vervanging en opvolging aan te wenden en dan het liefst bronnen die én duurzaam én zo schoon mogelijk zijn, omdat we inmiddels ook dat andere vraagstuk, dat van een mogelijke klimaatverandering, onder ogen hebben gekregen.

GasTerra is gespecialiseerd in aardgas. Vanaf dag 1 van haar bestaan, een bestaan dat begon in 1963 als gevolg van de vondst van het grote Groningenveld (1959). Deze vondst werd in de afgelopen halve eeuw aangevuld in de hoedanigheid van tientallen kleinere velden met een totale grootte van nog eens een half Groningenveld, die al met al een substantieel deel van de Nederlandse aardgasreserves zijn gaan uit maken.

Nederland heeft zich ontwikkeld tot aardgasland, in meer dan één opzicht gebruik makend van deze bodemschat. Aardgas maakte ons land beduidend minder afhankelijk van brandstoffen afkomstig van buiten de EU. En dat zal ook nog voor de komende decennia gelden, want hoewel onze voorraden afnemen, heeft Nederland nog tot voorbij 2030 eigen aardgas.

Nu er in de eerste helft van deze eeuw een fikse transitie naar alternatieve en opvolgende energiebronnen zal moeten worden gemaakt, gaat aardgas een tweede levensfase in. De ontwikkelingsfase en het intensieve gebruik worden opgevolgd door een fase waarin een duurzamer gebruik (bezuiniging en hogerrendementtoepassingen) bijdraagt aan CO₂-vermindering en waarin aardgas bovendien

als startfundament voor de ontwikkeling van vernieuwbare energiebronnen kan worden benut. Bij GasTerra hebben wij een transitiebeleid, waarin we op basis van zaken waar we verstand van hebben, aan die transitie werken.

Voor aardgas is er dus nog voor lange tijd een grote rol weggelegd. In Nederland, in de Europese Unie en op vele plaatsen elders in de wereld. Reden temeer om zoveel mogelijk kennis over aardgas aan zoveel mogelijk mensen beschikbaar te stellen. Zodat zij de feiten over aardgas kennen en de mogelijkheden ervan kunnen benutten.

GasTerra stelt deze kennis, afkomstig uit het bedrijf zelf en van externe deskundigen, in een serie boeken ter beschikking: 'De wereld van aardgas'. Deze uitgave, de tweede in de serie, geeft inzicht in de functie en rol van aardgas bij de toepassing van warmtekrachtkoppeling. Het proces van warmtekrachtkoppeling (WKK) heeft twee duidelijke pluspunten: het energetisch rendement is hoog en WKK-installaties kunnen zowel grootschalig als kleinschalig worden ingezet. Hiermee is WKK bij uitstek ook geschikt als decentraal energievoorzieningssysteem.

Andere uitgaven in de GasTerra-serie 'De wereld van aardgas' gaan over Aardgas en transitie (reeds uitgegeven), de gaswarmtepomp en de geschiedenis van aardgas vanaf 1963 met een vooruitblik naar de verdere inzet in deze eeuw. Beide laatste boeken zullen in 2009 verschijnen.

Gertjan Lankhorst
CEO GasTerra

Hoofdstuk 1

Visie op aardgas en warmtekracht

In de eerste helft van de 20^e eeuw vormden kolen de belangrijkste energiebron c.q. brandstof in Nederland. Van het gebruik van aardgas, veelal in de vorm van stadsgas of kolengas, was nog slechts sporadisch sprake. In 1959 werd in de provincie Groningen nabij Slochteren het tot dan toe grootste gasveld van Europa ontdekt. Deze vondst bracht een ware ommekeer in de energievoorziening van ons land teweeg en leidde tot het besluit om heel Nederland op aardgas aan te sluiten.

1.1 Aardgas als nationale brandstof

In de periode 1965 tot 1980 nam het gebruik van aardgas in Nederland zeer sterk toe. Aardgas werd de nationale brandstof en de belangrijkste energiebron in de Nederlandse woning. In die periode groeide het aandeel van aardgas in de primaire energievoorziening tot 50% van de totale Nederlandse energievraag. Bovendien werd ongeveer de helft van de Nederlandse elektriciteit uit aardgas opgewekt. Het aandeel van kolen in de energievoorziening daalde van bijna 80% in 1950 naar 10% in 2006.

Aardgas veroverde de gehele markt voor verwarming van woningen en gebouwen, en voor een deel ook de markt voor industriële productie van stoom. Niet alleen de beschikbaarheid van deze brandstof zorgde voor dat massale gebruik, ook het feit dat aardgas wat betreft NO_x- en SO₂-emissies verreweg de schoon-

ste fossiele brandstof is, droeg aan die populariteit bij. Aardgas kent in het gebruik daarnaast ook nog eens lagere CO₂-emissies dan de andere fossiele brandstoffen. Zo is de CO₂-uitstoot van aardgas slechts de helft van die van kolen.

De Nederlandse overheid heeft de ambitie om het huidige nationale energiesysteem om te vormen tot een energievoorziening die op basis van zo duurzaam mogelijke bronnen plaatsvindt. Deze overgang vergt veel tijd en investeringen en wordt ook wel aangeduid als het transitietijdperk. In de afgelopen jaren werd er door verschillende organisaties reeds op diverse vlakken hard gewerkt aan de ontwikkeling van een duurzame energiehuishouding. Vergaande energiebesparing en emissiereductie zijn doelstellingen van dit beleid. Alhoewel er in de afgelopen decennia al een flinke efficiencyverbetering bij het gebruik van fossiele brandstoffen

is bewerkstelligd, blijkt deze niet voldoende om de milieudoelstellingen te kunnen realiseren en zeker niet als daar het doel om klimaatverandering tegen te gaan, bijkomt. De doelstellingen van zowel de Nederlandse als de Europese overheid worden steeds duidelijker en pittiger: een absolute reductie van de CO₂-emissie van 20 tot 30% in 2020. Dat is nog niet eens het einddoel, maar een tussenresultaat op weg naar 80 tot 90% CO₂-reductie in de westerse wereld in 2050, waarbij een score van 50% reductie in 2030 als een belangrijk tussenstation wordt aangemerkt.

1.2 Aardgas en decentrale elektriciteitsopwekking

Voor de opwekking van warmte wordt aardgas nagenoeg geheel decentraal toegepast, voor de opwekking van elektriciteit gedeeltelijk decentraal via WKK-installaties en gedeeltelijk centraal in elektriciteitscentrales. Decentrale omzetting van aardgas naar warmte en elektriciteit geniet de voorkeur boven centrale omzetting: het transport van warmte en elektriciteit brengt immers aanzienlijk hogere verliezen met zich mee dan het transport van aardgas. De koppeling van warmte en kracht (WKK) is een zeer efficiënte manier van een gelijktijdige omzetting van aardgas in warmte en elektriciteit. Verdere decentralisatie van dit proces laat grote voordelen zien. Daarom wordt er anno 2008 sterk ingezet op de invoering van kleinere vormen van WKK, namelijk mini-WKK voor utiliteitsgebouwen en micro-WKK voor woningen.

1.3 De rol van WKK in Nederland

1.3.1 Centrales en industrie

Aardgas is, zoals eerder gesteld, de belangrijkste brandstof in de Nederlandse elektriciteitssector geworden. Vooral dankzij een forse efficiëncyverbetering door gebruik te maken van de zogeheten STEG-technologie (SToom- En Gascentrale) heeft aardgas anno 2008 een marktaandeel van 60% in de Nederlandse elektriciteitsproductie. Met een STEG wordt een elektriciteitscentrale bedoeld waarin een tweetal turbines wordt aangedreven. Eén turbine wordt aangedreven door de verbranding van aardgas, de andere door middel van stoom. Deze stoom wordt geproduceerd door water met de warmte van de verbrandingsgassen van de turbine te verhitten in een afgassenketel. Met een STEG kan een rendement van bijna 60% (onderwaarde) worden bereikt en kan flexibel ingespeeld worden op de vraag naar piekstroom. Deze flexibiliteit geeft aardgas in de elektriciteitsproductie een unieke positie voor

de opvang van dagelijkse, reguliere en zelfs onverwachte pieken in de elektriciteitsvraag. De enige technieken die momenteel dezelfde rol kunnen vervullen, zijn waterkracht en flexfuel-centrales waarbij de flexibiliteit op het conto van aardgas als brandstof komt (bron: CE Delft en ECN, 2007). STEG-installaties die naast elektriciteit ook warmte leveren, zijn in feite WKK-installaties. Ook de gasturbine en de gasmotor zijn voorbeelden van WKK-installaties omdat zij zowel elektriciteit als warmte leveren. De gasmotor wordt voornamelijk in de glastuinbouw toegepast.

Voor veel landen is de STEG de eerste keuze als het gaat om nieuwe elektriciteitscentrales. In Nederland wordt op dit moment 40% van de elektriciteit door middel van een STEG opgewekt; voor 90% komt dit op rekening van aardgas (CBS, 2007).

Zoals vermeld worden elektriciteitproducerende installaties op basis van aardgas gekenmerkt door een grote regelbaarheid: gasgestookte (WKK-)centrales kunnen in zeer korte tijd hun productie sterk verhogen. Andere energiebronnen (zoals kolen, olie en kernenergie) kenmerken zich juist door een trage regelbaarheid. Om deze reden wordt verwacht dat de rol van aardgas in de elektriciteitsproductie nog verder toe zal nemen. Daarbij zal de efficiency door een verdere ontwikkeling van STEG- en WKK-systemen (o.a. mini- en micro-WKK) nog verder omhoog moeten worden gebracht.

1.3.2 De gebouwde omgeving

In de gebouwde omgeving valt een aantal ontwikkelingen waar te nemen. Bij huishoudens is er vanaf eind jaren zeventig, ondanks een toename van het aantal woningen, een dalende trend in het aardgasverbruik te zien. Deze daling wordt veroorzaakt door vraagbeperkende maatregelen (woningisolatie), door een sterke rendementsverbetering van CV-systemen (HR-ketel) en de laatste jaren vooral door zachte winters.

Uit onderzoeken, studies en marktprognoses kan worden afgeleid dat de primaire energievraag voor verwarming en warmwatervoorziening in de huishoudelijke sector tot 2030 met zo'n 20% zal afnemen, terwijl het elektriciteitsgebruik in die periode bijna tot ruim 55% verdubbelt. Deze forse toename van het primaire energiegebruik voor elektriciteit wordt enerzijds veroorzaakt door een stijging van het gemiddelde gebruik per huishouden en anderzijds

door een toename van het aantal huishoudens. Het aantal elektrische apparaten groeit niet alleen als gevolg van verdere uitbreiding van het aantal tv-toestellen en pc's per huishouden, maar ook doordat steeds meer apparaten op elektriciteit werken en er meer eisen aan comfort, bijvoorbeeld op het gebied van koeling, worden gesteld.

Een micro-warmtekrachtinstallatie, ook wel HRe-ketel genoemd, is een ontwikkeling die inspeelt op dit toenemende elektriciteitsgebruik. Een micro-WKK is een HR-combiketel die zowel warmte als elektriciteit produceert. Doordat er aanzienlijk minder elektriciteit van het elektriciteitsbedrijf gekocht hoeft te worden, wordt besparing gerealiseerd. Grote elektriciteitscentrales kunnen de laagwaardige warmte niet gebruiken en hebben zodoende een lager rendement dan WKK-installaties. De elektriciteit wordt met een HRe-ketel in de woning met een twee keer zo hoog rendement als dat van een moderne STEG (na aftrek van transportverliezen) opgewekt. Zo kan er een emissiereductie tot wel 1.000 kilogram CO₂ per jaar per woning worden bereikt.

De ontwikkeling van de HRe-ketel is snel gegaan. De ontwerpperiode en de testfasen in laboratoria zijn achter de rug en er zijn volop praktijkproeven in het veld gaande. Steeds meer ketelfabrikanten werken met prototypes of zijn intensief bezig met de ontwikkeling ervan. Op dit moment (2008) zijn er verschillende technologieën voor de HRe-ketel: de Stirlingmotor, de ORC (Organic Rankine Cycle), de gasmotor, de gasturbine en de brandstofcel. Elk van deze technologieën bevindt zich in een andere fase van ontwikkeling. De Stirlingmotor voor compacte integratie met een HR-ketel lijkt vooralsnog het verst gevorderd. Aangezien een HRe-ketel stroom produceert op basis van de warmtevraag in een woning, is deze ketel minder geschikt voor woningen met een lage warmtevraag, zoals de moderne nieuwbouwwoning. De brandstofcel, die nog volop in ontwikkeling is, wordt vanwege de gunstige verhouding tussen warmte en kracht wel als een geschikte technologie voor de nieuwbouw gezien.

1.4 De toekomstige rol van aardgas

In Nederland is de energievoorziening voor een belangrijk deel gebaseerd op het gebruik van aardgas en dat aardgas wordt steeds efficiënter ingezet. De inrichting van een duurzame energievoorziening zal nog veel tijd en inspanningen op velerlei gebied en

van veel instellingen, organisaties en instituten vergen. De eisen worden hoger en aardgas kan aan deze eisen voldoen.

In de voor ons liggende tijd kan aardgas deze belangrijke rol vervullen omdat gas als een relatief schone fossiele brandstof met een hoog omzettingsrendement kan worden gebruikt. Meer dan enig ander land in de EU beschikt Nederland over voldoende gasreserves om, in combinatie met de import van aardgas, deze brandstof nog decennialang een prominente rol in de energievoorziening te blijven laten spelen. Door de ontwikkeling van nieuwe of verbeterde energiesystemen en -technieken en door aardgas nog efficiënter in te zetten kunnen de nationale aardgasreserves langer mee, terwijl er bovendien emissiereductie wordt gerealiseerd. In dat kader zijn er nieuwe technieken in ontwikkeling, zoals gasgedreven warmtepompen, koelmachines op gas, STEG-systemen en HRe-ketels. Daarnaast kan aardgas een nuttige, aanvullende rol spelen bij duurzame energievormen waaronder zonne-energie, windenergie en biogas. Het is goed mogelijk om biogas (afkomstig van vergisting en vergassing) aan aardgas toe te voegen, waardoor aardgas een nog schonere brandstof wordt. Maar de inpassing van duurzame bronnen verlangt van aardgas in de nabije toekomst een andere, nog flexibelere, rol. Aardgas is uitermate goed in staat om die rol te kunnen vervullen en is hiermee de transitiebrandstof bij uitstek.

Mede via import (zowel in gasvormige als vloeibare vorm) en door toevoeging van biogas zal aardgas nog vele decennia een belangrijke rol in de energievoorziening spelen. In dat kader kan warmtekrachtkoppeling als zeer efficiënte conversietechnologie tot zeker 2050 worden ingezet voor het genereren van warmte en elektriciteit. ■

Hoofdstuk 2

WKK in Nederland

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de rol van WKK in de verschillende sectoren in Nederland, de achtergronden daarvan en het potentieel dat er nog voor verdere toepassing van WKK is. Ook worden de milieuvoordelen van WKK, zoals CO₂-reductie en een lagere NO_x-emissie, in kaart gebracht.

2.1 WKK als besparing op primaire brandstof

Vrijwel alle bedrijven en gebouwen hebben een energiebehoefte die uit zowel een elektriciteits- als een warmtevraag bestaat. Deze elektriciteit en warmte zullen ergens vandaan moeten komen en traditioneel is dat in Nederland uit primaire energiebronnen zoals aardgas, olie en kolen. Warmte komt bijvoorbeeld vanuit een ketel op aardgas, en elektriciteit vanuit het elektriciteitsnet. Deze elektriciteit komt op haar beurt weer uit een elektriciteitscentrale waarin primaire brandstof verbrand en omgezet wordt (figuur 1, blz. 17). Er bestaat echter een alternatief waarmee veel energie kan worden bespaard, namelijk de koppeling van warmte en kracht.

Warmtekrachtkoppeling, of kortweg WKK, is in feite niet meer dan een handige conversiemethode waarmee primaire energie op efficiënte wijze wordt omgezet in warmte en elektriciteit. Voor

de 'kale' elektriciteitsproductie in bijvoorbeeld een elektriciteitscentrale wordt brandstof omgezet in hogetemperatuurwarmte. Deze doorloopt vervolgens een omzettingsproces waarmee elektriciteit wordt geproduceerd, om ten slotte als laagtemperatuurwarmte het proces te verlaten.

De wetenschapper Carnot wist in 1825 al dat deze omzetting van warmte naar elektriciteit fysisch gelimiteerd is. Om die reden zullen grote elektriciteitscentrales altijd een flink deel van de energie, 40 tot 60%, in de vorm van laagwaardige warmte naar de omgeving 'wegkoelen'. Dit wegkoelen gebeurt met rivier- of zeewater of aan de lucht met grote koeltorens. Door de grote vermogens waar het hierbij om gaat, kan dit problematische vormen aannemen, bijvoorbeeld in situaties met hoge temperaturen van rivierwater.

Met een WKK-installatie wordt primaire brandstof, vergelijkbaar met de 'normale' elektriciteitsproductie, ook via verbranding omgezet in hogetemperatuurwarmte en vervolgens in elektriciteit. Het verschil is dat bij WKK-installaties de warmte op een iets hoger temperatuurniveau aan het proces wordt onttrokken, zodat deze nuttig ingezet kan worden. Dus niet als koelwater van 30 °C, maar bijvoorbeeld als CV-warmte op 90 °C of als stoom (bijvoorbeeld 10 bar, 180 °C). Het verlies aan energie neemt af tot 10 á 15% en de totale benutting van energie loopt op tot 85 á 90% (figuur 2).

Zeker bij de grotere installaties verschilt de techniek van warmtekrachtkoppeling niet veel van die van een elektriciteitscentrale, alleen de locatie en de schaalgrootte zijn anders. De WKK-installatie staat meestal opgesteld bij de warmteafnemer en is in capaciteit afgestemd op de behoefte van de afnemer. Een elektriciteitsoverschot kan eventueel worden teruggeleverd aan het net, terwijl een tekort kan worden ingekocht. Bij lokaal gebruik van elektriciteit worden daarbij ook nog de transport- en transformatieverliezen in het elektriciteitsnet vermeden. Deze kunnen enkele procenten bedragen en verminderen in het algemeen de behoefte aan netcapaciteit.

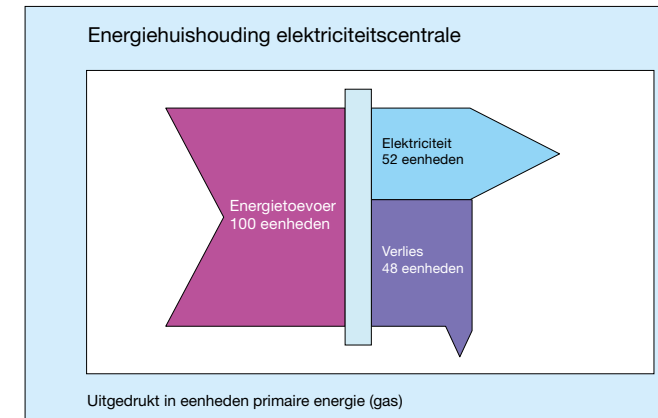
Het principe van de energiebesparing met WKK is in figuur 3 weergegeven, waarbij als referentie een elektriciteitscentrale en een ketel op aardgas is genomen. In dit getallenvoorbeeld komt de energiebesparing, gebaseerd op primaire energie (bijvoorbeeld aardgas), uit op 25%. Afhankelijk van de referentie en de toegepaste WKK-technologie varieert de besparing doorgaans tussen de 15 en 35%.

De emissie van het broeikasgas CO₂ is inherent aan de verbranding van fossiele brandstoffen, dus ook aan aardgas. WKK echter, reduceert de emissie van CO₂, omdat er netto fossiele brandstof wordt bespaard. Als WKK vergeleken wordt met een referentie op basis van aardgas, dan is het reductiepercentage gelijk aan het besparingspercentage. Wordt WKK vergeleken met de brandstofmix in Nederland, dan is de besparing groter omdat de gemiddelde emissie in Nederland hoger ligt. Zo komt WKK gemiddeld uit op 230 g CO₂/kWh (de CO₂-reductie is hierin volledig toegerekend aan elektriciteit) en een elektriciteitscentrale op aardgas op 360 g CO₂/kWh, terwijl het gemiddelde centralepark in Nederland op 500 g CO₂/kWh uitkomt. Een goede inpassing van een WKK-installatie is

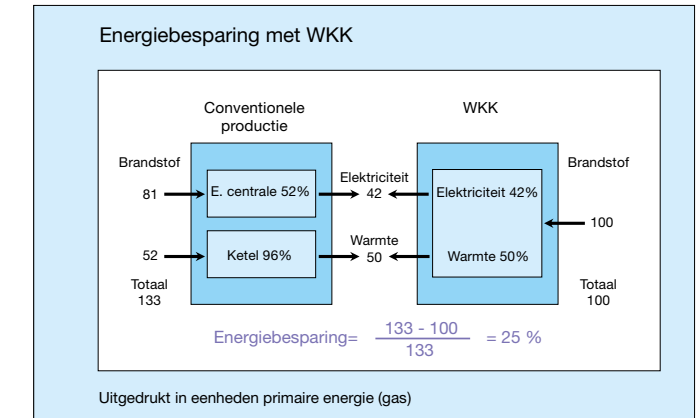
van belang voor een hoge besparing op het energiegebruik en de energiekosten. In de dimensioneringsfase van een WKK-installatie moet terdege rekening worden gehouden met de ontwikkeling van de toekomstige warmte- en elektriciteitsvraag van de beoogde afnemer, bijvoorbeeld met mogelijke besparingen in het bedrijfsproces zelf. Hierbij dient de 'Trias energetica' gevolgd te worden. Dat wil zeggen eerst energie besparen in het proces zelf, dan zo veel mogelijk met duurzame bronnen in de energiebehoefte voorzien en tenslotte primaire energie zo zuinig en efficiënt mogelijk gebruiken. De keuzes in de verschillende stappen van de trias energetica hebben invloed op elkaar. Hoewel de stappen afzonderlijk worden beschreven is het een integrale benadering. WKK bevindt zich daarbij in de buitenste schil van dit model (figuur 4).

Ook veel toepassingen van duurzame energie kunnen met WKK gecombineerd worden om zo tot een zo hoog mogelijk conversierendement te komen. Gaat het bijvoorbeeld om de toepassing van biomassa voor elektriciteitsproductie, dan kan deze beter in een 'bio-WKK -installatie' plaatsvinden. Hetzelfde geldt voor de toepassing van waterstof voor de elektriciteitsproductie in een brandstofcel. De dimensionering van WKK-installaties wordt in het volgende hoofdstuk nader besproken.

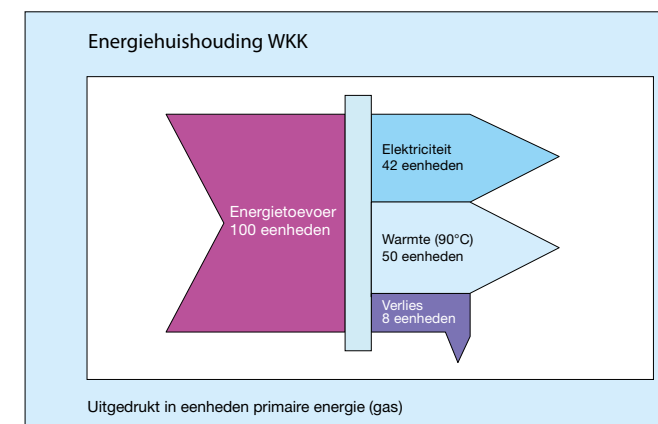
Combinaties van WKK-installaties met warmtepompen zijn goed mogelijk. Met een warmtepomp wordt omgevingswarmte naar een hoger (nuttig) temperatuurniveau 'gepompt'. Een warmtepomp gebruikt elektriciteit als aandrijfkraft. Energetisch gezien zou een warmtepomp gevoed moeten worden met elektriciteit uit een WKK-installatie. Omgekeerd zou er geen warmte geleverd moeten worden door een ketel maar door een WKK-centrale of door een warmtepomp. Voor ruimteverwarming vullen WKK en warmtepompen elkaar qua belasting goed aan. Bij 100% warmtelevering door een WKK-installatie moet een woonwijk met een extra zwaar elektriciteitsnet en transformatorstation worden uitgerust om alle opgewekte elektriciteit af te kunnen voeren. Op dezelfde wijze zou een woonwijk met 100% warmtelevering door warmtepompen eveneens met een extra zwaar elektriciteitsnet uitgerust moeten worden om in de elektriciteitsvraag van de warmtepompen te kunnen voorzien. Een optimale combinatie van WKK en warmtepompen voorkomt verzwaring van het net en het trafostation in zo'n wijk en leidt daarmee tot de meest efficiënte conversie vanuit primaire brandstof.



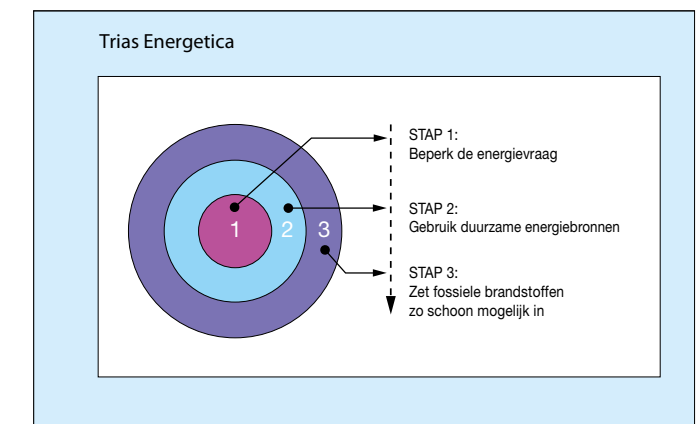
Figuur 1 Schema energiehuishouding elektriciteitscentrale



Figuur 3 Principe van energiebesparing met WKK



Figuur 2 Schema energiehuishouding WKK-installatie



Figuur 4 Principe van de Trias Energetica

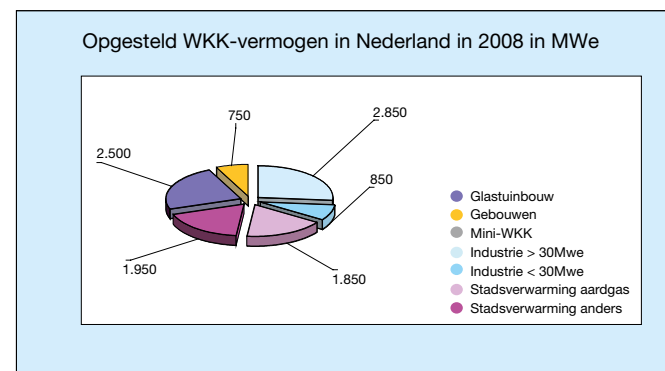
2.2 Aardgas als brandstof voor WKK

WKK als conversietechnologie is in principe brandstof-onafhankelijk. In Nederland echter wordt het overgrote deel van WKK toegepast voor aardgasconversie. Van de totaal ruim 11.000 MWe aan WKK in 2007 bestaat ongeveer 1.950 MWe uit installaties op basis van kolen of afval.

Hieronder volgt een overzicht van het opgestelde vermogen per 1 januari 2007:

Opgesteld vermogen per 1 januari 2007		
Industriële WKK (> 30 MWe)	2.850 MWe	(aardgas)
Industriële WKK (< 30 MWe)	850 MWe	(aardgas)
Stadsverwarming o.b.v. aardgas	1.850 MWe	(aardgas)
Stadsverwarming anders	1.950 MWe	(kolen/afval/reststromen)
Gasmotoren in de glastuinbouw	2.500 MWe	(aardgas)
Gasmotoren in gebouwen	750 MWe	(aardgas)
Hiervan is circa 500 MWe < 300kWe, oftewel mini-WKK		
Totaal vermogen WKK	10.750 MWe	
Totaal vermogen WKK op aardgas	8.800 MWe	

Tabel 1 Opgesteld vermogen per 1 januari 2007



Figuur 5 Opgesteld WKK-vermogen in Nederland

Het grote aandeel van aardgas in WKK hangt natuurlijk samen met het algemeen wijdverbreide gebruik van deze brandstof in Nederland. Vrijwel alle gebouwen en industrieterreinen zijn voorzien van een aansluiting op het aardgasnet, dit in tegenstelling tot andere landen. Toepassing van andere brandstoffen zoals stookolie of kolen is in Nederland sterk ontmoedigd. Bovendien blijkt aardgas een uitstekende brandstof te zijn voor de meeste WKK-technologieën.

De voordelen van aardgas zijn groot en talrijk. De belangrijkste hiervan zijn:

- Aardgas is vrijwel overal beschikbaar.
- Aardgas heeft een uiterst hoge betrouwbaarheid, een factor hoger dan bijvoorbeeld elektriciteit of brandstof die over de weg wordt aangevoerd.
- Er hoeft geen bovengronds transport (via weg of water) plaats te vinden.
- Er is geen opslag benodigd.
- Aardgas is een flexibele brandstof, die makkelijk in (deel-)processen (bijvoorbeeld bijstookbranders) toegepast kan worden en met andere brandstoffen (bijvoorbeeld restgas of gas uit waterzuivering) kan worden gecombineerd.
- Aardgas is ook goed toepasbaar in kleinschalige installaties met een hoog rendement (gasmotoren/turbines).
- Aardgas is een schone brandstof, met een moderne brander-technologie en een lage NO_x-emissie.
- Aardgas is veilig en geniet een hoge mate van acceptatie.

Juist de installaties met de hoogste rendementen zijn aangewezen op een hoogwaardige brandstof zoals aardgas. Dat geldt voor grote installaties, maar vooral ook voor de kleinere installaties in de gebouwde omgeving; daar zal de vergunningverlener zeker geen andere brandstof meer toestaan.

In de glastuinbouw is aardgas voor WKK-installaties essentieel omdat de rookgassen zodanig schoon moeten zijn dat deze toegevoerd kunnen worden in de kas. De planten gebruiken de CO₂ uit de rookgassen voor de groei. Deze toepassing heet daarom ook wel CO₂-bemesting. De rookgassen moeten dan dermate schoon zijn dat deze geen schade voor mensen of planten opleveren. Hiervoor is wel een additionele reiniging van de rookgassen noodzakelijk.

Nadelen van aardgas zijn de onzekere prijsvorming c.q. de koppeling van de marktprijs aan de olieprijs én de beschikbaarheid van gas op lange termijn. De invloed van een onzekere prijsvorming van aardgas is voor WKK echter beperkt, omdat het veel meer gaat om de verhouding tussen de elektriciteitsprijs (de opbrengst) en de gasprijs (de kosten), oftewel de 'sparksread' (zie het volgende hoofdstuk). De beschikbaarheid van aardgas wordt wel eens als risico voor de toekomst genoemd. Dit ligt echter genuanceerd, zoals in het vorige hoofdstuk is aangegeven en ook beschreven wordt in het boek 'Aardgas als transitiebrandstof', uitgegeven door GasTerra in juli 2008.

2.3 Voordelen van WKK

De gebruiker van WKK wil het energiebesparingsvoordeel meestal vertaald zien in een kostenvoordeel. Daar staat een aanzienlijk hogere investering tegenover ten opzichte van de 'referentiesituatie', waarin er alleen van een investering in een ketel sprake is. De meerinvestering van de WKK-installatie zal terugverdiend moeten worden met de besparing op energiekosten, al dan niet met de opbrengst van levering aan derden. De netaansluiting is in beide situaties gelijk of in het geval van WKK iets groter doordat de productie de vraag overstijgt.

Naast het kostenvoordeel spelen er ook andere voordelen van WKK voor de gebruiker mee, zoals:

- Energie- en kostenreductie.
- Energiehandel (Flexibel / PV-vermogen).
- CO₂-reductie (meerjarenafspraken / emissiehandel).
- Eigen opwekking en daarmee een lagere afhankelijkheid van de inkoop uit elektriciteit uit het net of stoom van derden.
- Een hogere beschikbaarheid in combinatie met het net.
- Een eventuele functie als noodstroomvoorziening.
- Eventuele extra voordelen door procesintegratie.
- Meer flexibiliteit (verkopen, inkopen, eilandbedrijf).
- Een goed imago (maatschappelijk verantwoord ondernemen).

Naast kostenbesparing kunnen exploitanten van WKK-installaties door flexibel vermogen aan te bieden op de markt, voordelen in de energiehandel behalen. De installaties kunnen bijvoorbeeld ingezet worden op de spotmarkt (APX) of door partijen met een Programma Verantwoordelijkheid voor de productie van regelvermogen (PV). Ook kunnen er voordelen worden behaald door de

reductie van de CO₂-uitstoot. Hierbij speelt echter de allocatie van CO₂ mee, waardoor dit voordeel niet of slechts gedeeltelijk tot zijn recht komt. Een tweede effect van emissiehandel is de stijging van de marktprijs van elektriciteit als gevolg van emissiehandel in CO₂. Dit is een effect waar alle opwekkers met een besparing op CO₂ (WKK én duurzame opwekkers) voordeel van kunnen hebben.

Voor veel bedrijven spelen er ook andere dan (directe) financiële argumenten een rol. Het verhogen van de beschikbaarheid van elektriciteit ten opzichte van afname uit het elektriciteitsnet en de mogelijkheid voor noodstroomvoorziening zijn belangrijk voor de energie-intensieve industrie en bijvoorbeeld ziekenhuizen. Of er door de WKK-installatie meer flexibiliteit bereikt kan worden, hangt sterk af van de inpassing en toepassing van de installatie. Flexibiliteit is in de huidige energiemarkt een belangrijk middel om de inkomsten te verhogen of om de energiekosten te verlagen.

Een WKK-installatie heeft ook nadelen voor de exploitant. Zo is er een hogere investering vereist en is er meer geschoold personeel nodig voor bediening en onderhoud. Dit kan soms gecompenseerd worden door het 'outsourcen' van de installatie (zie ook hoofdstuk 3). Daarnaast neemt de installatie meer ruimte in en wordt er een hoger beslag op de milieuruimte (geluidsemissies en extra emissie van bijvoorbeeld NO_x, e.d.) gelegd. Dit laatste speelt vooral een rol bij nieuwbouw van WKK op bestaande locaties. Dan treedt er een knelpunt op als de grenzen van de ruimte die de milieuvergunning biedt voor geluid, NO_x, etc. al bereikt zijn. In technisch en organisatorisch opzicht wordt de installatie dan bovendien complexer dan in de referentiesituatie. Dit betekent dat er altijd een zekere drempel voor ondernemingen zal zijn om in WKK te investeren. Het economische voordeel van WKK zal duidelijk aantoonbaar en structureel moeten zijn om de meerinvestering te kunnen verantwoorden.

Voor de totale Nederlandse samenleving biedt de toepassing van WKK voordelen die het algemeen belang dienen. De belangrijkste daarvan zijn energiebesparing, CO₂-reductie, meer flexibiliteit (regelvermogen, PV), geen warmtelozing (knelpunt voor rivieren), minder elektriciteitstransportverliezen en -kosten, versterking van de stabiliteit van het elektriciteitsnet en een verhoging van de betrouwbaarheid van de elektriciteitsproductie doordat er meer productie-eenheden op verspreide locaties zijn.

Zonder de energiebesparing en CO₂-reductie door WKK is het op korte termijn niet mogelijk om de nationale beleidsdoelstellingen te halen. Daarnaast is het flexibele vermogen van een WKK-installatie van groot belang om schommelingen die in het elektriciteitsnet ontstaan door onvoorspelbaar en slecht regelbaar windvermogen, op te vangen. WKK kan dit regelvermogen bieden, al staan daar wel extra investeringen tegenover zoals (grotere) warmtebuffers, een hulpketel of aanpassingen aan de WKK-installatie. Deze investeringen moeten dan wel weer kunnen worden terugverdiend.

Een punt van aandacht voor de elektriciteitsnetbeheerder is de vermogensregeling en de bewaking van het midden- en hoogspanningsnet. Door het toepassen van moderne, anticiperende en communicatietechnologieën wordt het elektriciteitsnet bewaakt en op kwaliteit gehouden. WKK-eenheden die groter zijn dan 5 MWe moeten bij TenneT, de netbeheerder van het hoogspanningsnet, worden gemeld om zo de controle op het elektriciteitsnet veilig te stellen. Ook moeten dergelijke WKK-eenheden de beschikbaarheid op uurbasis aan TenneT doorgeven, zodat dit bedrijf de beschikbaarheid van het vermogen kan bewaken.

Omdat nieuwe WKK-installaties op aardgas of biogas tegenwoordig op plaatsen worden toegepast waar vroeger nooit rekening met de technische opzet van het elektriciteitsnet gehouden is, ontstaan er op deze onverwachte plaatsen technische knelpunten voor het transport van elektriciteit. De technische oplossing van deze knelpunten vergt de nodige tijd en soms grote investeringen. Het gaat hierbij om een kortetermijnprobleem dat door netuitbreiding en/of netverzwaring opgelost kan worden. Op de lange termijn is het voor de ontwikkeling van zowel decentrale WKK als voor duurzame opwekkers van belang dat het elektriciteitsnet voor deze technologieën is ingericht. In het algemeen vermindert een goed gespreide toepassing van WKK weerstands- en transformatieverliezen en wordt er in veel gevallen netverzwaring voorkomen.

2.4 De ontwikkeling van WKK in Nederland

In het begin van de vorige eeuw was er bij gebrek aan een sterk en betrouwbaar elektriciteitsnet een groot aantal eigen opwekkers van elektriciteit. Veel industriële bedrijven wekten toen hun eigen 'kracht' op, soms zelfs met directe aandrijving van machines door

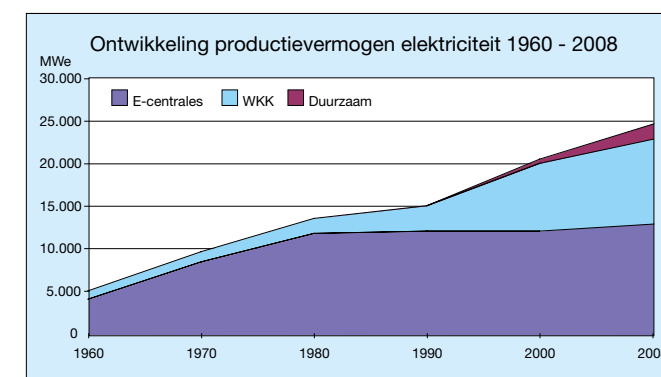
middel van stoommotoren of -turbines. Ook kon dan met de opgewekte stoom verwarming plaatsvinden. Het was vervolgens een kleine stap om met tegendrukturbines lagedrukstoom uit hoge druk en tegelijkertijd elektriciteit te produceren. Dit concept vinden we tot op de dag van vandaag veel terug in zuivel-, suiker-, bier- en zoutindampfabrieken. Destijds werd er naast de industriële WKK alleen in de stad Utrecht restwarmte uit een elektriciteitscentrale voor stadsverwarming benut. Pas na 1945 werd bij de wederopbouw van Rotterdam ook daar een stadsverwarmingsnet aangelegd.

In de jaren zeventig begonnen gasturbines, als afgeleide van straalmotoren voor vliegtuigen, door te breken als aandrijving voor generatoren. De turbines werden gecombineerd met conventionele elektriciteitscentrales – eerst als voorschakeling voor bestaande centrales ('de combicentrale') en later als volwaardige SToom- En Gasturbinecentrale (STEG-centrale, zie hoofdstuk 3). In de jaren zeventig en tachtig werd op veel plaatsen in Nederland stadsverwarming gerealiseerd op basis van dit type centrale: in totaal 42 verschillende stadsverwarmingsnetten. Ook in de industrie werden er vanaf de jaren tachtig in toenemende mate WKK-installaties gebouwd. Het echte 'gouden tijdperk' voor WKK brak echter aan in de jaren negentig van de vorige eeuw (zie ook de groei in figuur 6).

Door een samenloop van diverse factoren kon het WKK-vermogen zich in alle sectoren sterk ontwikkelen. De opkomst in de gebouwde omgeving en in de glastuinbouw bijvoorbeeld werd technisch mogelijk gemaakt door de komst van WKK op basis van aardgasmotoren. Naast technologieontwikkeling was de elektriciteitswet van 1989 een belangrijke, politiek-economische factor waardoor het voor distributiebedrijven mogelijk werd om eigen vermogen te produceren en gas- en elektriciteitsbedrijven te bundelen. Ook speelde het stimuleringsbeleid een belangrijke rol en werd de mogelijkheid ontdekt om door 'joint ventures' WKK-installaties door middel van 'off balance'-financiering te realiseren. De beleidsmakers hadden veel aandacht voor WKK en via meerjarenafspraken (MJA's) en het Milieueactieplan (MAP) werd deze technologie dan ook sterk gestimuleerd. In figuur 7 is de ontwikkeling van WKK vanaf 1987 tot heden aangegeven.

Na de stormachtige groei van WKK in de jaren negentig trad er vanaf 2000 stagnatie op. De belangrijkste oorzaak hiervan was de liberalisering van de elektriciteitsmarkt, waarbij de vaste vergoeding voor teruggeleverde elektriciteit kwam te vervallen en de marktprijs van elektriciteit daalde. Ondanks de lage gasprijs in die jaren bleef de opbrengst van WKK door het verschil tussen de opbrengst uit elektriciteit en de kosten voor aardgas (de 'sparksread', zie hoofdstuk 3) gering. WKK-installaties konden maar nauwelijks op marginale kosten rendabel draaien en er was geen gunstig klimaat voor investeringen. In de daluren draaiden veel installaties dan ook met een negatieve marge en werden, indien mogelijk, stilgezet. WKK-installaties waarvan de economische levensduur was verstreken, werden niet meer door nieuwe installaties vervangen.

Vanaf midden 2005 is er weer een positieve trend in de ontwikkeling van WKK-vermogen zichtbaar. Vooral de gasturbines in de glastuinbouw lieten een sterke stijging zien, van 1.000 MWe in 2005 tot circa 2.750 MWe begin 2007. Deze trend laat zich verklaren door een sterk toegenomen resultaat uit de verkoop van elektriciteit tijdens het dagplateau, ondanks de hoge gasprijs. Bij deze marktprijzen werden investeringen weer rendabel. De rentabiliteit werd bovendien versterkt door de benutting van CO₂ en door opslag van warmte in buffers, waardoor er op de elektriciteitsmarkt flexibel vermogen kon worden aangeboden. Anno 2008 is er ook in de gebouwde omgeving en in de industrie een hernieuwde aandacht voor WKK merkbaar die ook in deze sectoren tot een nieuwe groei van het vermogen kan leiden.



Figuur 6 Groei van het totaal opgestelde vermogen in Nederland (centraal vermogen, WKK en duurzaam)

2.5 WKK-potentieel in Nederland

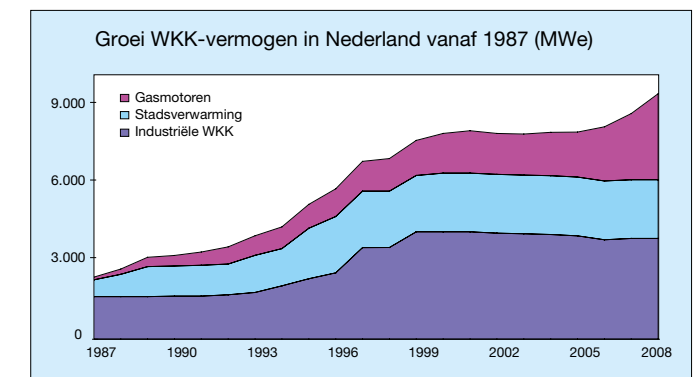
Het potentieel van WKK in Nederland kan op basis van de nu bestaande technieken over vier verschillende sectoren verdeeld worden, namelijk de glastuinbouw, de utiliteitsbouw, de industrie en stadsverwarming. Door de ontwikkeling van micro-WKK kan hier een vijfde sector aan worden toegevoegd, namelijk die van de individuele woningen. In de volgende paragrafen wordt per sector een inschatting van het potentieel voor WKK tot 2020 gegeven. Hierbij is de methode gehanteerd waarbij eerst het technisch potentieel bepaald wordt en er vervolgens een inschatting wordt gemaakt van het deel daarvan dat in 2020 realiseerbaar is, waarbij rekening is gehouden met reeds geplaatst vermogen, concurrerende technologieën, benodigde bouwtijd, adaptatie, etc.

2.5.1 WKK-potentieel in de glastuinbouw

De sterke groei van WKK in de glastuinbouw zal zich als gevolg van verzadiging de komende jaren niet verder doorzetten. Uitgaande van een opgesteld vermogen van 500 kWe per hectare bij energie-intensieve teelt en een beschikbaar areaal van 6.000 tot 7.000 hectare zal het WKK-vermogen zich uiteindelijk op ongeveer 3.500 MWe stabiliseren. Dit is een toename van circa 1.000 MWe ten opzichte van de huidige situatie, waarbij er per 1 januari 2008 2.500 MWe is opgesteld. Dit is weergegeven in figuur 8, blz. 22.

2.5.2 WKK-potentieel in de utiliteitsbouw

Anno 2008 staat er zo'n 750 MWe aan WKK-vermogen in vooral de grotere gebouwencomplexen zoals ziekenhuizen, universiteits-



Figuur 7 Groei van het WKK-vermogen in Nederland (excl. kolen en afvalverbranding)

gebouwen en winkelcentra opgesteld. Deze WKK-installaties zijn bijna altijd op gasmotoren gebaseerd. Hiervan bestaat ruim de helft uit installaties die kleiner zijn dan 300 kWe.

In Nederland wordt in totaal ± 700 PJ (Petajoule) aan laagwaardige warmte gebruikt (< 100 °C), waarvan ± 180 PJ in de utiliteitsbouw plaatsvindt. Als alle gebouwen door middel van WKK-installaties verwarmd zouden worden zou er, uitgaande van $\pm 80\%$ warmtelevering door WKK en een bedrijfstijd van ca. 5.000 uur per jaar, een vermogen van zo'n 7.000 MWe aan WKK kunnen worden geplaatst.

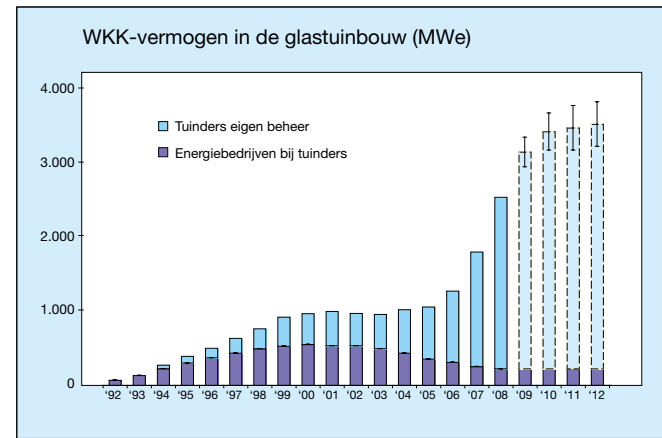
Als er een inschatting gemaakt wordt van de geschiktheid van de verschillende segmenten van de utiliteitsbouw, blijkt dat ongeveer 3.000 MWe van het theoretische potentieel daadwerkelijk met WKK voorzien kan worden. Ingeschat wordt dat 50% van dit vermogen voor 2020 gerealiseerd zou moeten kunnen zijn.

2.5.3 WKK-potentieel in de industrie

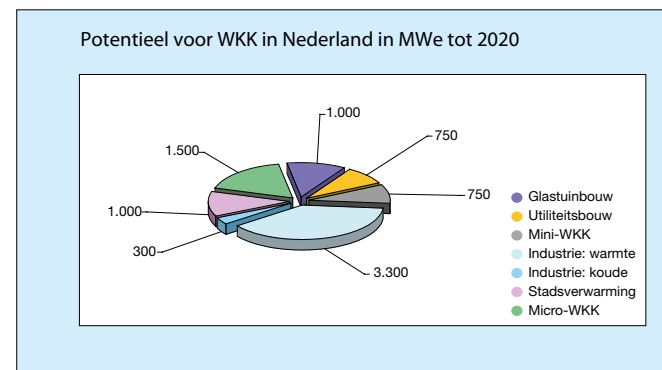
In de industrie wordt er op verschillende temperatuurniveaus warmte toegepast en staat er in totaal al circa 4.000 MWe aan WKK opgesteld, vooral in het temperatuurstraject tot 250 °C. Het energieverbruik in dit traject bedraagt zo'n 150 PJ per jaar, wat bij benadering een theoretisch potentieel van 6.000 MWe oplevert. Er staat in dit segment 3.700 MWe opgesteld, met een potentieel van ongeveer 2.300 MWe. Er wordt ingeschat dat 80% van dit vermogen (dus 1.800 MWe) realiseerbaar potentieel is voor 2020.

Daarnaast zijn er technische mogelijkheden om ook voor hogere temperaturen WKK toe te passen, bijvoorbeeld door het voorverwarmen van de verbrandingslucht van fornuizen, ovens en drogers. Voor deze toepassingen is 377 PJ aan energie nodig. Gezien het feit dat dit technisch een gecompliceerde toepassing met kapitaalsintensieve installaties is, waarbij ook de invloed op het product onderzocht moet worden, wordt er voor 2020 uitgegaan van een realiseerbaar potentieel van 10%. Dit is nog altijd 1.500 MWe.

In de industrie wordt ook veel koude gebruikt. Deze wordt op dit moment grotendeels door elektriciteit opgewekt. Het gaat daarbij om circa 8% van het industriële elektriciteitsverbruik oftewel



Figuur 8 Inschatting van de groei van WKK in de glastuinbouw



Figuur 9 Potentieel voor WKK in Nederland tot 2020

	Bestaand	Potentieel	Totaal
Glastuinbouw	2.500 MWe	1.000 MWe	3.500 MWe
Utiliteitsbouw	750 MWe	1.500 MWe	2.250 MWe
Industrie: warmte	3.700 MWe	3.300 MWe	7.000 MWe
Industrie: koude	0 MWe	300 MWe	300 MWe
Stadsverwarming	3.800 MWe	1.000 MWe	4.800 MWe
Micro-WKK	0 MWe	1.500 MWe	1.500 MWe
Totaal	10.750 MWe	8.600 MWe	19.350 MWe

Tabel 2 Achtergrondgegevens WKK-potentieel

10 PJ per jaar. Deze koude kan echter ook door WKK-installaties in combinatie met een absorptiekoelmachine geleverd worden. Een absorptiekoelmachine gebruikt warmte van 90 tot 120 °C als aandrijfswarmte. Het technisch potentieel voor deze vorm van WKK ligt in het bereik van 1.000 tot 2.000 MWe. De inschatting is dat voor 2020, 300 MWe een realiseerbaar potentieel is. Het totaal realiseerbare potentieel in 2020 komt hiermee in de industrie op 4.100 MWe.

2.5.4 WKK-potentieel in de stadsverwarming

Vanaf eind jaren negentig is er in stadsverwarming geen grote groei meer geweest. Anno 2008 zijn er wel diverse projecten in studie of in voorbereiding. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om uitbreidingen in Amsterdam (warmte vanuit het Afval Energiebedrijf), Leeuwarden, Almere, Arnhem-Nijmegen, Drechtsteden, Hengelo, Alkmaar, Leiden en Delft. Ook is er sprake van mogelijke warmtenetten rondom de Botlek, om restwarmte vanuit het havengebied naar de woning- en glastuinbouw te transporteren. Daarnaast vindt er in de bestaande warmtenetten een zogenaamde netverdichting plaats, dat wil zeggen dat er op het bestaande net nog extra afnemers worden aangesloten. Door de toegenomen vraag naar warm tapwater wordt de afname van de warmtevraag van bestaande afnemers door minder koud weer en door een betere bouwkwaliteit, voor een belangrijk deel teniet gedaan.

Omdat er lang niet altijd een centrale in de buurt is voor het leveren van warmte zal stadsverwarming nog maar beperkt in nieuwbouwwijken worden ingezet. De nieuwbouw van een stadsverwarmingscentrale moet concurreren met andere concepten en zal deze concurrentiestrijd slechts in een beperkt aantal gevallen winnen. Voorbeelden van recente projecten zijn de wijken Vathorst in Amersfoort en Ypenburg in Den Haag. In deze wijken wordt stadsverwarming uitgevoerd met behulp van centrales met gasmotoren.

Technisch gezien is er zeker een groei van het aantal WKK-projecten met stadsverwarming mogelijk, namelijk als alle restwarmte in de buurt van bestaande centrales zoveel mogelijk wordt afgezet. Deze aanleg zal door alle problematiek die er bij het aanleggen van warmtenetten in bestaande bebouwing komt kijken, echter nooit heel snel gaan. ECN gaat in haar referentieramingen uit van nagenoeg geen groei. Als de lijn van de afge-

lopen jaren wordt voortgezet, zal er dus maar op heel beperkte schaal uitbreiding van stadsverwarming plaatsvinden. In dit boek wordt voor het 'realiseerbaar' potentieel tot 2020 uitgegaan van een (beperkte) groei van 1.000 MWe.

2.5.5 WKK-potentieel in woningen

Voor individuele woningen is er op dit moment een ontwikkeling gaande met betrekking tot micro-WKK. De eerste versie is gebaseerd op de Stirling-technologie en komt naar verwachting in 2010 op de markt. Op termijn worden er ook micro-WKK-installaties op basis van brandstofcellen verwacht (zie hoofdstuk 3).

Het grootste potentieel van micro-WKK bevindt zich in de bestaande woningen; in Nederland zijn dat er zo'n 6,6 miljoen. De ontwikkelaars en ketelfabrikanten van micro-WKK, verenigd in de Smart Power Foundation, verwachten dat er tot 2020 circa 1,5 miljoen micro-WKK-installaties van 1 kWe zullen worden geplaatst met een totaal vermogen van 1.500 MWe. Voor de bepaling van het technisch potentieel wordt van deze waarde uitgegaan.

2.5.6 Totaaloverzicht WKK-potentieel tot 2020

Figuur 9 geeft het totaal nog realiseerbare technisch potentieel voor nieuwbouw van WKK in Nederland tot 2020 weer. Dit potentieel komt dus bovenop het potentieel van de bestaande WKK-installaties.

De totale schatting van ruim 19.000 MWe ligt boven de waarden die door bijvoorbeeld ECN in de referentieramingen worden genoemd. Desondanks gaat ook ECN uit van een groei van 50% van het WKK-vermogen. De grote vraag is natuurlijk welk vermogen er daadwerkelijk gerealiseerd zal worden. Dat hangt vooral van omgevingsfactoren af, zoals de prijsontwikkeling op de energiemarkten, de ontwikkeling van de CO₂-emissiehandel, het ondersteunende beleid van de overheid en in het algemeen de (economische) ontwikkelingen in de diverse sectoren. Ook lokale factoren als ruimtebeslag, lokale vergunningseisen, de beschikbaarheid van (regionale) netcapaciteit, e.d. spelen hierbij een rol.

Tot het jaar 2020 gaat het Kabinet in haar werkprogramma Schoon en Zuinig uit van een toename van het WKK-vermogen met de helft van het huidig opgestelde vermogen. ECN onderschrijft dat de onzekerheden groot zijn en gaat in haar ramin-

gen uit van waarden die eveneens rond 50% liggen, wat dus neer zou komen op een groei van het WKK-vermogen met 4.000 á 5.000 MWe tot 12.000 MWe in het jaar 2020.

De realisatie van dit extra WKK-vermogen lijkt gezien het ingeschatte potentieel geen probleem, en er lijkt zelfs een grotere groei mogelijk. Een doorbraak van micro- of mini-WKK ontsluit een heel nieuw segment voor WKK en kan daarmee voor een verschil van 1.000 MWe of meer zorgen. Het is vooral belangrijk dat een groot deel van de besparings- en reductiedoelstellingen van bijna alle genoemde sectoren met WKK kan worden behaald.

2.6 Milieu-effecten van WKK in Nederland

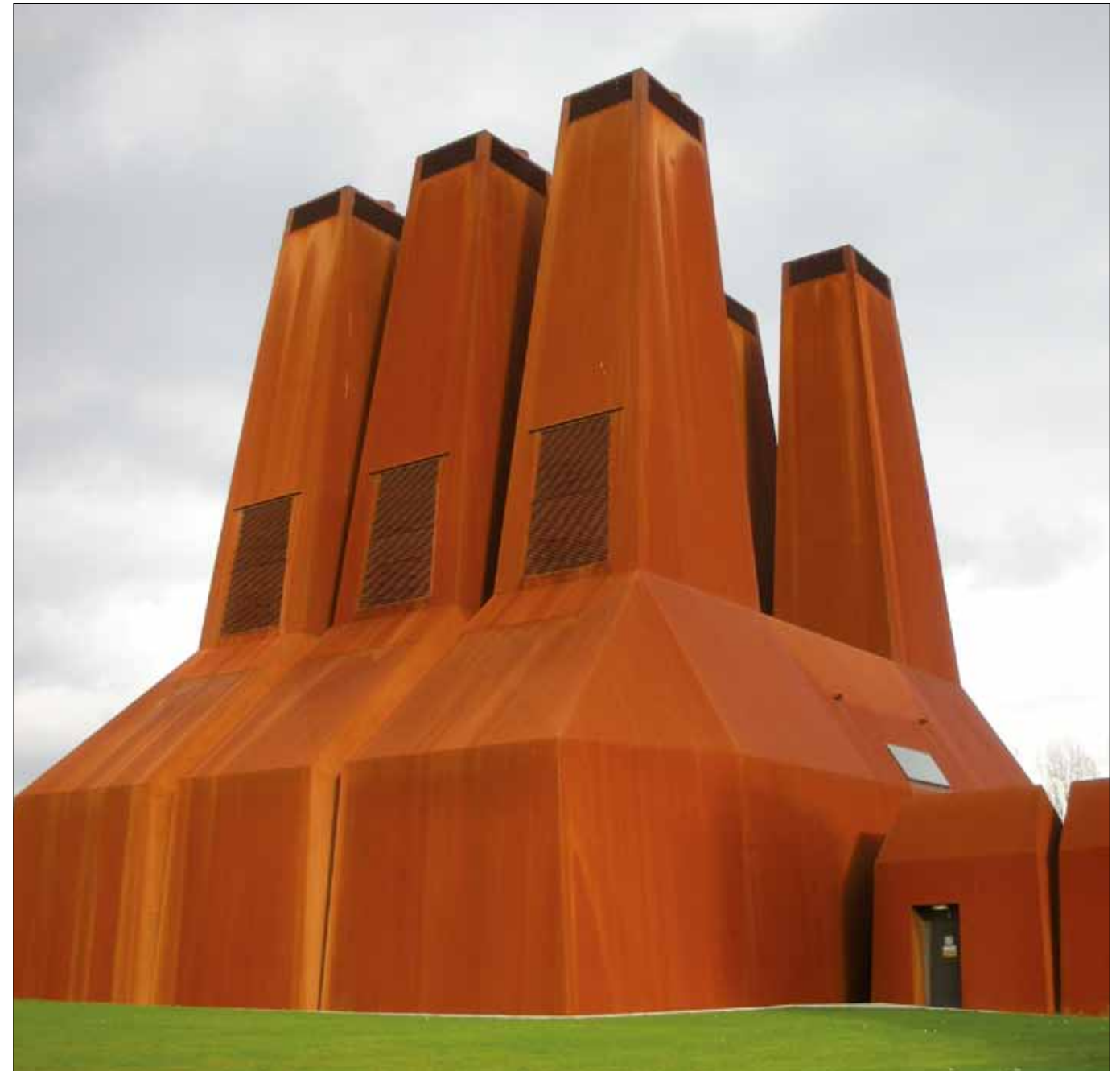
De energiebesparing die door WKK gerealiseerd wordt, kwam in 2005 uit op 95 PJ (op basis van gegevens van ECN). ECN heeft het technisch potentieel op 160 tot 200 PJ in 2020 bepaald, terwijl er in ramingen van een besparing van 130 PJ wordt uitgegaan. Deze waarde is in lijn met de aanname dat het WKK-vermogen met circa 50% toe zal nemen.

De huidige CO₂-reductie die er dankzij WKK gerealiseerd wordt, bedraagt ruim 6 tot 8 Mton (afhankelijk van referenties) per jaar en verwacht wordt dat die besparing in 2020 met 3 Mton zal stijgen. WKK vormt daarmee 16% van de landelijke reductiedoelstelling voor broeikasgasemissies in 2020 (van 214 Mton in 1990 naar 150 Mton in 2020; zie het werkprogramma Schoon en Zuinig van het Ministerie van VROM).

Met WKK op basis van aardgas is, net als bij alle andere verbrandingsprocessen op basis van fossiele brandstoffen, emissie van NO_x gemoeid. Deze uitstoot is ongewenst omdat zij tot verzuring van het milieu en tot ongewenste stikstofdepositie (vermesting) leidt en bovendien een negatieve invloed heeft op de luchtkwaliteit. De grotere WKK-installaties die op basis van een gasturbine-technologie functioneren, hebben een emissieniveau dat gelijk is aan dat van de grote elektriciteitscentrales. Vooral gasmotoren zijn een aandachtspunt voor wat NO_x-emissie betreft. Dit emissieniveau ligt ruim twee keer zo hoog (140 g NO_x/GJ) als dat van grootschalige elektriciteitscentrales (45 tot 65 g NO_x/GJ).

Het overheidsbeleid lijkt erop gericht te zijn om vanaf 2009 zowel voor grootschalige installaties (via emissiehandel) als voor gas-

motoren, een emissieniveau van 30 g NO_x/GJ voor te schrijven. Gasmotoren kunnen daaraan met behulp van een katalytische rookgasreiniger voldoen. Zodra deze eis van kracht wordt, is het emissieniveau van WKK met betrekking tot de brandstofinput (in GJ) volledig gelijk aan dat van andere opwekkers. Netto gezien echter treedt er een aanzienlijke emissiereductie ten opzichte van een referentie met gescheiden opwekking op, omdat er 20 tot 30% aan energie met de daaraan gekoppelde emissies wordt bespaard. ■



Hoofdstuk 3

Warmtekracht: van concept tot realisatie

Warmtekracht is een bijzonder breed begrip, kent verschillende verschijningsvormen en is in verschillende marktsegmenten te vinden. Bij warmtekrachtkoppeling wordt altijd gestreefd naar een optimale benutting van zowel de elektriciteit als de warmte die bij de opwekking van de elektriciteit vrijkomt.

In termen van grootte kan er een aantal vormen van warmtekracht worden onderscheiden:

- Micro-WKK voor toepassing in huishoudens, met een vermogen van 1 kWe tot circa 5 kWe.
- Mini-WKK voor toepassing in het MKB of in de kleinschalige industrie, in een vermogensrange van circa 5 kWe tot 300 kWe.
- WKK voor toepassing in de glastuinbouw, de gebouwde omgeving en de kleine industrieën, met een vermogensrange van circa 200 kWe tot circa 20 MWe.
- Middelgrote WKK.
- Grote WKK.

Bij deze opsomming kunnen twee kanttekeningen geplaatst worden. De eerste betreft de techniek van micro-WKK. Deze bevindt

zich nog steeds in een demonstratiefase en richt zich op een geheel ander marktsegment dan de overige vormen van WKK. Dit houdt in dat veel van de ontwerpvoorstellen en economische voorstellen op een andere wijze worden doorlopen dan de overige vormen van warmtekracht. Daarom is ervoor gekozen om micro-WKK in een aparte paragraaf te beschrijven.

De tweede kanttekening is dat de warmtedistributie buiten deze opsomming op grootte blijft. Warmtedistributie is in principe bij elke vorm van warmtekracht mogelijk en gaat om het transporteren van de opgewekte warmte via een distributienet naar afnemers. De aspecten die met de aanleg en het beheer van een dergelijk transportnet samenhangen, komen niet verder aan de orde.

De opzet van dit hoofdstuk volgt in grote lijnen de vier fasen die doorlopen worden om van een eerste idee tot een daadwerkelijk draaiende installatie te komen. Deze fasen staan beschreven in de paragrafen 3.1 tot en met 3.4. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op micro-WKK.

Paragraaf 3.1 - Techniek, ontwerp en gebruik

Een analyse van de mogelijkheden voor de koppeling van warmte en kracht (WKK) begint op basis van theoretische kennis. Dit proces kan zogezegd achter het bureau of aan de lunchtafel plaatsvinden: 'Zou er een mogelijkheid zijn om in ons bedrijf een WKK-installatie toe te passen om zo energie te besparen?'. In deze fase is met name de basiskennis van belang. De meest relevante gebieden hierbij zijn de techniek, het energiegebruik en de wensen van de gebruiker.

Paragraaf 3.2 - Economische analyse

Als de technische opties onderzocht zijn en er is vastgesteld welk WKK-systeem het best bij de gestelde wensen aansluit, kan het project vervolgd worden met een economische analyse van de WKK-installatie. Het is daarbij van belang de volgende punten goed te onderzoeken:

- De basisprincipes van een economische analyse
- De kosten voor investering en onderhoud
- De energiemarkt
- Subsidies en ondersteuning

Paragraaf 3.3 - Uitwerking en realisatie

Nadat de mogelijkheden onderzocht zijn en er vastgesteld is welk WKK-systeem de hoogste rentabiliteit heeft, volgt de uitvoeringsfase. Daarbij komen het definitieve ontwerp, wet- en regelgeving c.q. vergunningen, het besluitvormingsproces en de planning en realisatie aan de orde.

Paragraaf 3.4 - Beheer en onderhoud

Als de installatie gerealiseerd is, moet deze natuurlijk in bedrijf blijven. Daarbij moeten punten als beheer, onderhoud en aansturing in de gaten worden gehouden.

Paragraaf 3.5 - Micro-WKK

De technieken van micro-WKK bevinden zich nog in een demonstratiefase. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op de ontwikkeling van deze techniek. In verschillende testen worden momenteel de belangrijkste aspecten en eigenschappen ervan in kaart gebracht. Daarbij worden de vier stappen gevolgd die ook voor de overige WKK-installaties gelden.

3.1 Techniek, ontwerp en gebruik

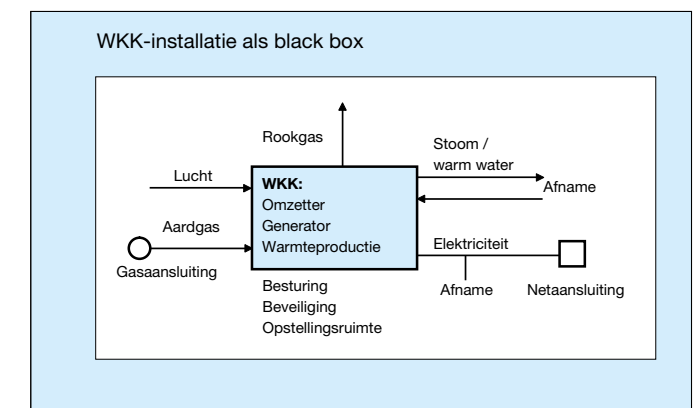
Deze paragraaf gaat in op de technische aspecten van WKK-installaties: conversietechnieken en ontwerp- en gebruiksaspecten. Allereerst wordt er een globale beschrijving gegeven van de verschillende onderdelen binnen een WKK-installatie. Naast de conventionele technieken worden er ook nieuwe technieken beschreven. Bij het ontwerpen van een WKK-installatie is een analyse van het energieverbruiksprofiel zeer belangrijk. Hiermee start paragraaf 3.1.2. Daarna volgen relevante ontwerpaspecten zoals het afvlakken van de piekvraag en CO₂-benutting. De paragraaf 3.1 sluit af met een beschrijving van de inpassing van het WKK-systeem, zowel hydraulisch en elektrisch als bouwkundig. De gebruiksaspecten van een WKK-installatie komen aan bod in paragraaf 3.1.3.

De WKK-installatie

Figuur 1 geeft een schematische weergave van een WKK-installatie zoals deze normaal gesproken gebruikt wordt. De WKK-installatie is in deze figuur beschreven als een 'black box' waarin lucht en brandstof worden omgezet in elektriciteit en warmte. De WKK-installatie in deze black box is een combinatie van de omzetter, die naast warmte mechanische arbeid produceert, het warmteoverdrachtsysteem en een generator. De generator zet de mechanische arbeid om in elektriciteit.

Het totale WKK-systeem bestaat uit de omzetter naar elektriciteit en warmte en de installatie en aansluitingen eromheen. Voor de toevoer van gas is een gasaansluiting noodzakelijk. De aansluiting op het elektriciteitsnet is belangrijk voor de inpassing van de WKK-installatie en de eventuele teruglevering van elektriciteit. Normaal gesproken zijn er voor de installatie een beveiligings- en een besturingssysteem noodzakelijk, evenals een opstellingsruimte die zo ontworpen is dat de overlast (trillingen en geluid) beperkt blijft. Andere belangrijke aspecten in het totale systeem zijn de elektriciteits- en gasaansluiting. Omdat er vaak meer stroom wordt geproduceerd dan voor de eigen behoefte nodig is, is met name de mogelijkheid voor teruglevering op het elektriciteitsnetwerk van groot belang voor de meeste WKK-systemen. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de druk en capaciteit op het gasnetwerk.

Een belangrijk onderdeel van een WKK-installatie is de generator. Het totale elektrische rendement van de installatie wordt bepaald door het rendement van deze generator en van de mechanische omzetting. Dit rendement ligt tussen 96 en 98% en is afhankelijk van de kwaliteit van de installatie. Bij de keuze voor de totale WKK-installatie is dit een belangrijk aandachtspunt, omdat hiermee ook de generatorverliezen voor de gehele levensduur vastliggen. De meeste generatoren hebben het hoogste rendement bij circa 80% van hun maximale belasting.



Figuur 1 Schematische weergave van een WKK-installatie op aardgas

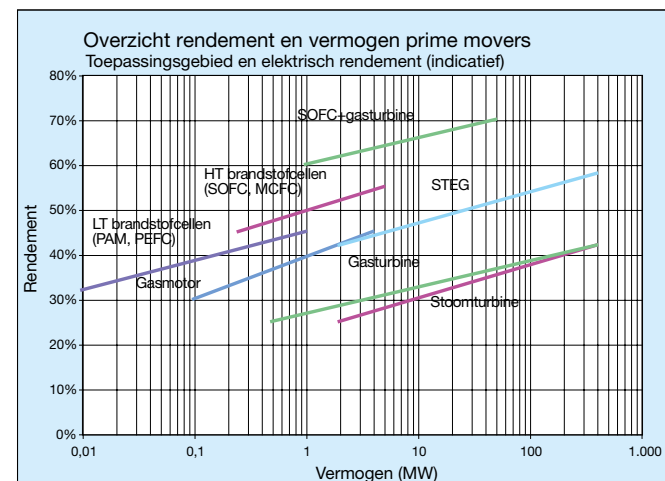
3.1.1 Conversietechnieken

Voor een WKK-installatie worden er verschillende technologieën gebruikt. De keuze voor een bepaalde techniek is afhankelijk van de toepassing en de bedrijfstijd, de elektriciteits- en warmtebehoefte en de gewenste temperatuur (stoom of warm water). De meest toegepaste technologieën van dit moment zijn de gasmotor, de stoomturbine, de gasturbine en de stoom- en gas (STEG) centrale. Naast deze veelgebruikte technologieën worden de volgende nieuwe technologieën al (beperkt) in WKK-installaties toegepast, of beloven dat in de toekomst te worden: de Organic Rankine Cycle (ORC), brandstofcellen, SOFC-gasturbinesysteem en trigeneration. Voor micro-WKK worden er nog andere technologieën gebruikt, zoals de Stirlingmotor en de microgasturbine. Deze technieken worden in paragraaf 3.5 beschreven.

Figuur 2 geeft een indicatie van het elektrisch rendement en het vermogen van de verschillende technologieën. Het is duidelijk dat er voor kleinschalige WKK-installaties andere technieken bestaan dan voor grootschalige installaties.

Warmtegebruik

De warmte in de WKK-installaties die uit het verbrandingsproces ontstaat, wordt in principe op twee manieren afgevoerd. Ten eerste door de 'directe' koeling van de installatie (zoals koe-



Figuur 2 Toepassingsgebied en rendement van verschillende technieken

ling van de olie en de machine) en ten tweede met rookgassen. De verhouding tussen beide stromen is sterk afhankelijk van de gekozen techniek. Zo vormt de machinekoeling bij gasmotoren (van het motorblok, de oliekoeler en 'interkoelers') een aanzienlijk deel van de totale warmtestroom (circa 50% van de totale warmte). Bij gasturbines daarentegen komt vrijwel alle warmte in de uitlaat vrij in de vorm van rookgassen.

De gasmotor

Een gasmotor is de verzamelnaam voor zuigermotoren die op basis van een gasvormige brandstof werken. In Nederland zijn de meeste kleinschalige WKK-toepassingen gebaseerd op gasmotoren. Op diverse plaatsen worden gasmotoren ingezet in WKK-installaties. Voorbeelden zijn onder andere te vinden in tuinbouwkassen, de olie- en gasindustrie, kantoorgebouwen, zwembaden en ziekenhuizen. Het vermogensbereik van motoren ligt globaal tussen de 0,2 en 10 MWe. Soms worden op een locatie diverse WKK-eenheden omwille van bijvoorbeeld regelbaarheid of bedrijfszekerheid met elkaar gecombineerd.

Gasmotoren hebben als belangrijkste voordeel dat ze relatief goedkoop zijn en een hoog elektrisch en thermisch rendement hebben. Een gasmotor is een seriematig product, dat betrouwbaar is en zo goed als uitontwikkeld. Het noodzakelijke onderhoud is relatief eenvoudig te leren en kan daardoor gedeeltelijk door de gebruiker en zijn technische staf worden uitgevoerd, waardoor de rest van de onderhoudskosten (uitgevoerd door een externe partij) beperkt blijven. Doordat de motor in serie wordt geproduceerd, zijn onderdelen meestal snel beschikbaar. Daarnaast wordt bij de productie van de motor rekening gehouden met de inpassing op het gas- en elektriciteitsnet op de locatie, waardoor ook de kosten hiervoor beperkt kunnen blijven. Dat neemt natuurlijk niet weg dat er voor de aansluiting op het net van de netbeheerder wel kosten gemaakt moeten worden. Een ander voordeel van gasmotoren is dat ze relatief snel hun maximale vermogen kunnen leveren, zij het dat hiervoor wel speciale voorzieningen nodig zijn. Mede daardoor zijn ze goed inzetbaar als 'noodstroombedrijf'.

Een speciaal aandachtspunt bij gasmotoren is de productie van geluid en trillingen. De opstelling van een gasmotor in de bedrijfsruimte van bijvoorbeeld een utiliteitsgebouw, vraagt daarom veel

aandacht. Bovendien is de vermogensdichtheid van gasmotoren laag in vergelijking met die van gasturbines. Dat wil zeggen dat gasmotoren bij eenzelfde vermogen relatief groter zijn. Een gasmotor is met name geschikt voor warmwaterproductie tot circa 100 °C. Als er behoefte is aan lagedrukstoom (tot circa 110 °C) kan hierin voorzien worden met de warmte uit de rookgassen van een motor. Dit gaat echter ten koste van het totale rendement. Daarnaast ligt het aantal onderhoudsbeurten op een wat hoger niveau dan bij gasturbines doordat afstelbeurten, inspecties en smeeroliewisselingen frequenter plaatsvinden. Bovendien hebben gasmotoren hogere emissies van stikstofoxiden (NO_x) en onverbrande koolwaterstoffen. Dit kan deels worden opgelost door gebruik te maken van nageschakelde technieken zoals katalytische reductie.

Het elektrisch rendement van gasmotoren bedraagt netto circa 30 tot 45% en het thermisch rendement 45 tot 55% (figuur 3, blz. 32). Zo komt het totaalrendement neer op 85 tot 95%

Gasmotor opgesteld in het UMC Groningen



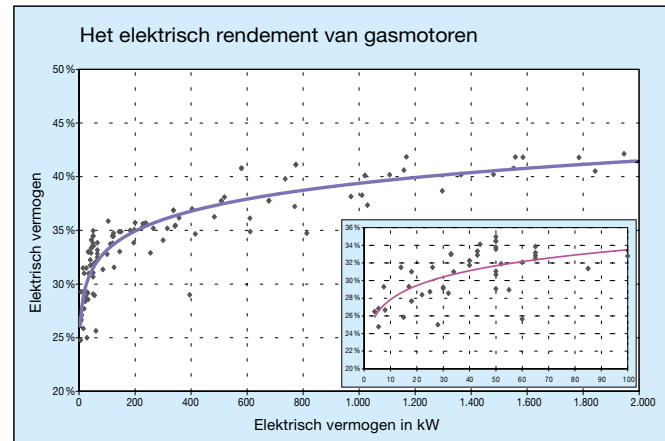
(figuur 4, blz. 32). Deze waarden zijn gebaseerd op de onderste verbrandingswaarde van aardgas.

De leverancier van de gasmotor voor de WKK-installatie kan in principe iedere gewenste configuratie samenstellen, waarbij optimaal wordt tegemoetgekomen aan de temperatuurs- en vermogensbehoeftes van de klant.

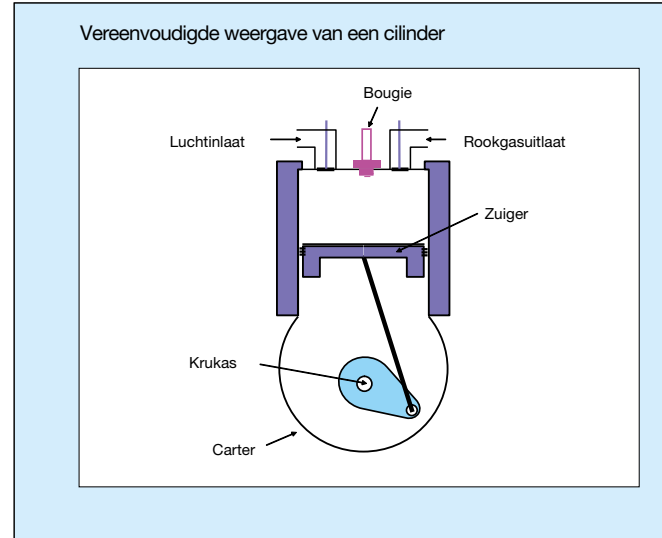
Werkingsprincipe

Voor het gebruik in WKK-toepassingen werkt de gasmotor volgens het viertaktprincipe, waarbij het proces in één cilinder vier stappen doorloopt. Figuur 5 (blz. 32) geeft een vereenvoudigde weegave van een cilinder van een gasmotor.

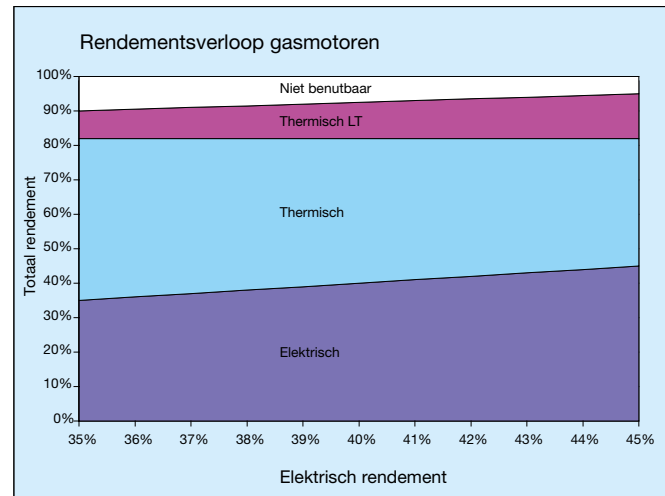
- Bij de aanzuigslag wordt een mengsel van brandstofgas en lucht aangezogen. De inlaatklep van de cilinder staat dan open.
- Daarna volgt de compressieslag: de kleppen zijn gesloten en het mengsel wordt gecomprimeerd. Druk en temperatuur stijgen



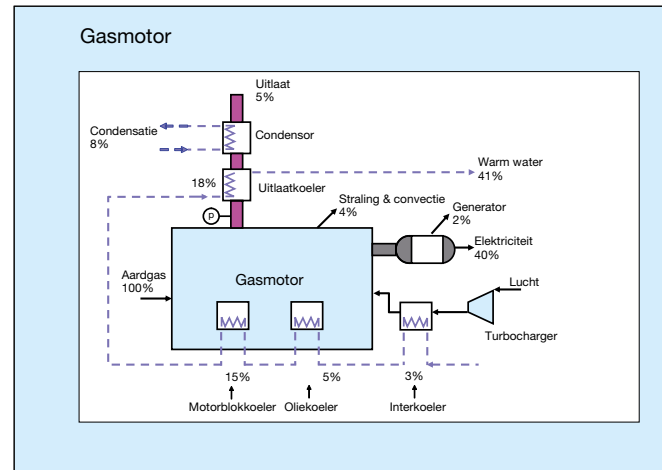
Figuur 3 Elektrisch rendement als functie van de grootte (Bron: Asue)



Figuur 5 Vereenvoudigde weergave van een cilinder van een gasmotor



Figuur 4 Relatie tussen elektrisch en thermisch rendement (LEI)



Figuur 6 Schematische weergave van een gasmotor

en vlak voor het eind van de compressieslag wordt het mengsel met een bougie ontstoken. Het mengsel ontsteekt (verbrandt), waarbij zowel de druk als de temperatuur zeer snel toeneemt.

- Het mengsel expandeert waardoor de zuiger de krukas aandrijft. In deze expansieslag wordt de daadwerkelijke arbeid geleverd.
- In de vierde slag drijft de zuiger het mengsel bij de geopende uitlaatklep naar het uitlaatsysteem.

bare warmte vrij in de vorm van uitlaatgassen. Daarnaast komt er warmte vrij in de koeling van het motorblok, de smeeroilie en de gecomprieeerde verbrandingslucht na de turbocharger (de interkoeler). Dit vormt een aanzienlijk deel van de warmte van een gasmotor (circa 50% van alle warmte). Door een warmwater-systeem komt de warmte beschikbaar voor gebruik (figuur 6). Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen hogetemperatuurwarmte (temperatuur tussen circa 90 en 70 °C) en lagetemperatuurwarmte (temperatuur tussen circa 50 en 30 °C).

Moderne, grote gasmotoren zijn meestal voorzien van een turbocharger. Dit zijn de zogenaamde opgeladen motoren. De hete uitlaatgassen van de motor drijven, via een expansieturbine in het uitlaatkanaal, een luchtcompressor in de inlaat aan. Door een turbocharger te gebruiken levert eenzelfde motor aanzienlijk meer vermogen en stijgt het elektrisch rendement. Bij kleinere gasmotoren (< 100 kWe) wordt een turbocharger doorgaans niet gebruikt, waardoor ze relatief goedkoper in aanschaf zijn. Bij het gebruik van een gasmotor komt een groot deel van de bruik-

De koelcircuits kunnen op diverse manieren met elkaar gecombineerd worden. Hierbij is het van belang dat de smeeroilie- en motorblokkkoeling gevoed worden met koelwater dat kouder is dan 70 °C. Bij hogere ingangstemperaturen van het koelwater zal de motor stoppen doordat de beveiliging dan reageert. Om de gasmotor toch in bedrijf te houden in een situatie waarin de temperatuur van het koelwater dat de machine ingaat, niet laag genoeg is

Een tafelkoeler naast een warmtebuffer



(voor bijvoorbeeld noodstroom), zal de inlaattemperatuur van het koelwater onder de toelaatbare 70 °C gehouden moeten worden. Dit kan bereikt worden door het retourwater met een 'droge tafelkoeler' te koelen (zie de foto op blz. 33): een warmtewisselaar voorzien van een ventilator om de warmte naar de omgeving af te voeren.

Afhankelijk van het gewenste temperatuurniveau door de warmtegebruiker, kan de warmte uit de rookgascondensator en uit de koeling van de turbocharger wel of niet nuttig gebruikt worden. Zo zal een tuinder met een gasmotor-WKK de lage temperatuur (LT-)warmte doorgaans wel nuttig in kunnen zetten doordat hij een groot LT-verwarmingssysteem heeft. Als er geen LT-net aanwezig is, wordt de warmte niet nuttig ingezet.

De rookgassen komen met een temperatuur van 350 tot 500 °C uit de gasmotor, wat veel lager is dan de temperatuur van rookgassen die uit een gasturbine komen. De hete rookgassen kunnen rechtstreeks worden gebruikt in thermische processen zoals drogers, of indirect door middel van warmtewisselaars. De afkoeling kan in stappen plaatsvinden. Het is mogelijk om zowel stoom als heet water voor de CV en warm water voor bijvoorbeeld tapwater voor verwarming uit de rookgassen aan te maken. De achtereenvolgende warmtewisselaars heten dan stoomgenerator, economiser en rookgascondensator. Het totale systeemrendement komt in dat geval op 90% onderwaarde.

Om de emissie van stikstofoxiden te beperken wordt bij moderne gasmotoren met een hoge luchtvermaat gewerkt. Daarmee wordt de verbrandingstemperatuur in de cilinder in de hand gehouden. Het gevolg is wel dat de rookgassen nog veel ongebruikte zuurstof bevatten. Wanneer een bedrijf stoom nodig heeft, is het interessant om de rookgassen door een afgassenketel (ook wel Heat Recovery Steam Generator (HRSG)) te voeren waarin een gasbrander is aangebracht, zodat de temperatuur van 400 naar zo'n 800 °C gebracht kan worden. Met deze warmte kan met een zeer hoog ketelrendement stoom (bijna 100%), CV-water en laagtemperatuurwarmte worden geproduceerd.

De stoomturbine

Bij deze techniek wordt een stoomturbine ingezet om de potentiële energie uit hogedrukstoom (40 tot 80 bar) om te zetten in elek-

tricititeit, alvorens de lagedrukstoom aan de uitlaat van de stoomturbine voor procesverwarming (5 tot 20 bar) te gebruiken. Dit is een techniek die veel wordt toegepast in de industrie. Vaak wordt er door een stoomketel of afgassenketel van een gasturbine oververhitte hogedrukstoom (bijvoorbeeld 60 tot 80 bar) gemaakt, die vervolgens via een centraal stoomnet getransporteerd wordt. Deze stoom wordt dan gebruikt om een stoomturbine aan te drijven waarmee elektriciteit wordt opgewekt. De in druk gereduceerde stoom aan de uitlaat van de stoomturbine kan hierna worden ingezet voor procesdoeleinden zoals procesverwarming en luchtbevochtiging.

Sterke eigenschappen van grote stoomturbines zijn onder andere hun grote betrouwbaarheid, hoge mate van beschikbaarheid en hun lange levensduur (25 tot 35 jaar). Een belangrijk nadeel is de installatieperiode: deze is 12 tot 18 maanden voor kleine systemen, tot wel drie jaar voor grote systemen. Afhankelijk van de benutting van de energiestromen heeft een stoomturbine een elektrisch rendement van 25 tot 40% en een totaalrendement van circa 85%.



Voorbeeld van een stoomturbine Bron: Corbis

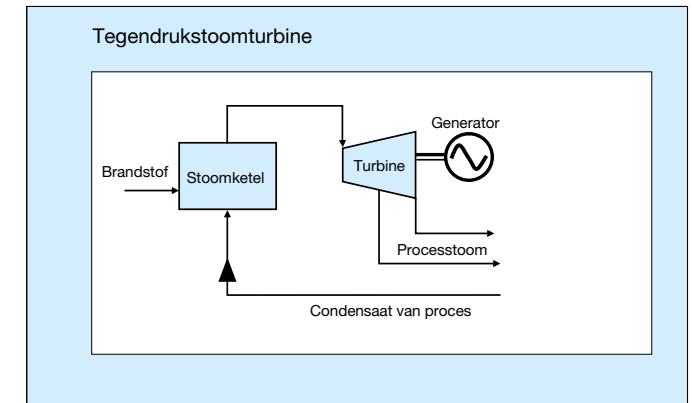
Werkingsprincipe

Een installatie die gebaseerd is op een stoomturbine bestaat grofweg uit vier componenten: een stoomketel, een stoomnet, een stoomturbine en een warmteverbruiker. In de stoomketel of de afgassenketel wordt het water opgewerkt tot oververhitte stoom met een druk die in sommige systemen hoger is dan 100 bar.

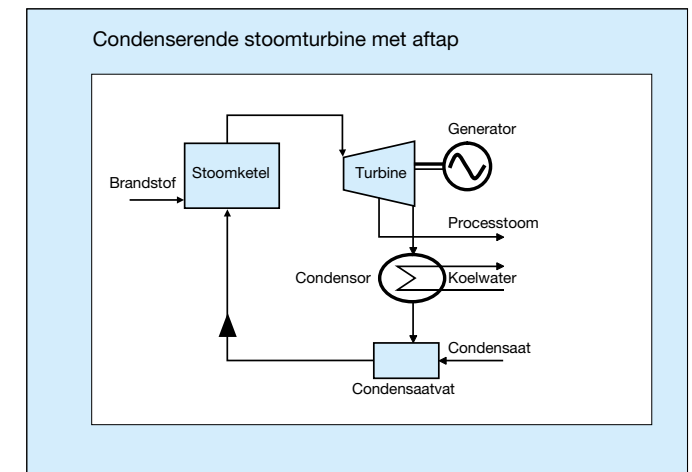
Dit proces vindt in een aantal stappen plaats. Het voedingswater wordt door ketelvoedingswaterpompen op druk gebracht en komt via de economiser de ketel binnen. In de economiser wordt het water tot net onder het kookpunt verhit en stroomt vandaar uit in de stoomdrum. Vanuit deze stoomdrum circuleert er water door de verdamper door natuurlijke of gedwongen circulatie (d.m.v. pompen). In de verdamper verdampt een deel van het water tot stoom. Dit stoom-/watermengsel stroomt dan weer in de drum. In de drum worden stoom en water gescheiden. Water stroomt samen met water uit de economisers weer in de verdamper en stoom verlaat de drum in de richting van de oververhitter. In de oververhitter wordt de stoom verwarmd tot de gewenste temperatuur.

De temperatuur van de stoom bereikt in sommige systemen 540 °C. De oververhitte stoom wordt vanuit de ketel naar een stoomturbine gevoerd, waar de stoom expandeert en de schoepen van de turbine-as in beweging zet. In figuur 7 condenseert de stoom niet, maar wordt deze op een lagere druk alsnog ingezet als processtroom. Daarom wordt hier van een tegendrukstoomturbine gesproken. De warmte uit de rookgassen van de stoomketel wordt afgekoeld door achtereenvolgens de oververhitter, de verdamper en de economiser. Daarna kan er eventueel nog een rookgascondensator worden nageschakeld. Met de rookgascondensator wordt het voedingswater alvast voorverwarmd voordat het de ketel ingaat. In enkele gevallen wordt ook de verbrandingslucht door middel van een luchtvoorwarmer (LUVO) door de 'laatste warmte' in de rookgassen voorverwarmd.

Er zijn ook configuraties mogelijk met diverse turbines die in serie geschakeld zijn. Voor dit proces of voor bijvoorbeeld stadsverwarming wordt dan stoom tussen de turbines afgetapt. Als niet alle stoom voor verwarming of als processtroom gebruikt wordt, kan de stoomturbine ook condenserend worden ingezet.



Figuur 7 Vereenvoudigd schema van een tegendrukstoomturbine



Figuur 8 Vereenvoudigd schema van een 'condensing' stoomturbine met aftap

Dit houdt in dat de stoom in de laatste trap van de turbine expandeert naar condities onder de atmosferische druk (figuur 8). De nadruk ligt in zo'n geval op elektriciteitsproductie.

Serieschakeling van turbines met herverhitting wordt vaak toegepast om het rendement te verhogen. Na expansie in de eerste hogedrukturbine wordt de stoom naar herverhitters gevoerd, die de temperatuur bij dezelfde druk opvoeren. Hierna wordt de



Voorbeeld van een gasturbine Bron: Corbis

stoom naar een lagedrukturbine gevoerd. De herverhitting of menging met stoom van hogere druk is noodzakelijk omdat de turbines alleen maar oververhitte stoom kunnen verdragen. Zou de stoom in de turbine condenseren, dan, ontstaan er druppeltjes water die grote schade aan de turbinebladen kunnen veroorzaken. De snelheden daarvan zijn dermate hoog dat de druppels kraters in de schoepen kunnen slaan. Daarom mag het vochtpercentage in een turbine niet hoger zijn dan 14%.

De gasturbine

Vanwege de hoge bedrijfszekerheid en het vermogen om in de afgassenketel hogedrukstoom te produceren, wordt er in de industrie veel met gasturbines gewerkt. Daarnaast komt een gasturbine het best tot haar recht als zij het hele jaar draait. De gasturbine produceert mechanische energie door gasvormige of vloeibare brandstof in gecomprimeerde lucht te injecteren en te verbranden. Het hete gas expandeert vervolgens in een turbine. Een deel van

de vrijkomende mechanische energie wordt gebruikt voor de compressie van de verbrandingslucht. Als brandstof niet op de gewenste druk beschikbaar is, moet ook deze op druk worden gebracht. Voordelen van de gasturbine zijn onder andere de lage onderhoudskosten, de schone rookgassen en de hoge brandstofflexibiliteit. Ook vormen de betrouwbaarheid en de beperkte onderhoudsinspanning ten opzichte van andere systemen grote voordelen. Dit maakt gasturbines erg geschikt om ze het hele jaar in te zetten (base-load bedrijf). Ze worden dan ook veel in de industrie toegepast. Nadelen van de gasturbine zijn de hogere investeringskosten en de hoge kosten van componenten. Mede daarom moeten gasturbines veel draaiuren maken, omdat in dat geval dit nadeel wordt gedaan. Daarnaast moet het aantal starts en stops zoveel mogelijk worden vermeden (preferabel minder dan 20 per jaar). Met een gasturbine kan een elektrisch rendement gehaald worden van 25 tot 40%; afhankelijk van de configuratie en de warmteafname komt het totaalrendement zo op 80 tot 90% (figuur 9).

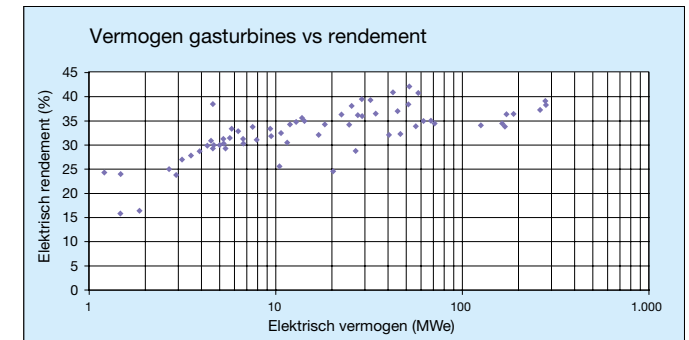
Werkingsprincipe

Een gasturbine bestaat uit drie hoofdonderdelen, namelijk de compressor, de verbrandingskamer en de (expansie)turbine. De compressor comprimeert de aangezogen lucht. In de verbrandingskamer wordt brandstof ingespoten bij de gecomprimeerde lucht en verbrandt daarin. Door de temperatuursverhoging neemt het gasvolume toe. De ontstane hete verbrandingsgassen expanderen vervolgens in de turbine. In tegenstelling tot de eerder beschreven gasmotor werkt een gasturbine in een continue proces (figuur 10).

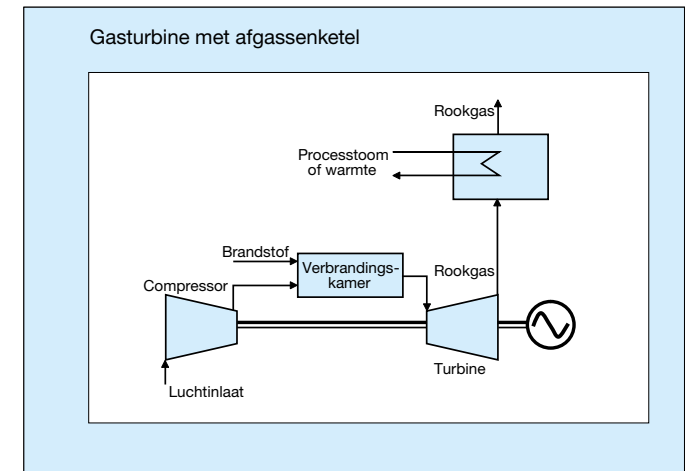
Op kleinere schaal worden er ook micro- (kleiner dan 5 kWe) en minigasturbines (tot honderd kWe) gebouwd. Het probleem van een laag omzettingsrendement bij kleine vermogens wordt deels ondervangen door de toepassing van een recuperator. Daarin wordt een deel van de warmte uit de rookgassen gebruikt voor opwarming van de gecomprimeerde lucht voordat deze de verbrandingskamer ingaat. Ook is de richting van de stroming van de verbrandingslucht in de compressor en de rookgassen in de expansieturbine anders. Bij grotere vermogens wordt vaak een axiale turbine toegepast, waarbij de stroming evenwijdig verloopt aan de as. In figuren 11 en 12 zijn voorbeelden gegeven van beide turbines (blz. 38).

In een radiale turbine wordt de luchtstroom 90 graden omgebogen. Deze techniek is verwant aan de turbochargers die worden toegepast in gas- en dieselmotoren. De toepassing van microturbines wordt nader omschreven in paragraaf 3.5. Als er een warmtewisselaar in de rookgasuitlaat van de gasturbine geplaatst wordt, een zogenaamde afgassenketel, kan daarmee heet water of stoom gemaakt worden. De maximale stoomtemperatuur is 25 tot 40 °C lager dan de rookgastemperatuur aan de uitlaat van de gasturbine, terwijl de stoomdruk afhankelijk van het gebruiksdoel maximaal circa 80 bar kan bereiken. Als er een hogere temperatuur en druk vereist is, kan een afgassenketel met inzetgasbranders voor additionele verbranding (bijstook) worden gebruikt. Normaal gesproken is hier geen behoefte aan extra luchttoevoer, omdat de rookgassen van de gasturbine door een grote lucht-overmaat in de verbrandingsluchttoevoer van de gasturbine nog een zuurstofconcentratie van zo'n 15% bevatten.

Het rendement van een gasturbine wordt onder andere beïnvloed door de temperatuur en de dichtheid van de lucht die de com-



Figuur 9 Elektrisch rendement als functie van het vermogen (op basis van ASUE)



Figuur 10 Vereenvoudigd schema van een gasturbine met afgassenketel

pressor binnenkomt. Deze factoren bepalen namelijk de benodigde arbeid voor compressie, de hoeveelheid brandstof die verbrand kan worden en de hoeveelheid brandstof om de gewenste temperatuur van de turbine-inlaat te bereiken. Ook deellastbedrijf kan het rendement van de turbine doen dalen. Figuur 13 (blz. 39), geeft een indicatie van het effect van deellast en de inlaattemperatuur van de lucht op het rendement van een gasturbinesysteem.

Het is bij gasturbines ook mogelijk om de warmte uit de rookgassen terug te winnen en voor de voorverwarming van de reeds

gecomprimeerde verbrandingslucht te gebruiken. Hierdoor stijgt het rendement van de gasturbine aanzienlijk. Dit wordt ook wel recuperatie genoemd (figuur 14). Er kleeft echter ook een aantal nadelen aan het gebruik van een recuperator. Recuperatoren zijn vaak groot en het is moeilijk ze zo te bouwen dat zij langdurig grote temperatuurverschillen kunnen weerstaan.

Bovendien neemt de complexiteit van een dergelijke turbine-installatie toe. Daarnaast daalt de maximale stoomtemperatuur, omdat de warmte uit de rookgassen deels al aan de gecombineerde verbrandingslucht is afgegeven en de uitlaatgastemperatuur na de recuperator dus sterk omlaag gaat. Er zijn nog niet veel gasturbines met een recuperator uitgevoerd. Waar dat wel het geval is, gaat het in de regel om kleine gasturbines onder de 1 MWe.

De stoom die in de afgassenketel geproduceerd is, kan naast procesdoeleinden ook gebruikt worden om deze te injecteren in de verbrandingskamer: de zogenaamde stoomgeïnjecteerde gasturbine (STIG, figuur 15). De stoom zorgt voor een lagere verbrandingstemperatuur waarmee de vorming van NO_x wordt tegengegaan. De totale massastroom in de verbrandingskamer en de expansieturbine neemt toe, waardoor er meer arbeid vrijkomt. Daarentegen is er extra arbeid nodig omdat de tegendruk voor de

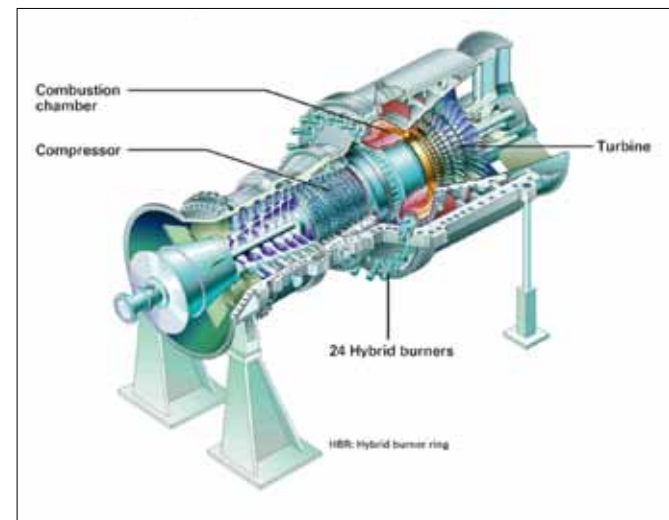
compressor toeneemt. Uiteindelijk stijgt het netto elektrisch rendement bij stoominjectie. Door het gebruik van de stoom neemt het thermisch rendement echter sterk af.

De stoom- en gascentrale (STEG)

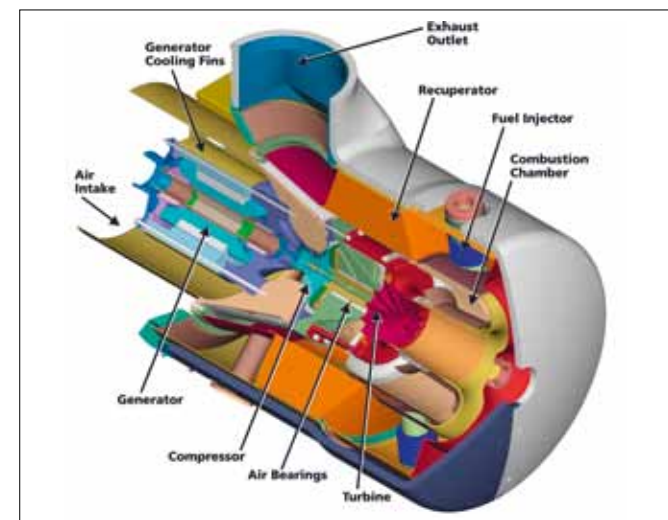
Een STEG is een gecombineerd proces van een stoom- en gasturbine (gecombineerde Joule-Rankine cyclus). Een dergelijk systeem is kostbaar, maar er kunnen ook zeer hoge elektrische en thermische rendementen mee behaald worden. Een STEG wordt daarom veel in grotere warmte/krachtinstallaties in de industrie (30 tot 400 MWe) toegepast.

Als basis voor de installatie wordt een gasturbine gebruikt. De hete rookgassen van de gasturbine worden ingezet in een afgassenketel voor de productie van stoom (zoals hiervoor beschreven). Deze stoom wordt niet rechtstreeks aan het proces geleverd, maar op hogere druk aan een stoomturbine. Vanuit de stoomturbine gaat er dan stoom op lagere druk naar de bedrijfsprocessen. Door de expansie van de stoom in de turbine wordt arbeid geleverd waarmee een generator elektriciteit kan produceren.

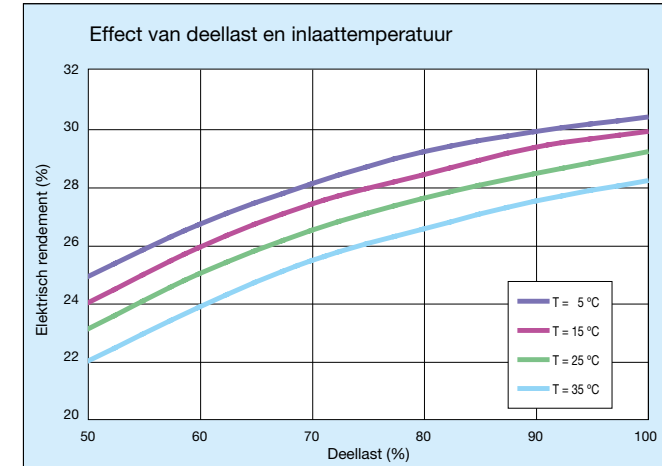
Door de schakeling van een gasturbine aan een stoomturbine kan er, als de reststoom nog als processtroom of voor stadsverwarming



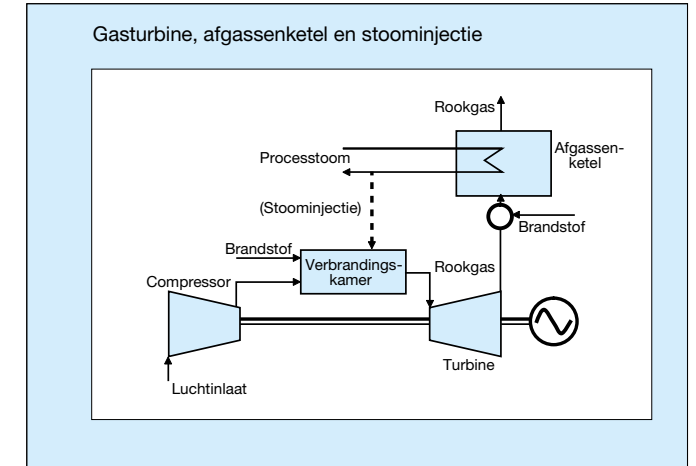
Figuur 11 Doorsnede van een axiale gasturbine Bron: Asue



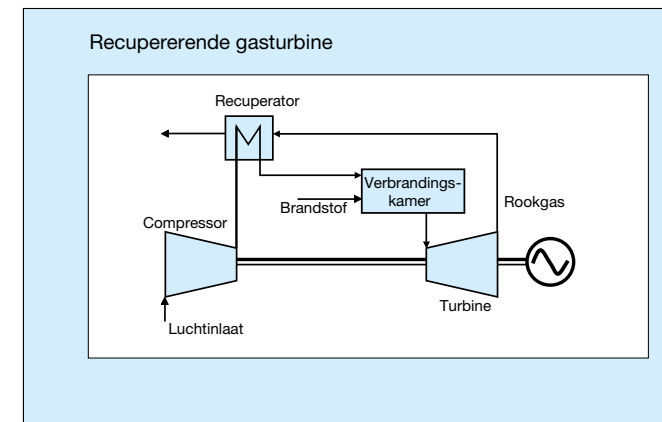
Figuur 12 Doorsnede axiale gasturbine Bron: Capstone Turbine Company



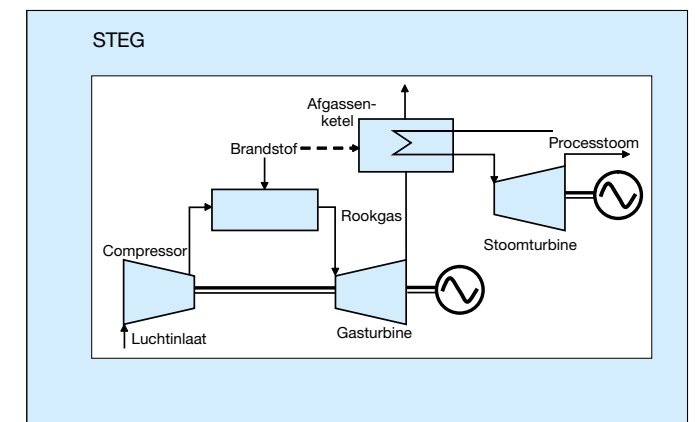
Figuur 13 Effect van deellast en inlaattemperatuur van lucht op het elektrisch rendement van een gasturbinesysteem



Figuur 15 Vereenvoudigd schema van een gasturbine met afgassenketel en stoominjectie



Figuur 14 Vereenvoudigd schema van een recupererende gasturbine



Figuur 16 Schematische weergave van een mogelijk STEG-systeem (tegendruksysteem)

benut wordt, een totaalrendement van 80 tot 90% gehaald worden. Het elektrisch rendement van een STEG-centrale varieert afhankelijk van de warmtelevering tussen de 42 en 58%. Een elektrisch rendement van 58% is echter alleen haalbaar als alle stoom via turbines wordt geëxpandeerd tot beneden de atmosferische druk. Het prinsipeschema van de STEG in figuur 16 (blz. 39) is een van de vele mogelijke configuraties. Hier is gekozen voor een configuratie waarbij alle stoom, na expansie door de stoomturbine, aan het proces geleverd wordt. Een dergelijke stoomturbine wordt ook wel een tegendruk-turbine genoemd.

Als er naast flexibiliteit voor een maximale betrouwbaarheid van de warmtelevering wordt gekozen, kan er ook een bijstookbrander met extra verbrandingsluchtventilatoren geplaatst worden. Deze ventilatoren komen alleen in bedrijf als er een storing in de gasturbine optreedt. Met kleppen wordt de uitrede van de gasturbine afgesloten en de toetrede van de ventilatoren geopend. Deze optie wordt ook wel 'koudlucht'bedrijf genoemd (figuur 17). Ze wordt niet vaak toegepast, omdat de kosten hoog zijn en de installatie door de rookgaskleppen en andere extra componenten storingsgevoeliger wordt.

Een andere manier om meer flexibiliteit te creëren is een STEG met toepassing van een aftapstoomturbine (figuur 18). Bij een constant vermogen van de gasturbine kan de warmtelevering met aftapstoom aangepast worden aan de warmtevraag van de afnemer. De warmte/krachtverhouding kan daardoor variëren tussen 1 en 0. Zo ontstaat er een installatie met een hoog rendement en een hoge flexibiliteit. De grotere warmtekrachtcentrales in de industrie zijn bijna allemaal van dit type, bijvoorbeeld Delesto 2 in Delfzijl en Elsta in Terneuzen. Het is ook mogelijk om een STEG zodanig uit te voeren dat de gasturbine altijd kan draaien ook al is er geen warmtevraag. Om te voorkomen dat er onnodig stoom wordt afgeblazen of weggekoeld, wordt ook wel eens een zogenaamde by-pass schoorsteen toegepast (figuur 19). Met deze schoorsteen worden de rookgassen van de turbine rechtstreeks in een aparte schoorsteen afgeblazen.

Energetisch gezien is het gebruik van de by-pass schoorsteen natuurlijk ongewenst. Deze optie wordt daarom vooral toegepast als de betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening zeer belangrijk is, bijvoorbeeld als de installatie ook als noodstroom-

voorziening dient. Een veel toegepaste mogelijkheid om het rendement van een STEG-cyclus te verhogen is het gebruik van een meerdruksketel. In deze ketel wordt stoom op twee, drie of wel vier drukniveaus geproduceerd. Omdat de constructie wel kostbaarder wordt, loopt het aantal druksystemen over het algemeen bij een toenemende capaciteit op. Bij installaties onder de 30 MWe wordt meestal met één druk gewerkt. De grootste STEG-installaties, met drie- of vierdruksketels halen, als er geen warmte wordt geleverd, een elektrisch rendement van zo'n 60%.

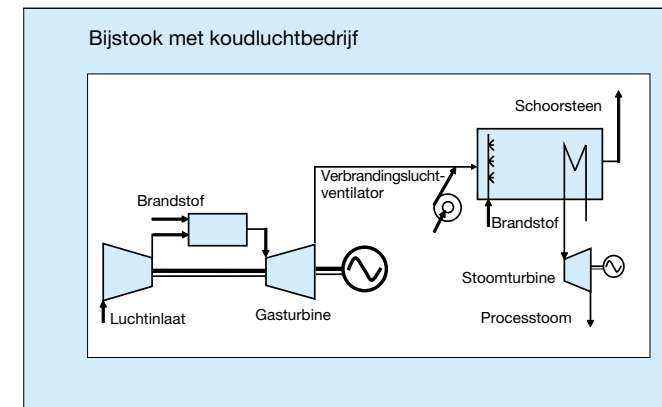
Figuur 20 toont een schema van een tweedruksketel. Ieder druksysteem heeft zijn eigen ketelvoedingswaterintrede, economiser, verdamer, stoomdrum en oververhitter. Deze zijn zodanig gerangschikt dat de warmte in de rookgassen optimaal wordt benut. In het schema is ook een aparte warm water warmtewisselaar aangegeven, waarmee de laatste warmte benut wordt (19 MWth). Het rookgas wordt in dit voorbeeld zelfs tot 75 °C afgekoeld.

In een tweedruksketel zijn de gasturbine en de stoomturbine op één as aangesloten. Beide turbines drijven daardoor dezelfde generator aan. Het voordeel van dit systeem is dat er een lagere investering nodig is. Wel wordt hierdoor de bedrijfsvoering van de installatie complexer. Vooral op industriële locaties komt het voor dat er diverse gasturbines met afgassenketels op een hogedrukstoomnet aangesloten zijn. Aan dit stoomnet hangen dan weer een of meer stoomturbines. Deze stoomturbines kunnen zelfs verspreid op de locatie staan en kunnen ook machines, zoals grote compressoren, rechtstreeks aandrijven.

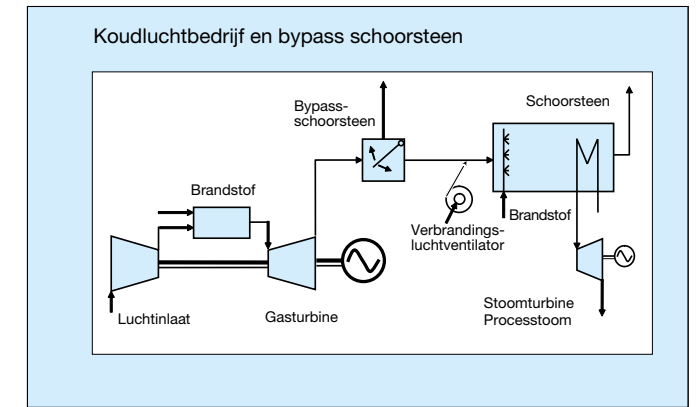
De Organic Ranking Cycle (ORC)

Door een Organic Ranking Cycle na te schakelen aan een WKK-installatie, kan het elektrisch rendement van de installatie worden verhoogd. Het gevolg is wel dat het thermisch rendement van de WKK-installatie lager wordt. Een ORC is in staat om daar waar een stoomturbine niet goed meer werkt, ook met 'laagwaardige' warmte elektriciteit op te wekken. De momenteel beschikbare ORC's kenmerken zich door grote verschillen in prijs, onderhoud en inzetbereik (op basis van temperatuur).

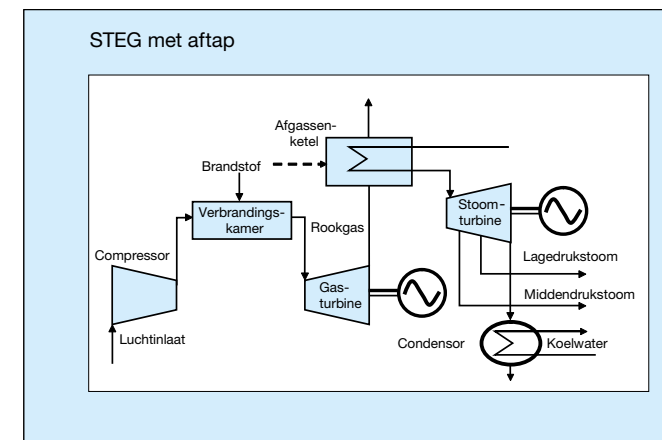
Indicatieve berekeningen geven aan dat het totale elektrisch rendement met een ORC die aan een gasmotor nageschakeld is, met 4 tot 8 procentpunt verbeterd wordt. Een ORC nageschakeld aan



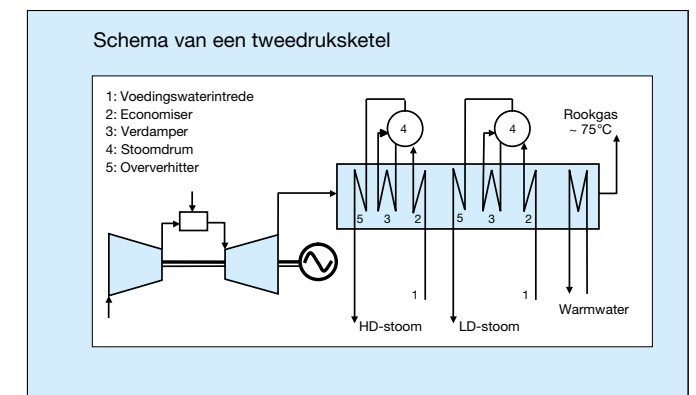
Figuur 17 Bijstook met koudluchtbedrijf



Figuur 19 STEG met by-pass schoorsteen



Figuur 18 STEG met aftap



Figuur 20 Schema van een tweedruksketel



ORC gevoed met rookgassen (Turboden)

een gasturbine verbetert het lage elektrisch rendement met 10 tot 14 procentpunt, bijvoorbeeld van 25 naar 36%. De kracht-warmteverhouding kan daardoor met meer dan 25% toenemen.

Werkingsprincipe

Een ORC is een gesloten systeem waarbij een organische vloeistof (bijvoorbeeld isobutaan, pentaan, hexaan, toluen of ammoniak) wordt verdampt in een warmtewisselaar die in de rookgassen van een gasmotor, gasturbine of warmwaterketel is geplaatst. Het gas expandeert vervolgens in een turbine die een generator aandrijft. In de condensor moet dit gas dan weer condenseren, waarbij het zijn warmte afgeeft aan een warmwaterketel of onbenut aan de omgeving. Het koelen aan de omgeving door middel van tafelkoelers kost veel elektrische energie, wat nadelig is voor het elektrisch rendement (figuur 21). De keuze van het type ORC is sterk afhankelijk van het temperatuurniveau van de warmtebron.

Brandstofcellen

Een brandstofcel werkt niet met mechanische omzetting naar elektriciteit, maar is gebaseerd op een elektrochemische conversietechnologie. Daarin reageert waterstof met zuurstof, wat elektriciteit en waterdamp oplevert. In tegenstelling tot de andere technologieën wordt het rendement van de brandstofcel niet beperkt door het maximale temperatuurverschil over de cyclus (het zogenaamde Carnot rendement). In praktijk treden er echter verschillende verliezen in de componenten van het brandstofcel-systeem op. De commercieel verkrijgbare brandstofcellen hebben een elektrisch rendement van 37 tot 45%, afhankelijk van de brandstofkwaliteit en de werkingssomstandigheden. In de toekomst worden er elektrische rendementen van meer dan 50% verwacht. Door brandstofcellen met andere technologieën te combineren kan een nog hoger systeemrendement behaald worden. Op papier genereert de combinatie van een hogetemperatuurbrandstofcel met een gasturbine, elektrische rendementen van meer dan 70%.

Werkingsprincipe

De brandstofcel zelf bestaat uit twee elektrodes: een anode en een kathode die door een elektrolyt van elkaar gescheiden zijn. Een elektrolyt is een geleidend materiaal waarbij de stroom geproduceerd wordt door positief of negatief geladen moleculen, zogenaamde ionen (figuur 22). Aan de anode wordt waterstof toegevoegd en aan de kathode zuurstof uit de lucht. Het waterstofatoom wordt aan de anode gesplitst in protonen en elektronen. In het elektrolyt diffunderen de protonen (H+) naar de kathode, terwijl de elektronen (e-) via een extern circuit naar de kathodekant gaan. De elektronenstroom die via dit externe circuit loopt, is een vorm van nuttig te gebruiken elektriciteit. Bij de kathodekant komen de protonen en elektronen weer bij elkaar en reageren met de zuurstof, waardoor een watermolecuul ontstaat.

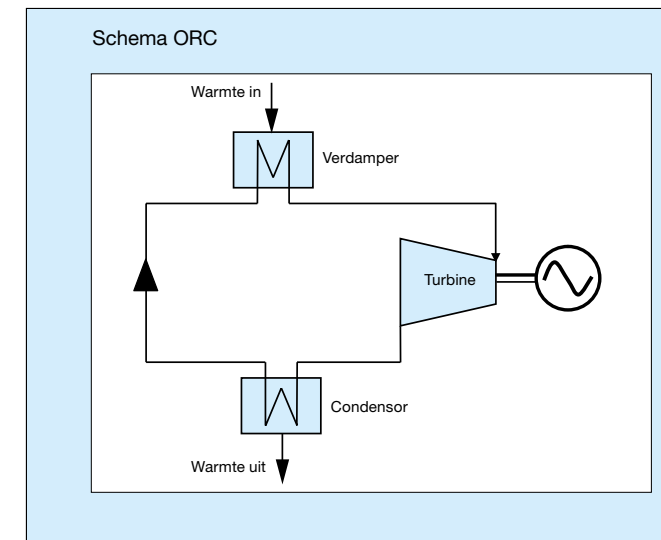
Om het gewenste voltage en vermogen te bereiken, worden de aparte cellen modulair geplaatst. De manier die hierbij het meest gebruikt wordt, is in de vorm van platte 'stacks', waarbij de cellen gestapeld worden. Daarnaast wordt bij hogetemperatuurbrandstofcellen ook de buisvormige 'tubular stack' toegepast. Brandstofcellen worden in het algemeen aan de hand van het type elektrolyt gecategoriseerd. De keuze voor het materiaal van

de elektrolyt bepaalt in grote mate de overige ontwerpvariabelen. Tabel 1 (blz. 44) geeft een overzicht van de karakteristieken van de vijf belangrijkste typen: de Alkaline Fuel Cell (AFC), de Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), de Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC), de Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) en de Solid Oxide Fuel Cell (SOFC).

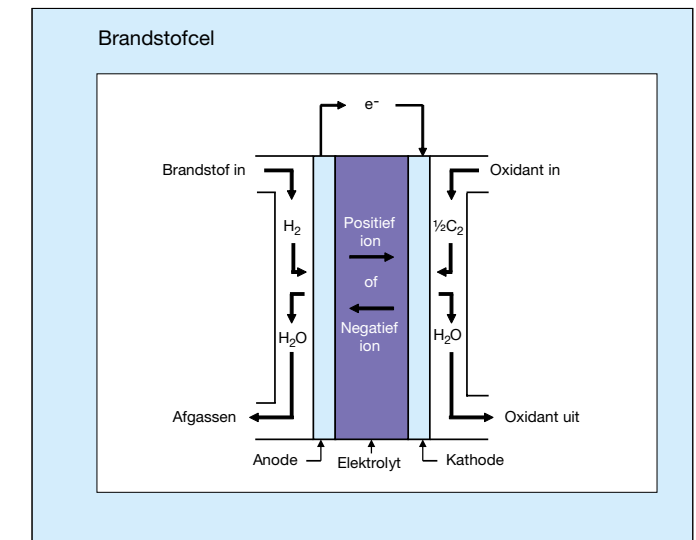
Voor het toepassen van aardgas in brandstofcellen moet aardgas omgezet worden in waterstof. Dit is de zogenaamde 'reforming' van aardgas. Ook dienen verontreinigingen zoals zwavelverbindingen te worden verwijderd. Deze hebben grote invloed op de levensduur van de stack. Bij hogetemperatuurbrandstofcellen (MCFC, SOFC) is de temperatuur voldoende hoog om het aardgas in de brandstofcel zelf te reformen. Bij lagetemperatuurbrandstofcellen (AFC, PEFC en PAFC) is daar een aparte reformer voor nodig. Door de lage werkingstemperatuur zijn deze laatstgenoemde brandstofcellen minder kwetsbaar voor start-stops dan hogetemperatuurbrandstofcellen.

Het SOFC / gasturbine hybride systeem

Door een Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) te combineren met een micro-/minigasturbine kunnen elektrische rendementen van 60



Figuur 21 Vereenvoudigde schematische weergave van een ORC



Figuur 22 Schematische weergave van een brandstofcel (op basis van EG&G Technical Services)

tot 70% behaald worden. Met een door een turbine aangedreven compressor wordt de SOFC op druk gebracht en op 4 bar of hoger (figuur 23) bedreven. Bij deze verhoogde druk verbetert het rendement van de cel. De hogetemperatuurafgassen van de SOFC (ca. 1.000 °C) worden bijgestookt met aardgas. Deze gassen expanderen vervolgens in de turbine, die behalve de compressor ook een generator aandrijft, waardoor er nog meer extra elektriciteit geproduceerd wordt.

Trigeneration

In veel industriële processen en utiliteitscomplexen is er, naast elektriciteit, stoom en warmwater, ook koeling nodig. Trigeneration is hierbij een optie. Dit is een concept waarbij met de restwarmte van de WKK-installatie naast warmte en elektriciteit ook koeling wordt gegenereerd. Een absorptiekoelmachine is het apparaat waarmee de restwarmte wordt benut voor koeling.

Werkingsprincipe absorptiekoelmachine

De werking van een absorptiekoelmachine komt overeen met die van een compressiekoelmachine. In de vloeibare fase komt drukverhoging tot stand door middel van een pomp en niet met een compressor (figuur 24). Verhitting vindt plaats met behulp van restwarmte. Normaal gesproken bevat een absorptiekoelmachine drie vloeistoffen: een interne oplossing van water met lithium en bromide, de vloeistof die gekoeld wordt en het koelwater dat de warmte opneemt.

Daarnaast is er de hittebron (stoom of heetwater) die de cyclus aandrijft. De energie uit de stoom of uit het hete uitlaatgas van de WKK-installatie wordt gebruikt voor de scheiding van de bestanddelen, zoals water en lithium-bromide in de generator. Wanneer

het afgescheiden water na condensatie en expansie op een lagere druk weer (in de verdamper) verdampt, kan de warmte op een lage temperatuur worden opgenomen (de koelzijde). De warmte die in de condensor en de absorber vrijkomt, wordt met koelwater naar een koeltoren afgevoerd.

3.1.2 WKK-ontwerp

Voordat een WKK-installatie geplaatst kan worden, zal eerst de haalbaarheid ervan moeten worden getoetst. De volgende aspecten zijn daarbij van belang (figuur 25, blz. 46):

- De energiebesparing die vooraf kan worden gerealiseerd.
- De hoogte en duur van de elektriciteits- en warmtevrage.
- De geschiktheid van de warmtevrage voor de warmteproductie van WKK (temperatuurniveaus).
- Plannen voor veranderingen in processen die de warmte- of elektriciteitsvraag zouden kunnen beïnvloeden (bijvoorbeeld uitbreidingen).
- Een (on)gelijkzijdigheid van vraag en aanbod.
- De beschikbare ruimte en het dragend oppervlak voor het WKK-systeem.
- Een mogelijke koppeling met het elektriciteitsnet.
- De afstand tot de warmtegebruikers of warmtenetten.
- De inpassing van WKK in relatie met andere voorzieningen zoals ketels, noodstroomgeneratoren en compressie- of absorptiekoelmachines.

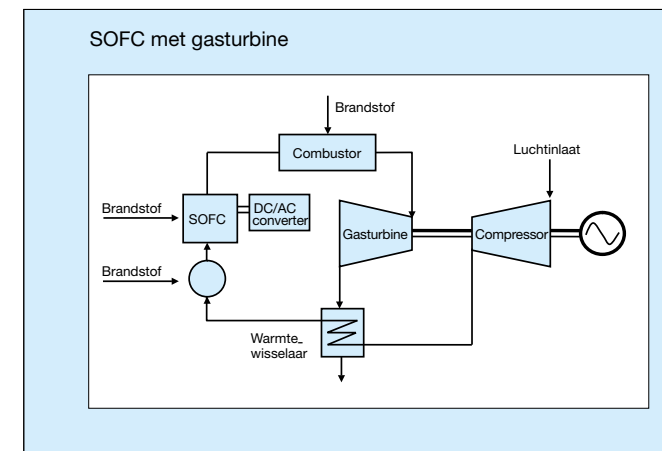
Naast de technische mogelijkheden spelen ook externe factoren een rol, zoals de tarieven tijdens plateau- en daluren, stimuleringsregelingen en de emissiewetgeving. In paragraaf 3.2 wordt uitgebreid op de economische aspecten ingegaan. De emissiewetgeving wordt in paragraaf 3.3 behandeld.

Afkorting	AFC	PEFC of PEM	PAFC	MCFC	SOFC
Type Fuel Cell (FC)	Alkaline	Polymer Electrolyte (Membrane)	Phosphoric Acid	Molten Carbonate	Solid Oxide
Elektrolyt	KOH	Vast ion geleidend membraan	Vloeibaar H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ en K ₂ CO ₃	Ceramiek Y ₂ O ₃ ZrO ₂
Werkings temperatuur	65 - 220 °C	40 - 80 °C	205 °C	650 °C	600 - 1.000 °C
Celrendement	45 - 60%	30 - 60%	40%	45 - 60%	45 - 65%
Vermogen	20 kW	> 1kW - 1 MW	50 kW - 1 MW	1 MW	5kW - 3 MW
Toepassingen	Onderzeeërs, ruimtevaart	Transport klein stationair	WKK	WKK	WKK

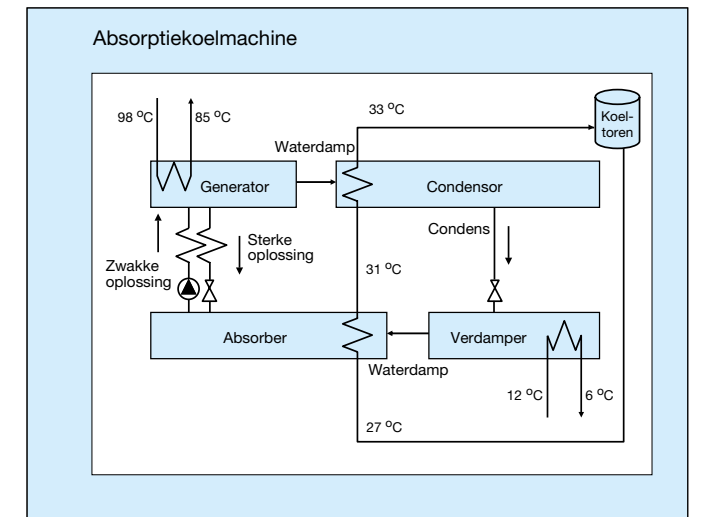
Tabel 1 Types brandstofcellen met hun eigenschappen (EG&G Technical Services)



MCFC-unit Bron: CFC Solutions GmbH



Figuur 23 Schema van een SOFC / gasturbine hybride-systeem

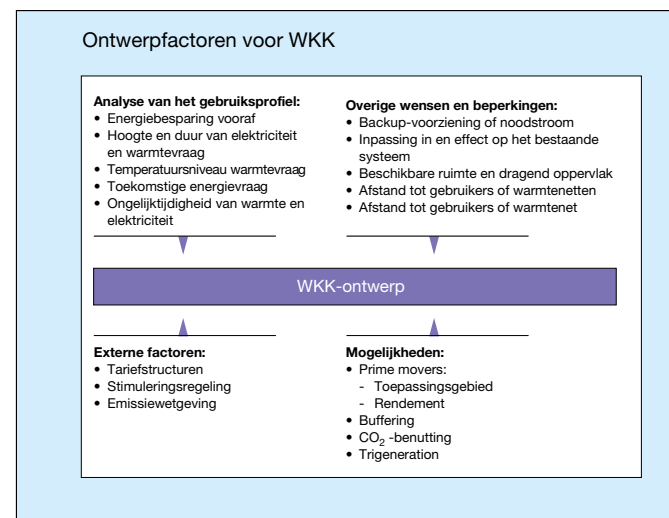


Figuur 24 Principeschema van een absorptiekoelmachine

Analyse van het energieverbruiksprofiel

Het ontwerp van een WKK-installatie begint bij de analyse van het energieverbruiksprofiel. Een investering is gebaseerd op een langetermijnperspectief van ten minste 10 jaar. In de analyse van het energieverbruiksprofiel moeten daarom ook de toekomstverwachtingen worden meegenomen. Dit kunnen zowel uitbreidingen in het gebruik als besparende maatregelen zijn. Nadat deze ontwikkelingen zijn verdisconteerd, blijft er een netto-energieverbruik over waarop de WKK-installatie kan worden afgesteld.

De afstemming van het energieaanbod van een WKK-installatie op de elektriciteits- en warmte- (en koude)behoefte van de gebruiker is complex. Het aantal energiestromen verschilt per sector. Zo wordt er in de industrie naast elektriciteit ook vaak gebruik gemaakt van verschillende stoomsoorten van koeling op verschillende temperatuurniveaus, van ventilatie, van tapwater en van ruimteverwarming. In de glastuinbouw is vooral behoefte aan (kas-)verwarming, elektriciteit en CO₂, terwijl in kantoorgebouwen warmte, elektriciteit en koude nodig is. Naast de inventarisatie van de verschillende energiestromen zijn ook het vermogen en het tijdstip van de vraag belangrijk. Plateau-uren voor elektriciteit zijn de uren op werkdagen tussen 07.00 en 23.00 uur.

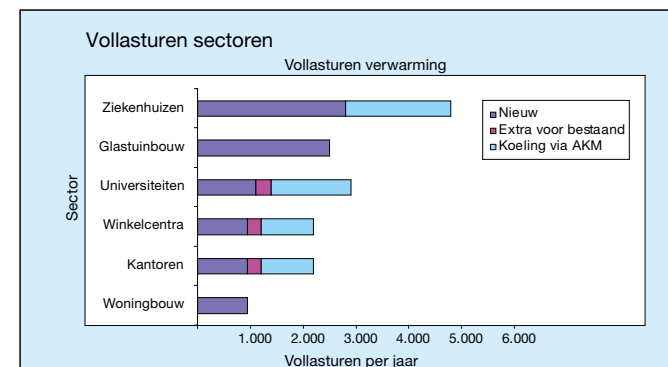


Figuur 25 Factoren die een rol spelen in het ontwerp van een WKK-installatie

Daluren zijn de uren hierbuiten en in het weekend. De inkoop- en teruglevertarieven kunnen aanzienlijk verschillen voor wat betreft plateau- en daluren. Voor de warmtebehoefte moet daarbij ook gekeken worden naar de gewenste temperatuur waarop de warmte beschikbaar moet zijn.

Een analyse van het energieverbruiksprofiel wordt samengevat op basis van het aantal vollasturen en de belastingduurcurve. Het aantal vollasturen is het totale energiegebruik in kWh, gedeeld door het geïnstalleerde vermogen in kW. Voor de toepassing van WKK is een hoog aantal vollasturen aantrekkelijk. Een klein aantal vollasturen duidt op een gebruiker die maar een beperkt deel van het jaar de installatie benut. In figuur 26 is te zien dat voor wat betreft de vraag naar warmte, WKK met name voor ziekenhuizen en de glastuinbouw interessant is. Betrekken we daarnaast de productie van koude in de analyse dan komen ook universiteiten in aanmerking. WKK voor winkelcentra, kantoren en woningbouwprojecten is meestal alleen interessant bij een voldoende schaalgrootte. Hier is het aantal vollasturen beperkt en moet een voldoende schaalgrootte tot een lagere investering per kW leiden om WKK rendabel te maken.

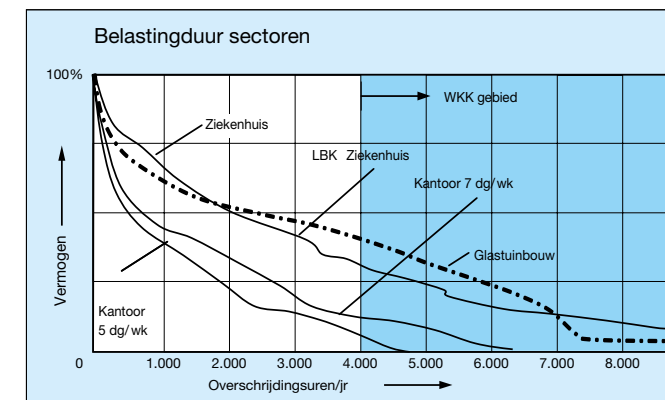
Met behulp van belastingduurcurven kan er snel een eerste schatting van de dimensionering van een WKK-installatie gemaakt worden. In het diagram in figuur 27 wordt het vermogen (de verticale as) uitgezet tegen het aantal uren waarmee dit vermogen over-



Figuur 26 Vollasturen van verwarming in diverse sectoren

schreden wordt (de horizontale as). Het oppervlak in het diagram (kW maal uur) is een maat voor de energievraag. Uit de belastingduurcurven van enkele sectoren blijkt ook dat WKK minder aantrekkelijk is voor kantoren die vijf dagen per week open zijn. Bij 4.000 uur snijdt de curve op nog geen 10% van het maximale vermogen. Dit hoeft echter geen belemmering te zijn als het kantoor in kwestie groot genoeg is.

Door slimme combinaties met een warmtebuffer en een juiste dimensionering van de WKK-installatie is toepassing in kantoren succesvol. Als een WKK-installatie geïntegreerd wordt in het koude- en noodstroomsysteem, kan dat een financieel extra aantrekkelijke optie zijn (zoals in gebouwen van het Europees Parlement). Ook voor kleinere kantoren die zeven dagen per week in bedrijf zijn, kan een WKK-installatie een redelijk alternatief vormen. Aan de hand van dit soort curves zijn vuistregels voor een eerste schatting van het economisch optimale vermogen opgesteld. Op basis van eerdere ervaringen kan namelijk wel een eerste schatting worden gemaakt van het te installeren vermogen van de WKK-installatie (figuur 28). Elke belastingduurcurve is echter uniek en er bestaan grote verschillen binnen de sectoren. Bij een beoordeling van de haalbaarheid moeten er dus altijd eerst energieverbruiksgegevens op uurbasis worden opgevraagd of gemeten. Het werkelijke, maximaal benodigde thermische vermogen van een gebouw komt in veel gevallen niet overeen met het opgestelde thermische vermogen. Door het gebruik van toe-



Figuur 27 Belastingduurcurves warmtegebruik van enkele sectoren (voorbeelden)

slagen en onzekerheden in de warmtebehoefteberekening wordt er vaak zo'n 40% te veel aan thermisch vermogen opgesteld. De methode voor het vaststellen van de benodigde grootte van de WKK-installatie is afhankelijk van de situatie. In principe zijn er twee situaties:

- Gebouwen waarvan het historische jaarverbruik bekend is.
- Nieuwe gebouwen waarvan het energieverbruik niet bekend is.

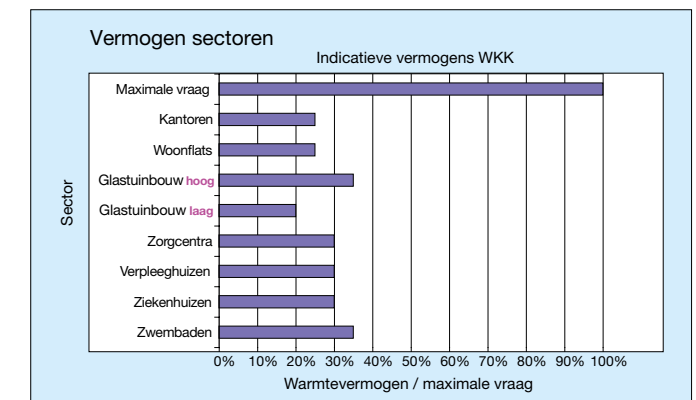
Deze situaties zijn in bijlage 2 achter in dit boek verder uitgewerkt.

Ontwerpaspecten

Bij het ontwerp van een WKK-installatie vormt de belastingduurkromme een uitgangspunt. Daarnaast spelen ook andere aspecten een belangrijke rol, namelijk die aspecten waarmee de bedrijfstijd verlengd of de rentabiliteit van de WKK-installatie verbeterd kan worden. Hieronder volgt een aantal voorbeelden.

a) Het afvlakken van de warmtepiekvraag

In sommige gevallen is er een sterke piek in de warmtevraag. Dan moet er gezocht worden naar mogelijkheden waarmee de netto-warmtevraag dezelfde blijft, maar waarbij de WKK-installatie meer draaiuren maakt. Een eerste mogelijkheid hiervoor is om bij goed geïsoleerde gebouwen geen of minder nachtverlaging toe te passen. Bij opwarming van het gebouw in de ochtenduren ontstaat er namelijk een piek in de vraag, die slechts gedeeltelijk



Figuur 28 Vuistregels voor een eerste schatting van het te plaatsen WKK-vermogen

door de WKK-installatie kan worden gedekt. Na werktijd staat de WKK-installatie enkele uren stil omdat het gebouw langzaam afkoelt. Vooral de uren na werktijd zijn ongunstig, omdat tot 23.00 uur nog steeds het hogere plateautarief voor elektriciteit geldt waarin de WKK-installatie rendabel kan draaien.

b) Warmtebuffering

Een andere mogelijkheid is het toepassen van warmtebuffering. Dit kan bijvoorbeeld in de massa van het gebouw (betonkernactivering) maar ook in warmwaterbuffers of in de warm tapwatervoorraad. Door buffering kan er meer vermogen aan WKK geïnstalleerd worden en kunnen deze grotere systemen bovendien nog meer draaiuren maken. Beide aspecten verbeteren de economische haalbaarheid van de WKK-installatie. Naast redenen van afvlakking van het vraagprofiel heeft buffering ook tot doel tijdens plateau-uren, waarin het elektriciteitstarief aanmerkelijk hoger is, een maximale hoeveelheid elektriciteit te leveren. In figuur 29 is een voorbeeld gegeven van het effect van buffering op het te installeren vermogen.

Door de wisselende seizoenen kan de warmtevraag sterk verschillen. Langetermijn-energieopslag (LTEO) in aquifers is dan een mogelijke oplossing. Bij dit proces wordt overtollige warmte afgegeven aan een gesloten circuit dat uit twee bronnen bestaat: een warmte- en een koudebron. Het water uit de koudebron wordt 's zomers tot maximaal 30 °C opgewarmd en naar de ondergrondse opslag gepompt. Tijdens de periode waarin de warmte nodig is, kan dit warme water worden opgepompt. Deze warmte wordt opgenomen door een warmtepomp en vervolgens afgekoeld weer naar de koude bron gepompt. De warmteverliezen in de diepe bodem (80 tot 200 meter diep) zijn gering.

Wat is leidend: warmte of elektriciteit?

Het ontwerp van een WKK-installatie wordt in hoge mate bepaald door de specifieke toepassing van de installatie. Voorbeelden:

- In de procesindustrie kan het voorkomen dat een afnemer alleen geïnteresseerd is in stoom. De geproduceerde elektriciteit wordt dan ter plaatse gebruikt of aan het net teruggeleverd. Het net wordt dan gebruikt om te 'balanceren'.
- Voor een tuinder met gewasbelichting kan de situatie andersom zijn en is juist de elektriciteitsvraag leidend.

- Bij toepassing in een ziekenhuis is vooral de betrouwbaarheid van de energievoorziening bepalend. Om deze betrouwbaarheid te waarborgen, kunnen er diverse units worden geïnstalleerd.

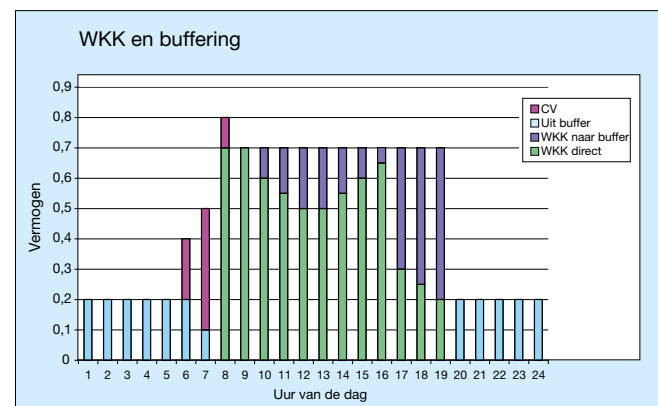
Daarnaast is het belangrijk te weten of de productie van warmte en elektriciteit voor eigen gebruik is, voor klanten of dat zij aan het elektriciteitsnet wordt teruggeleverd.

WKK als onderdeel van de energievoorziening

Een WKK-installatie wordt doorgaans voor de basislast gebruikt. Aanvullende ketels verzorgen de piekbelasting en dienen als back-up. Voor elektriciteit dient het elektriciteitsnet met name voor de opvang van pieken en als back-up. In een sector waar betrouwbaarheid essentieel is, zoals in ziekenhuizen, wordt de hele energie-installatie zo ontworpen dat er in geval van stroomuitval of uitval van een van de onderdelen, altijd voldoende elektriciteit en warmte geproduceerd wordt. Zo is er in het UMC Utrecht één afgassenketel nageschakeld aan drie gasmotoren die in principe aan de volledige warmte- en elektriciteitsvraag kunnen voldoen. Als reserve staan er bovendien nog twee ketels en een dieselmotor opgesteld. Verderop in dit hoofdstuk wordt nader op de inpassing van de WKK-installatie in het (bestaande) systeem ingegaan.

De invloed van tariefstructuren

Sommige bedrijven kopen hun elektriciteit in tegen tarieven die per uur worden vastgesteld. Het moment van de elektriciteits-



Figuur 29 Effect van buffering op het te installeren vermogen

productie is dan van wezenlijk belang voor een rendabele bedrijfsvoering van de WKK-installatie. Dit geldt in mindere mate ook voor bedrijven die op basis van plateau- en daluren of gedurende een week op basis van andere inkoopblokken inkopen. Dit komt nader aan de orde in paragraaf 3.2.

Ook de vraag of elektriciteit op de locatie gebruikt kan worden ('achter de meter') of wordt teruggeleverd aan het net, is van belang. Zo kan het tijdens piekuren interessant zijn om aan het net terug te leveren, terwijl dat tijdens daluren niet het geval is. Uit economische overwegingen kan het aantrekkelijk zijn de WKK-installatie van noodkoelers te voorzien, zodat er enkele uren per jaar elektriciteit geleverd kan worden om 'pieken' weg te draaien, of om op uren met een extreem hoog tarief de elektriciteit zelf op te kunnen wekken zonder dat de warmte benut wordt. Met noodkoelers is het ook mogelijk het systeem te testen zonder afhankelijk te zijn van de warmtevraag.

Opslagtank voor buffering bij een tuinder



Prikkels van de overheid: belastingvrijstelling, subsidie

Vanuit de overheid zijn er diverse stimuleringsregelingen die de toepassing van WKK aantrekkelijker maken. In paragraaf 3.2 wordt een aantal landelijke subsidies en financieringsmogelijkheden besproken die er anno 2008 zijn.

De benutting van rookgassen

De warmte uit de rookgassen van een WKK-installatie kan op verschillende manieren worden ingezet, namelijk:

- Voor de productie van stoom en/of warmte.
- Direct voor industriële processen zoals ovens en drogers.
- Voor het verdampen van LNG.
- Voor CO₂-bemesting bij tuinders.

Vaak is er reiniging van de rookgassen nodig voordat deze gassen direct ingezet kunnen worden, zoals in het geval van CO₂-bemesting en het drogen van voedingsmiddelen.

Om rookgassen van gasmotoren geschikt te maken voor CO₂-bemesting in de kas, is reiniging van het rookgas ter verlaging van (met name) het NO_x- en het etheen (C₂H₄)-gehalte noodzakelijk. Zo kan een tuinder bijvoorbeeld door het gebruik van een rookgasreinigingsinstallatie de bedrijfstijd van de WKK-installatie met minimaal 1.500 uur verlengen. Ook krijgt hij de beschikking over meer CO₂ in de kas doordat er per eenheid warmte bijna twee keer zoveel gas verstoekt wordt met een WKK-installatie als met een ketel. Een deel van het gas wordt immers in elektriciteit omgezet. Per m³ benodigde CO₂ hoeft er dan niet zoveel warmte in de aanwezige buffer te worden opgeslagen.

De inpassing van een WKK-systeem

Het inpassen van een WKK-systeem is zowel in hydraulisch als elektrisch en bouwkundig opzicht geen eenvoudige zaak. Op hydraulisch vlak kan er het een en ander misgaan bij een te hoge temperatuur in de aanvoer naar de WKK-installatie. Op elektrisch gebied mogen het eigen en het landelijke net geen hinder hebben van het systeem en mag deze installatie niet tot onveilige situaties leiden. Op bouwkundig vlak moet er rekening gehouden worden met geluid, trillingen en ventilatie van de WKK-installatie, de schoorsteen, de plaats van uitmonding ten opzichte van belendende percelen, het volume en het gewicht.

Hydraulische inpassing

De hydraulische inpassing van een WKK-installatie bij stoomproductie is eenvoudiger (maar niet per definitie veiliger) dan de inpassing bij warm water. In het geval van warm water moet bij de bepaling van de configuratie rekening gehouden worden met het volgende:

- De temperatuur van het water dat de WKK-installatie verlaat moet zo hoog mogelijk zijn, in verband met een optimale warmteoverdracht (goedkopere warmtewisselaars) en een zo klein mogelijke waterstroom (hoger temperatuurverschil voeding-retour).
- Bij een combinatie met HR-ketels in plaats van met conventionele ketels, moet er parallel en niet in serie geschakeld worden. HR-ketels die met voorverwarmd water gevoed worden, hebben geen condenserend effect meer en halen daardoor niet het gewenste rendement.
- De temperatuur van het retourwater naar de WKK-installatie mag de specificaties van de fabrikant (meestal maximaal 70 °C) niet overschrijden.

Daarnaast moet er een keuze gemaakt worden tussen: parallelle of seriële schakeling van WKK en ketels en het wel of niet toepassen van een warmtebuffer. Bij parallelle schakeling wordt het benodigde warmtevermogen bepaald door het meten van de retourwaterhoeveelheid van het CV-systeem en van het temperatuurverschil tussen de toe- en afvoer.

Op basis van dit warmtevermogen wordt bepaald wanneer de WKK-installatie in moet schakelen en op welk vermogensniveau (vollast of deellast). De regelstrategie is dan als volgt (figuur 30):

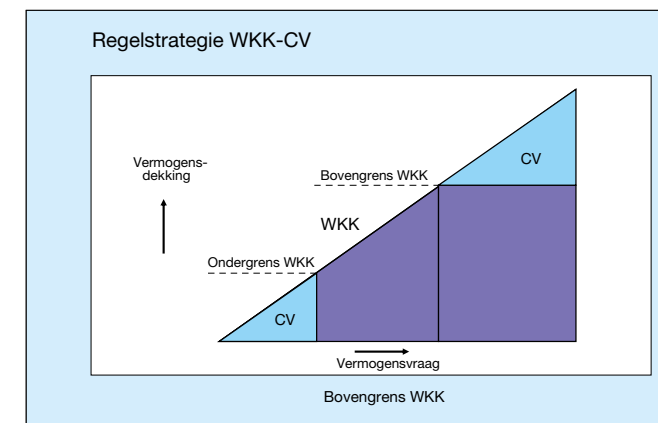
- Als het vermogen kleiner is dan de ondergrens van de levering door de WKK-installatie wordt alleen de ketel ingezet.
- Als het vermogen groter is dan de ondergrens van de WKK-installatie treedt alleen de WKK-installatie in werking.
- Als het vermogen groter is dan de bovengrens van de WKK-installatie wordt naast de installatie ook de ketel in gebruik genomen.

Bij een eventueel optredend warmtevermogensoverschot kan er gebruik worden gemaakt van een warmtebuffer die parallel aan de WKK-installatie is ingepast. De WKK-installatie voedt de buffer dan met het overtollige hete water totdat deze buffer vol is. Wanneer de WKK-installatie minder vermogen kan bieden dan de vraag, kan er vanuit de buffer automatisch extra warmtevermogen worden betrokken. De temperatuursregeling staat hierbij volledig los van de centrale verwarmingsregeling en de hydraulische regeling; de WKK-installatie en de warmtebuffer zijn een zelfstandige regelunit geworden (figuur 31).

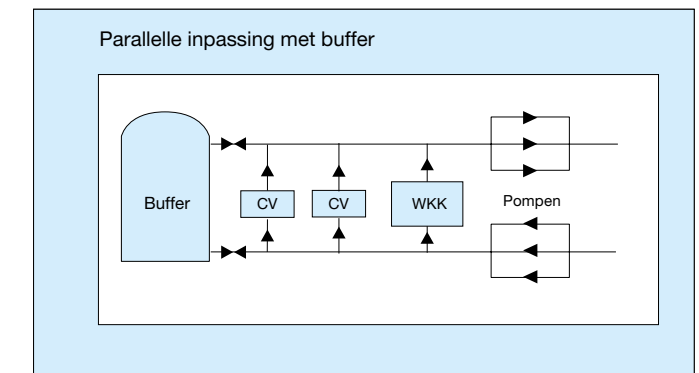
Bij een seriële inpassing wordt het retourwater van het CV-systeem voorverwarmd voordat het naar het primaire circuit gebracht wordt. Ook hier wordt inschakeling door middel van een 'forward regeling' op basis van de warmtevermogensvraag (waterhoeveelheid en temperatuurverschil) aanbevolen. De inschakeling van de verwarmingsketel wordt vertraagd of zodanig afgesteld dat de afwijking ten opzichte van de gewenste waarde naar beneden gering is, waardoor de WKK-installatie kan doordraaien. Het grote voordeel van een seriële inpassing is dat de WKK-regeling onafhankelijk van de ketelregeling draait. In bijlage 1 wordt de hydraulische inpassing van zowel water als stoom uitvoerig toegelicht.



CO₂-bemesting wordt vaak toegepast in de glastuinbouw



Figuur 30 Voorbeeld van regelstrategie



Figuur 31 Voorbeeld van parallelle inpassing met een buffer

Elektrische inpassing

Voor de elektrische inpassing van een WKK-installatie zijn er verscheidene configuraties denkbaar. Een voorbeeld is in figuur 32 gegeven. Voor kleine systemen (tot 1 MWe) is aansluiting op het 400 V-net het meest gangbaar. Voor grotere systemen (groter dan 2 MW) kan gekozen worden voor een laagspannings- of een middenspanningsgenerator (10 kV). De benodigde schakel- en besturingsapparatuur op middenspanningsniveau is duurder dan de apparatuur uit de massaproductie van 400V. Het kan dus zijn dat er geen verschil optreedt qua investeringskosten. Ook het elektrisch rendement van de 400V-generator in combinatie met een goede step-up transformator is nog altijd aantrekkelijker dan een middenspanningsgenerator. Daarnaast is er voor het bedienen en onderhouden van een middenspanningsinstallatie een hoger opgeleide monteur nodig en deze is niet altijd beschikbaar. In alle gevallen moet rekening worden gehouden met het eigen gebruik van randapparatuur zoals pompen en ventilatoren.

Omdat teruglevering aan het net nog steeds erg weinig oplevert, zal de elektriciteit in het algemeen zoveel mogelijk voor eigen gebruik worden ingezet. Dit geldt met name voor nachtstroom (daluren) gedurende de avond en in het weekend. Een overeenkomst met een energiebedrijf over levering op afgesproken tijden levert vaak wél extra voordeel op. Als een WKK-installatie voor noodstroom wordt ingezet, moet er rekening worden gehouden met de opstartbelasting en met fluctuaties van de elektriciteitsvraag op het net (figuur 33).

Voor de opstartprocedure is het van belang dat de WKK-installatie, nadat deze op toeren is, niet met de volle belasting bijgeschakeld hoeft te worden. De gasmotor kan zo'n proces niet aan en dus zal het toerental dalen en de machine in het ergste geval in storing gaan. De preferente noodstroomgroepen moeten in kleine stapjes, met niet meer dan 25% van het vollastvermogen van de WKK-installatie per stap, worden ingeschakeld. Dit mag totdat er een vermogen van 50% bereikt is. Daarna worden de stappen kleiner, namelijk zo'n 15% per stap, totdat 85% van het vollastvermogen bereikt is.

Moderne gasmotoren kunnen geen sterke belastingfluctuaties aan. Door de lengte van de gasregelstraat is de responsietijd van

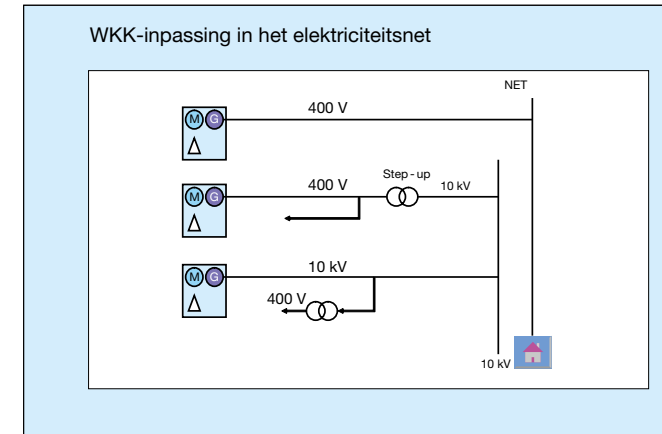
de brandstof toevoer te lang, wat inhoudt dat een noodstroomdieselmotor de belastingtoppen moet afvlakken of dat de vermogensvraag op een andere manier moet worden afgetopt. De inzet van grotere accubatterijen als noodstroombuffer is duur. Bovendien vergen deze batterijen tijdens de standby-situatie onderhoud en veel stroom. Leveranciers zijn dan ook druk bezig om hier een passende oplossing voor te vinden.

Inpassing in gebouwen en omgeving

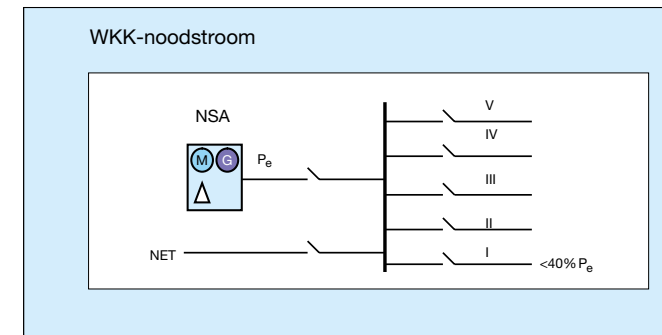
De inpassing van WKK-installaties in een gebouw vraagt de nodige aandacht. Niet alleen het geluid en de trillingen spelen hierbij een rol, maar ook het volume en het gewicht (figuren 34 en 35). Evenals bij ketels moet er rekening worden gehouden met de verbrandingsluchttoevoer, de benodigde ventilatieluchttoevoer en de rookgasafvoer. Om aan toekomstige milieueisen tegemoet te kunnen komen, kan het noodzakelijk zijn om in de opstellingsruimte extra plaats te reserveren voor volumineuze rookgasreinigers en voor katalysatoren. Als WKK-installaties, om de geluidsbelasting te beperken, in een container worden geplaatst, brengt dit een hoger gewicht en volume met zich mee. WKK-installaties groter dan 1,5 MWe zijn te groot om in een zeecontainer te passen.

Samenvattend kan gesteld worden dat het inpassen van een WKK-installatie zowel op hydraulisch als op elektrisch en bouwkundig gebied de nodige aandacht vraagt. De toepassing van warmtekracht komt in gevaar als deze niet goed begeleid of uitgevoerd wordt. Het opnieuw hydraulisch inpassen van een installatie kan hoge kosten met zich meebrengen. Daarnaast is de inpassing in de omgeving ook een punt van aandacht. Zo kunnen trillingen grote overlast in de bewoonde omgeving veroorzaken en het oplossen daarvan is geen sinecure. Ook het wegwerken van contactgeluiden met behulp van flexibele verbindingen en/of contactscheidingen is een speciale tak van sport. Daarnaast vormen uitlaatgaspijppgeluiden (schoorstenen) een zeer gevoelig punt voor mensen die met een open raam slapen; dit geluid is soms diverse huizenblokken verderop te horen. Het verhelpen van geluidsoverlast met extra geluiddempers is in verband met ruimtegebrek vaak zeer lastig.

Ook de uitmonding van de rookgasafvoer van een WKK-installatie (als het gaat om een rookgascondensator in de gebouwde

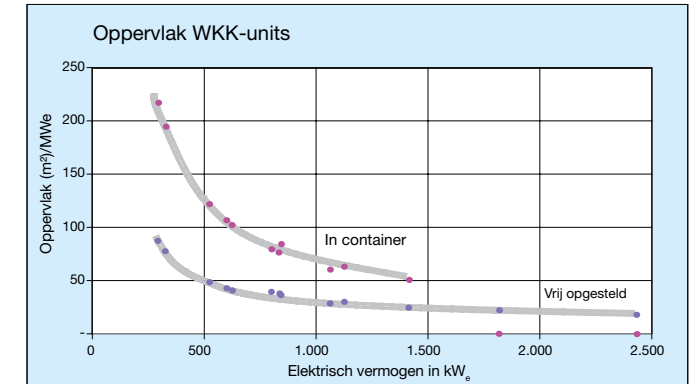


Figuur 32 Inpassing van de WKK-installatie in het elektriciteitsnet

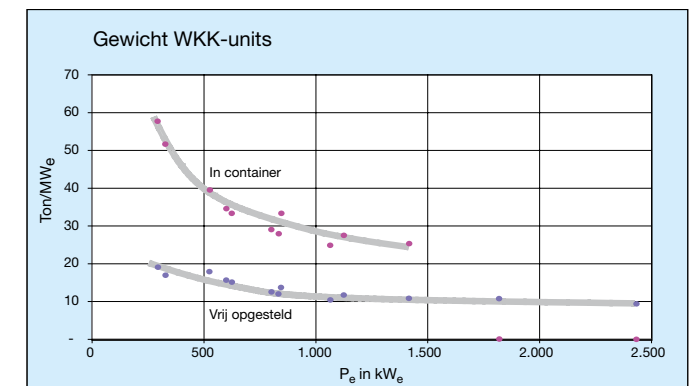


Figuur 33 WKK ingezet als noodstroomaggregaat

omgeving) vereist extra zorg, want de rookgassen hebben geen opwaartse kracht meer om op te stijgen, met zichtoverlast overdag in de vorm van mist als gevolg. Verdunning van de rookgassen met lucht geeft enige verlichting voor dit probleem. Bij een juiste uitvoering is de engineering (ontwerp, techniekkeuze en inpassing) van een WKK-installatie een garantie voor het slagen van de WKK-toepassing, zowel in technisch als in financieel opzicht.



Figuur 34 Benodigde oppervlak van een WKK-installatie op basis van een gasmotor



Figuur 35 Gewicht van een WKK-installatie op basis van een gasmotor

3.1.3 Gebruiksaspecten

Commercieel-economische aspecten

Voor de gebruiker is een rendabele exploitatie van een WKK-installatie essentieel. Bij de keuze voor een bepaald type WKK-installatie spelen verschillende commercieel-economische aspecten een rol. De extra investering kan worden terugverdiend door extra opbrengsten te genereren met levering van elektriciteit aan het

net. De WKK-installatie kan echter ook kosten besparen door het vermijden van inkoopieken en een zeer zware netaansluiting. De installatie wordt dan gebruikt om de piekbelasting op te vangen. Om te voorkomen dat de piekbelasting op de aansluiting te hoog wordt en dat daarmee de kosten alsnog hoog uitvallen, moet de bedrijfszekerheid van de installatie hoog genoeg zijn. Door de installatie met andere functies, zoals noodstroombedrijf te integreren, worden eventuele andere investeringen in bijvoorbeeld een noodstroomaggregaat vermeden. Deze kosten kunnen dan aan de WKK-installatie worden toegerekend, waardoor de totale investering voor de bepaling van de rentabiliteit lager uitvalt. In paragraaf 3.2 wordt verder ingegaan op de belangrijkste aspecten van de economische analyse: de exploitatieberekening en de investeringskosten van de WKK-installatie.

Betrouwbaarheid en beschikbaarheid

Een WKK-installatie is ieder jaar een aantal uren uit bedrijf als gevolg van onderhoud en eventuele storingen. Vooraf wordt er een planning gemaakt van het aantal uren en het tijdstip waarop onderhoud plaatsvindt. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de beschikbaarheid en de betrouwbaarheid van een installatie. De beschikbaarheid is een maatstaf voor het totaal aantal uren dat een installatie uit bedrijf is, inclusief storingen en gepland onderhoud. De betrouwbaarheid geeft de tijd aan waarin de installatie buiten de uren voor gepland onderhoud uit bedrijf is. In paragraaf 3.4 wordt aandacht besteed aan de aard van het onderhoud en aan storingen voor een WKK-installatie. Daarom wordt in de huidige paragraaf slechts kort stilgestaan bij twee verschillende methodes voor de berekening van betrouwbaarheid en beschikbaarheid.

Het gebruik van een WKK-installatie verschilt per gebruiker. Grofweg zijn er twee soorten gebruikers. In een sector zoals de industrie maakt een installatie het maximaal aantal mogelijke draaiuren (8.760 uur in een normaal jaar). De uren dat een installatie als gevolg van onderhoud of storingen buiten bedrijf is, kunnen dan niet worden ingehaald. Een tweede soort gebruikers omvat de sectoren waarin een installatie op basis van een van tevoren vastgesteld draaiurenpatroon draait. Er wordt dan van uitgegaan dat de installatie altijd draait als de gebruiker dat wenst. Onderhoud aan de installatie moet plaatsvinden op momenten dat er niet gedraaid wordt, of (wanneer het niet

anders kan) in periodes waarin de afnemer het minder belangrijk vindt dat de installatie draait. Voorbeelden van dergelijke momenten voor de glastuinbouw zijn het vervangen van de teelt (in oktober en november) of de zomermaanden, wanneer er niet of nauwelijks belicht wordt. Voor WKK-installaties in andere sectoren kan dit bijvoorbeeld tijdens een weekend of tijdens de feestdagen zijn.

In principe kan de beschikbaarheid van een WKK-installatie (totaal of op basis van storingen) in sectoren met een van tevoren vastgesteld draaiurenpatroon hoger liggen dan als deze 'jaarrond' draait. Het meeste onderhoud kan doorgaans buiten de geplande draaiuren gepland worden. De totale beschikbaarheid kan in principe gelijk worden aan de betrouwbaarheid, of zelfs 100% zijn als de storingen met extra draaiuren gecompenseerd kunnen worden. Dit gaat echter niet altijd op. Als elektriciteit bijvoorbeeld op vooraf vastgestelde uren wordt verkocht, kan een storing tijdens deze uren niet meer 'ingehaald' worden.

Uitgangspunt is het minimaliseren van storingen door preventief onderhoud. Daarnaast kunnen storingen door een goed monitoringssysteem vroegtijdig gesignaleerd worden en kan vóór het optreden ervan worden ingegrepen. Het is daarom belangrijk een goed onderhoudscontract af te sluiten, zodat alle onderhoudstaken volgens planning gebeuren, de monitoring en analyse professioneel worden uitgevoerd en de storingsrespons optimaal verloopt. Een en ander moet goed met de onderhoudspartijen worden afgesproken.

De uitstraling van een WKK-installatie

Naast financiële overwegingen kan ook het imago van WKK-installaties een rol spelen bij een investering in de energievoorziening. Door een groeiende aandacht in de samenleving voor reductie van broeikasgasemissies en energiebesparing worden efficiënte technieken als WKK steeds belangrijker. Met een WKK-installatie kan ten opzichte van gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit aanzienlijk op primair energieverbruik worden bespaard. Doordat de benodigde energie dicht bij de gebruiker opgewekt wordt, zijn de transportverliezen minimaal. Zo levert een WKK-installatie een bijdrage aan het terugdringen van de uitstoot van CO₂, wat voor werknemers, consumenten en moederbedrijven belangrijk is. Ook aandeelhouders hechten

hogere waarde aan 'groene bedrijven'. Naast een milieubelang speelt daarbij ook het feit dat bedrijven met een WKK-installatie minder kwetsbaar zijn voor fluctuaties in de olieprijs, een rol.

Noodstroom, reserve en dual fuel

In sommige sectoren, zoals de zorg, is continuïteit van de energievoorziening cruciaal. Met slimme ontwerpen kan de redundantie worden verhoogd, bijvoorbeeld door verscheidene kleine units volgens het n-1 principe te installeren. Het n-1 principe houdt in dat een enkele unit te allen tijde in storing mag gaan zonder dat de gebruikers dit merken. Met name ziekenhuizen gebruiken gasmotoren om bij een uitval van het elektriciteitsnet snel weer in bedrijf te kunnen komen.

Er zijn diverse mogelijkheden om storingen in het net op te vangen:

- Een bewakingssysteem bepaalt op ieder moment van de dag de vraag van elke gebruikersgroep en de levering van de gasmotoren. Zodra het net uitvalt, gaat het systeem direct op eilandbedrijf over. Om vraag en aanbod weer in evenwicht te brengen, schakelt een aantal groepen met een lage prioriteit direct af. Daarna komt een eventueel afgeschakelde gasmotor weer in bedrijf, waarna de afgeschakelde groepen stuk voor stuk worden bijgeschakeld tot het maximum is bereikt (dit is de situatie in het UMC Utrecht).
- De gasmotoren draaien tijdens plateau-uren op een zodanig niveau dat er constant een klein vermogen vanuit het net wordt ingevoerd. Bij een storing op het net worden de gasmotoren afgekoppeld en gaat het bedrijf 'door het donker'. De vitale bedrijfsonderdelen putten hun elektriciteit uit batterijen (UPS: Uninterrupted Power System). De noodstroomaggregaten op dieselolie, waarmee het preferente net gevoed wordt, worden ingeschakeld en daarna nemen de gasmotoren het over totdat alle groepen weer van stroom zijn voorzien (dit is de situatie in het UMC Groningen).

De onderlinge regeling moet bij diverse eenheden goed zijn afgesteld om problemen te voorkomen. Dit is een tamelijk complex proces, met name als er sprake is van sterke belastingfluctuaties. Daarnaast zal er bij een start waarbij er geen stroom beschikbaar is, een 'black start'-voorziening aanwezig moeten zijn. Een 'black start'-voorziening is een accubatterij die voldoende vermogen heeft om de WKK-installatie te starten.

Tot slot wordt er ook wel gebruik gemaakt van dual fuel-motoren, die zowel op diesel als op aardgas functioneren. Deze systemen bieden uitkomst voor situaties waarin het gasnet uitvalt.



Gelijktijdige opwekking van warmte en elektriciteit met de ROCA3-centrale. Bron: Corbis

3.2 Economische analyse

Doordat een WKK-installatie zowel warmte als elektriciteit opwekt, vervangt zij de elektriciteitsinkoop uit het net en de warmte- of stoomproductie met een (gasgestookte) ketel. Vaak moet er nog wel een deel van de energiebehoefte uit het net worden ingekocht. De totale, oorspronkelijke energiebehoefte wordt aangeduid als referentiesituatie. Ten opzichte van deze referentiesituatie zonder WKK, meestal een ketelbedrijf in combinatie met inkoop van elektriciteit, heeft een WKK-installatie een aantal voor- en nadelen. Een WKK-installatie vergt een hogere investering, leidt tot extra brandstofverbruik op locatie en vraagt om extra aandacht voor onderhoud en inpassing in bestaande systemen. Daar staat echter tegenover dat WKK geld oplevert door het geheel of gedeeltelijk vermijden van de inkoop van elektriciteit en/of door de verkoop daarvan. De economische analyse van een WKK-installatie is vaak complex. In dit blok is deze totale economische analyse opgesplitst in deelonderwerpen.

In de eerste subparagraaf wordt ingegaan op de belangrijkste aspecten van de economische analyse in de exploitatieberekening. Daarna komen de investeringskosten van de WKK-installatie en de invloed van energiemarkten en -contracten aan bod. Vervolgens wordt kort aandacht besteed aan de bestaande vormen van ondersteuning voor WKK en aan de basisprincipes van de rentabiliteitsberekening. Aan het eind van deze paragraaf volgt een drietal voorbeelden van verschillende typen WKK-installaties.

3.2.1 Basisprincipe economische analyse

Een economische analyse van de investering in WKK is een complexe berekening. De WKK-installatie vervangt immers (gedeeltelijk) de energieopwekking met bestaande technologieën (zoals de ketel) en de inkoop van elektriciteit uit het net door de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit in één apparaat.

Dat betekent dat de WKK-installatie meestal vergeleken moet worden met de situatie van inkoop van elektriciteit en separate

opwekking van warmte door middel van gas. Na de analyse van de technische inpassing (qua principe beschreven in paragraaf 3.1.2) worden de implicaties voor de energiehuishouding berekend. Deze moeten vertaald worden in een economische analyse. Met deze analyse kan dan de kostenbesparing worden berekend die gedurende de levensduur mogelijk is. Deze kostenbesparing wordt vervolgens afgezet tegen de benodigde (extra) investering in het WKK-project en daarmee wordt dan de haalbaarheid of rentabiliteit van de WKK-installatie bepaald (figuur 1).

In het stroomdiagram op blz. 57 (figuur 2) zijn de belangrijkste stappen en aandachtspunten voor de economische berekening schematisch verder uitgewerkt. De invoer voor de hier getoonde berekening bestaat uit:

- De energieverbruiken en -productie met en zonder WKK.
- Uitgangspunten ten aanzien van tarieven (zoals netwerktarieven en belastingen) en prijzen (met name voor gas en elektriciteit).
- Kosten voor beheer en onderhoud.
- De benodigde investering.

Met deze gegevens kan de exploitatieberekening van de WKK-installatie ten opzichte van de situatie zonder WKK gemaakt worden en kan de rentabiliteit van het project worden berekend.

Referentiesituatie

De economische prestatie van een WKK-installatie staat niet op zichzelf, maar wordt vergeleken met een situatie zonder WKK. Het is hierbij van belang vooraf goed vast te leggen met welke situatie de totale economische prestatie van het WKK-project wordt vergeleken, de zogenaamde 'referentiesituatie'. Er zijn twee standaard referentiesituaties:

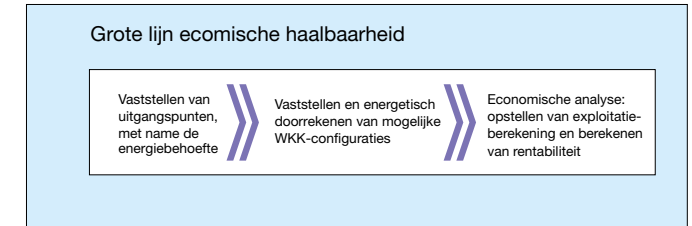
- De gebruiker gaat alleen de warmte uit de WKK-installatie gebruiken. Hier vormt een 'standaard' aardgasketel normaliter de referentie waarmee de WKK-installatie vergeleken wordt. De geproduceerde elektriciteit wordt dan volledig tegen een commerciële prijs aan het net geleverd.
- De gebruiker heeft als doel om zowel de warmte als de elektriciteit uit de WKK-installatie voor eigen gebruik in te zetten. Hier vormt de ketelsituatie in combinatie met de inkoop van elektriciteit uit het openbare net de referentie. Het overschot aan elektriciteit wordt dan aan het openbare net geleverd en het tekort wordt ingekocht.

Er zijn varianten op deze referentiesituaties denkbaar, bijvoorbeeld een situatie waarin de gebruiker al een WKK-installatie heeft of een situatie waarin de warmte van derden wordt ingekocht of aan derden wordt geleverd.

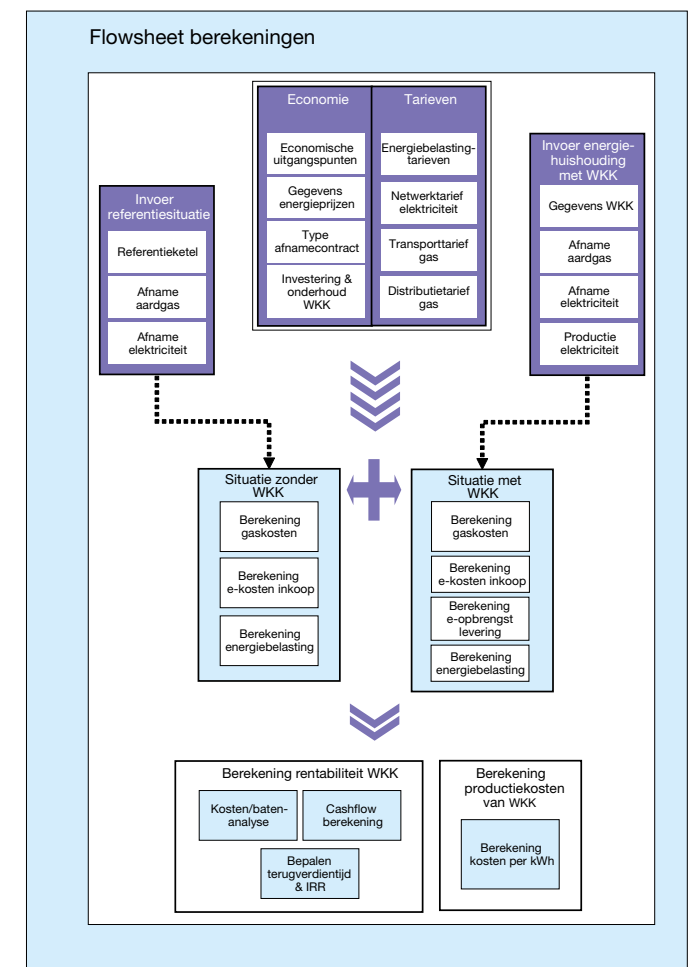
Als de gebruiker de economische prestaties van twee verschillende WKK-installaties voor zijn specifieke situatie door wil rekenen om na te gaan welk type het best bij zijn energiehuishouding past, kunnen beide installaties met de vooraf vastgestelde referentie vergeleken worden. Daardoor zijn de resultaten voor de beide WKK-installaties onderling ook weer vergelijkbaar.

Exploitatieberekening

De economische haalbaarheid van een WKK-installatie wordt berekend door gedurende de voorziene looptijd van het project de exploitatiebaten en -lasten voor de situatie met en zonder WKK te bepalen. Daarmee wordt het verschil (het exploitatieresultaat) voor beide situaties bepaald. Uiteindelijk wordt het exploitatieresultaat tegen de (extra) investering in de WKK-installatie afgezet.



Figuur 1 Globale doorloop economische berekening



Figuur 2 Details economische berekening

Tabel 1 geeft een schematische vergelijking van de exploitatie van een WKK-installatie met die van een ketel. In beide situaties komt het onderhoud van de ketel terug. Doorgaans wordt ervan uitgegaan dat deze onderhoudskosten aan elkaar gelijk zijn, waardoor ze ten opzichte van elkaar wegvallen. Vereenvoudigd kan gesteld worden dat door de WKK-installatie de gasinkoop zal stijgen terwijl de elektriciteitsinkoop zal dalen. Door de warmteafnemer (in het geval van een derde partij) een korting te geven op de afgenomen warmte, wordt deze geprikkeld om zoveel mogelijk warmte (of stoom) uit de WKK-installatie af te nemen. Deze zogenaamde 'warmtekorting' komt ten laste van de exploitant van de WKK-installatie.

Exploitatielasten ketel	Exploitatielasten WKK
Gasinkoop ketel	Gasinkoop WKK + ketel
Onderhoud ketel	Onderhoud en beheer WKK + ketel
Inkoop elektriciteit (volledige behoefte)	Inkoop elektriciteit (eventuele back-up en/of suppletie)
	Warmtekorting
	Machinesebreukverzekering
	Verkoop (overschot) elektriciteit
	Mogelijke subsidie op elektriciteitsproductie

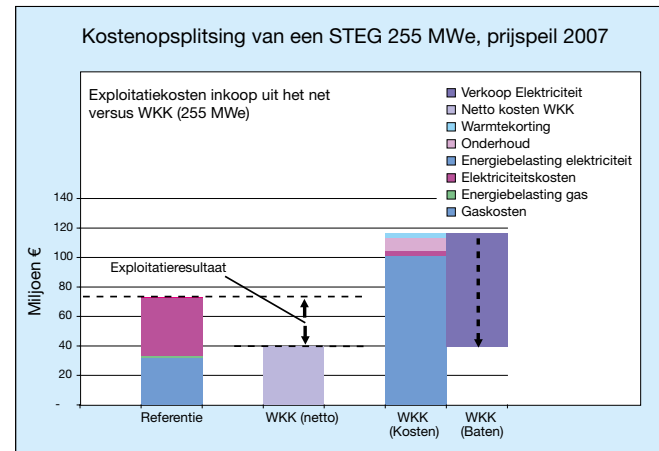
Tabel 1 Exploitatiebaten en -lasten

Figuur 3 toont een grafische weergave van de exploitatiebaten en -lasten van een grote STEG (de bedragen zijn indicatief). Hierin zijn de kosten voor afschrijving en rente dus nog niet meegenomen. De kosten voor gasinkoop vormen met afstand de grootste kostenpost in de exploitatie van een WKK-installatie. Daar staat tegenover dat de installatie door de levering en verkoop van elektriciteit aan het net (en door vermindering van de elektriciteitsinkoop) veel opbrengsten genereert. In dit voorbeeld ligt – door de verkoop van elektriciteit aan het net – het totale kostenniveau van de WKK-installatie ten opzichte van de referentiesituatie circa € 33 miljoen lager.

Haalbaarheid

Een exploitatieberekening brengt voor een groot deel de geldstromen in beeld die met de WKK-installatie gemoeid zijn. Door de uiteindelijke exploitatiekostenbesparing aan de investering te relateren, kan de rentabiliteit van de installatie worden bepaald. De eenvoudigste manier om de rentabiliteit te bepalen is het vaststellen van de simpele terugverdientijd van de extra investering (figuur 4).

De extra investering heeft hier betrekking op de som van de totale investeringskosten voor de WKK-installatie en alle bijkomende kosten (met aftrek van een eventuele investeringssubsidie) minus de investeringskosten die in de referentiesituatie gemaakt moeten worden. Wordt door de plaatsing van een WKK-installatie de aanschaf van een noodstroomaggregaat bijvoorbeeld overbodig, dan kunnen de investeringskosten van dit noodstroomaggregaat op de totale investering in mindering worden gebracht. Een ander voorbeeld is de



Figuur 3 Exploitatie STEG 255 MWe ten opzichte van inkoop uit het net

$$\text{Terugverdientijd} = \frac{\text{Extra investering}}{\text{Besparing exploitatielasten per jaar (netto)}}$$

Figuur 4 De simpele terugverdientijd

netaansluiting. Voor ondernemers die de WKK-installatie puur voor levering van elektriciteit aan het net inzetten, vormt de investering in de vergroting c.q. uitbreiding van de aansluiting op het elektriciteitsnet onderdeel van de totale investeringskosten. Als de ondernemer de netaansluiting sowieso nodig heeft voor zijn productieproces, is

het niet reëel om deze kosten in het totale investeringsbedrag op te nemen. De extra investering wordt dan lager.

De hiervoor beschreven terugverdientijd wordt ook wel SPOT genoemd (Simple Pay Out Time, oftewel simpele terugverdientijd vóór belastingen). Hiermee kan de ondernemer snel inzicht krijgen in de financiële 'kracht' van het project. Ter indicatie: een project met een SPOT van vier jaar (of minder) wordt over het algemeen als een gunstig project beoordeeld. Er zijn echter ook sectoren die strengere terugverdientijden hanteren voor 'niet-kernactiviteiten', zoals het investeren in een WKK-installatie. Om in deze sectoren toch WKK te kunnen gebruiken, kan gedacht worden aan het 'outsourcen' van de installatie.

Gevoeligheden en risico's

Bij de berekening van de SPOT moet rekening worden gehouden met gevoeligheden voor schommelingen in de brandstofprijzen, de hoogte van een eventuele subsidie, de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit, etc. Voor elk project is dit soort gevoeligheden anders. Voordat er een definitieve investeringsbeslissing wordt genomen, moet hier dan ook grondig naar gekeken worden.

Hoewel de SPOT een snelle en krachtige manier is om een project te beoordelen, houdt deze geen rekening met de projectresultaten na de periode waarin de investering is terugverdiend. Er zijn meer (en ingewikkelder) manieren om de rentabiliteit van een project te beoordelen, en daarbij wordt wel rekening gehouden met belastingen, rente op leningen en kasstromen gedurende de gehele looptijd van het project. Dit wordt later in deze paragraaf uitgewerkt.

Invloed van dimensionering

Er is al eerder aangegeven dat het belangrijk is om een goede keus te maken voor wat betreft het vermogen van de WKK-installatie. Wordt er voor de energiehuishouding van een bedrijf voor een te groot vermogen gekozen, dan kan de installatie niet het gewenste (of geplande) aantal draaiuren maken of moet hij in deellast gaan draaien. Een ander mogelijk effect is dat de WKK-installatie in startstop-modus gaat draaien, wat vaak tot hogere onderhoudskosten leidt. Wordt de installatie daarentegen te klein gekozen, dan is het financiële voordeel te laag om echt rendabel te zijn. Bij de exploitatie van een WKK-installatie is het van belang om goed na te gaan of deze op vol vermogen kan draaien

(in vollast) of dat deze teruggeregeld moet worden (in deellast). Als een installatie in deellast draait, veranderen de rendementen en wordt er per draaiuur minder elektriciteit en naar verhouding meer warmte geproduceerd. Ook worden dan de kapitaallasten per kWh hoger – deze kapitaallasten zijn immers vast. De onderhoudskosten worden ook vaak geheel of gedeeltelijk per draaiuur afgerekend. Dit leidt tot hogere kosten per geproduceerd kWh (zie hiervoor onderstaand voorbeeld in figuur 5).

In de gevallen waarin de WKK-installatie niet altijd elektriciteit produceert maar wel 'bijstaat' (als bijvoorbeeld een draaiende back-up), kan het voordelig zijn om de onderhoudskosten niet per draaiuur maar per kWh te contracteren. Zo kunnen de kosten voor onderhoud aanzienlijk beperkt worden. Een andere mogelijkheid is het splitsen van de onderhoudskosten in een jaarlijks vast bedrag en een lager variabel bedrag.

3.2.2 De exploitatiebaten en -lasten voor WKK

In deze subparagraaf worden de exploitatiebaten en -lasten voor een WKK-installatie verder uitgewerkt. Achtereenvolgens komen hier gaskosten, elektriciteitskosten en -opbrengsten en onderhoud en beheer aan de orde.

De onderhoudskosten van een WKK-installatie van 4000 kWe worden geheel per draaiuur afgerekend.	
Stel dat deze kosten € 20 per draaiuur bedragen. De onderhoudskosten per kWh zijn dan bij vollast:	$20 * 100 / 4000 * 1 = 0,5 \text{ €ct/kWh}$
Als de installatie in een bepaald uur op 75% van zijn vermogen draait, dan produceert hij in dat uur:	$75\% * 4000 = 3000 \text{ kWh}$
De onderhoudskosten stijgen dan per geproduceerd kilowattuur naar:	$20 * 100 / (4000 * 0,75) = 0,66 \text{ €ct/kWh}$
Los van een eventueel verslechterd rendement stijgen de onderhoudskosten per kWh dus met 33%.	

Figuur 5 Rekenvoorbeeld onderhoudskosten in deellast

De gasprijs

De integrale gasprijs is opgebouwd uit diverse kostencomponenten:

- De commodity-prijs.
- De kosten van diensten (het gebruik van het landelijke transportnet en capaciteitsdiensten) en de kosten voor het gebruik van het lokale distributienet (de distributiekosten in € per m³/uur).
- Energiebelasting.

De commodityprijs

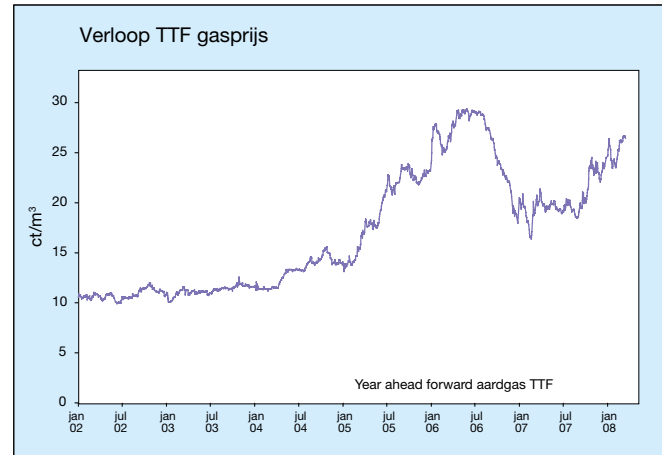
Figuur 6 laat het verloop van de aardgasrijzen zien, op basis van een afnamecontract voor een jaar vooruit vanaf januari 2002 tot februari 2008. De prijzen voor gas zijn in de afgelopen jaren aanzienlijk gestegen. Tussen juli 2004 en januari 2008 zijn de prijzen voor aardgas zelfs meer dan verdubbeld.

Afhankelijk van onder meer de afnamehoeveelheid en de lengte van het contract kan de afnemer over de commodityprijs onderhandelen. Zo kunnen afnemers zich tegenwoordig bij een collectief (bijvoorbeeld een groep tuinders) aansluiten. Door vergroting van het totaal af te nemen volume aan aardgas kan een (iets) gunstiger gasprijs bedongen worden.

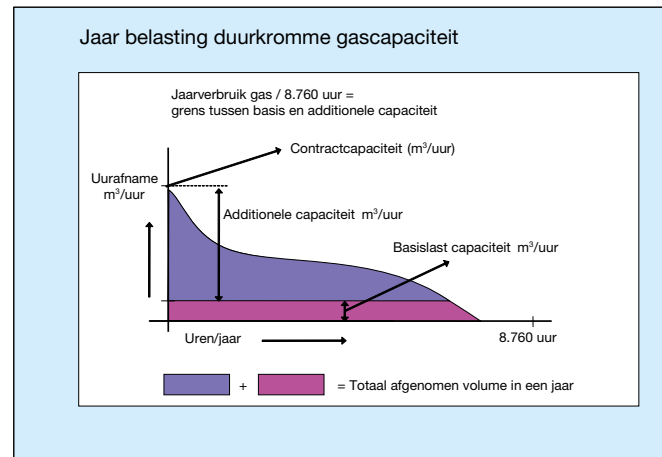
Diensten- en distributiekosten

Bij aardgas worden de kosten van het lokale distributienet (8 bar en lager) via een postzegeltarief in rekening gebracht (een tarief, onafhankelijk van de plaats in het lokale distributienet). De kosten van het landelijke en regionale net (in handen van Gas Transport Services (N.V. Nederlandse Gasunie)) worden via een zogenaamd entry-/exitsysteem verrekend. Deze kosten worden meestal door de leverancier betaald en in de prijsstelling naar de klant meegenomen. Door het entry-/exitsysteem is de plaats van afname wel in enige mate relevant voor de kosten.

Naast de commodityprijs (zoals hiervoor behandeld) brengt de leverancier een bedrag in rekening voor de capaciteit van het gas dat gebruikt is voor flexibiliteit in de levering. Capaciteit is hier de maximale afname over de gasaansluiting in m³/uur. Voor afnemers tot 170.000 m³ per jaar geldt in principe overigens een tarief dat volledig afhankelijk is van het verbruik. Capaciteit speelt voor deze afnemers geen rol. De capaciteit is een belangrijke component in de transport- en flexibiliteitskosten (samen 'dienstenkosten') van gas. Hierbij is vooral de afgenomen capaciteit in verhouding tot



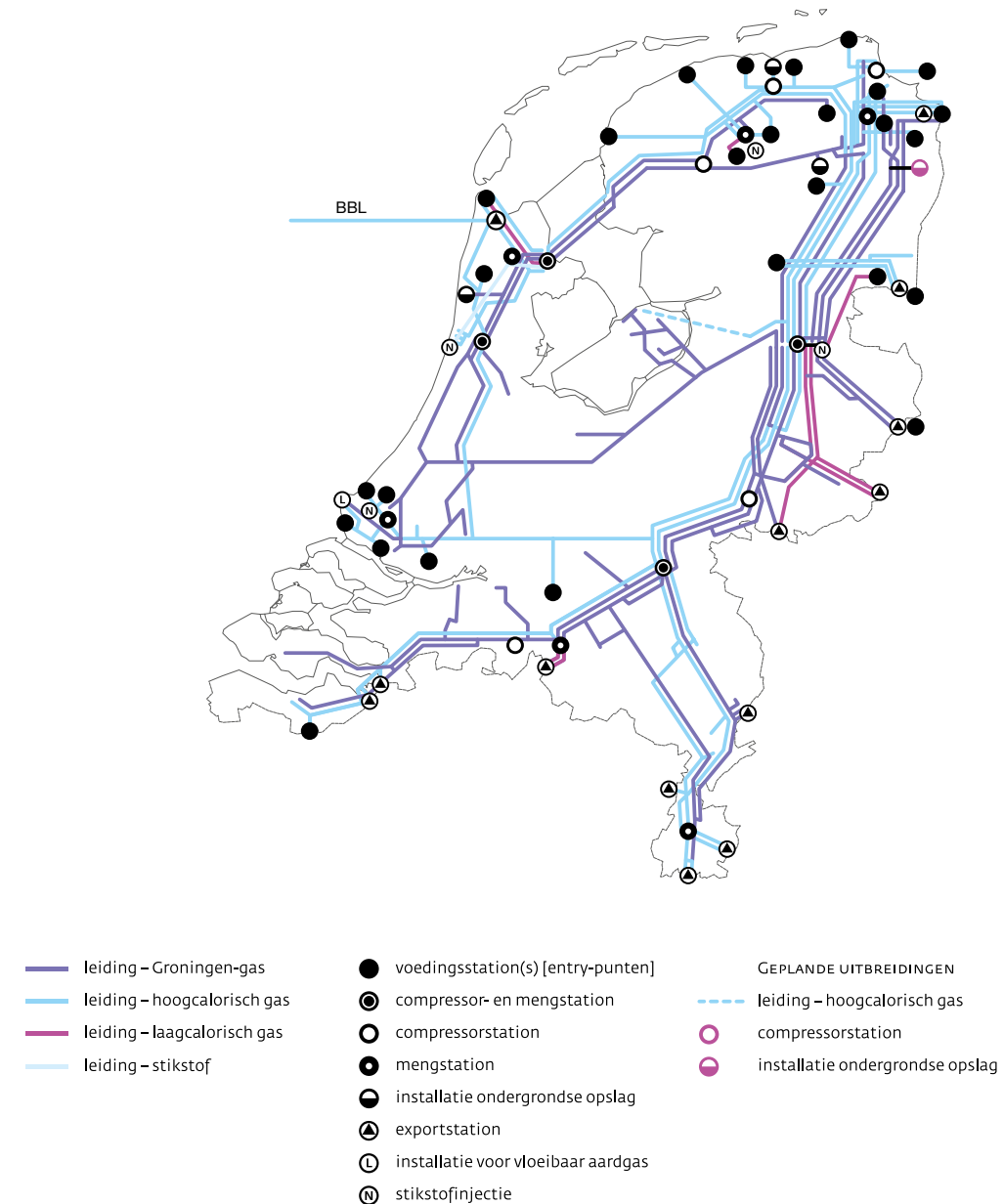
Figuur 6 Het verloop van de gasprijzen 2002 tot januari 2008



Figuur 7 Toelichting gasverbruik en afgenomen capaciteit

de jaarafname belangrijk, die tot uitdrukking komt in de maximale afnamepiek (de contractcapaciteit in m³/uur) per jaar. De benodigde contractcapaciteit is de som van twee delen: de basislastcapaciteit en de additionele capaciteit. De basislastcapaciteit is gedefinieerd als de totale jaarafname gedeeld door 8.760 uur. Het resterende deel van de benodigde capaciteit heet additionele capaciteit. In figuur 7 is dit grafisch weergegeven. Het is voor een

Schematische weergave van het Nederlandse hoofdtransportnet, ultimo 2007



Het Nederlandse gasnet Bron: Gas Transport Services BV

gasafnemer in zijn eigen (kosten)belang om extreem hoge pieken in de gasafname te voorkomen. Door zijn inzicht in het eigen gasafnamepatroon te vergroten en op basis daarvan maatregelen te nemen, kunnen de additionele capaciteitskosten worden verlaagd.

Tabel 2 geeft ter indicatie de gemiddelde kosten weer voor capaciteit en transport bij een afname van 170.000 en van 1 miljoen m³ aardgas in 2007. Het verschil tussen 'hoog' en 'laag' heeft te maken met de regio: de laagste kosten gelden voor de regio Groningen – de hoogste, vanwege de afstand tot het Groninger gasveld, voor Zeeland en Limburg. In de tabel zijn tussen haakjes ook de kosten van de lokale netbeheerder verwerkt. Deze zijn echter slechts van toepassing op aansluitingen van 8 bar of lager.

Voor capaciteitsbemetten afnemers bedragen de lokale netkosten circa € 25/m³/uur voor kleinverbruikers (ordegrootte van 0,2€ct/m³). De dienstenkosten voor kleinverbruikers worden met een regiotoeslag in rekening gebracht. Deze regiotoeslag (in €ct/m³) is afhankelijk van de regio waar het aardgas wordt afgenomen.

Energiebelasting op gas

De Belastingdienst heft energiebelasting op aardgas, o.a. met als doel de CO₂-emissies te verminderen en het verbruik van energie terug te dringen. Deze energiebelasting is een belasting op het verbruik van energie, zoals aardgas maar ook elektriciteit en bepaalde minerale oliën. Hierbij gelden zogenaamde 'gestaffelde' tarieven. Elke aansluiting doorloopt de staffels; daarbij worden bij afname in delen van een jaar de grenzen naar rato toegepast. Een afnemer die bijvoorbeeld 700.000 m³ gas afneemt, betaalde in 2007 voor de eerste 5.000 m³ € 15,31 ct/kWh, voor de volgende 165.000 m³ € 13,42 ct/kWh, en voor de resterende 630.000 m³ € 3,72 ct/kWh. Voor blokverwarming is er een uitzondering: als het gas in een installatie voor blokverwarming (centrale verwarming van individuele woningen en/of kantoren) wordt gebruikt, valt het gehele verbruik onder de hoogste staffel waarin het gasverbruik wordt afgenomen. Voor elektriciteitsopwekkers zoals een WKK-installatie, geldt bij een elektrisch rendement dat hoger is dan 30% en een vermogen van ten minste 60 kWe een vrijstelling op de energiebelasting. De energiebelastingtarieven voor de tuinbouw waren in 2007 tot 1 miljoen m³

substantieel lager. Deze tarieven staan in tabel 3 tussen haakjes aangegeven. Om voor de verlaagde tuinbouwbelasting in aanmerking te komen, is een LASER-verklaring vereist. Deze belastingverlaging maakt deel uit van een regeling voor tuinders die aardgas gebruiken voor verwarming om zo het groeiproces van tuinbouwproducten te bevorderen.

De elektriciteitsprijs

Evenals bij gas geldt ook voor de elektriciteitsprijs voor inkoop uit het net, dat deze is opgebouwd uit diverse componenten, namelijk de leveringsprijs, het netwerktarief en de energiebelasting.

Leveringsprijzen

De actuele leveringsprijzen voor levering in de aankomende maanden, kwartalen en jaren – de zogenaamde forwards – zijn onder meer terug te vinden op www.endex.nl. Het gaat hierbij om groothandelsprijzen oftewel de prijzen op de markt waar de producenten, leveranciers en handelaren handelen. Leveranciers leggen naar hun klanten toe opslagen op deze groothandelsprijzen voor de verwerking van het afnameprofiel, de administratie- en verkoopkosten en hun marge. De groothandelsprijzen geven ook een goede indicatie voor het bepalen van de opbrengst bij levering aan het (openbare) net.

Zoals blijkt uit de grafiek in figuur 8 zijn de prijzen voor elektriciteit sterk fluctuerend. In de grafiek is de ontwikkeling opgenomen van de 'forward-prijzen' vanaf begin 2002 tot begin 2008, voor levering in het volgende leveringsjaar (de prijzen van begin 2008 zijn de prijzen voor levering gedurende het gehele jaar 2009). Traditioneel wordt er onderscheid gemaakt tussen de dure uren tijdens de werkweek en de goedkopere uren gedurende het weekend, de nacht en de feestdagen. De dure uren zijn de uren tussen 07:00 en 23:00 uur (ook wel plateau-uren genoemd; gemiddeld 4.080 uur per jaar). De goedkope uren oftewel daluren, beslaan gemiddeld 4.680 uren per jaar. Inmiddels zijn hier allerlei verkoopvarianten op ontstaan. Deze zijn onder andere gebaseerd op de opbouw van de klantenportfolio van energiebedrijven, waarbij onder andere rekening wordt gehouden met (bijvoorbeeld) de afname van de productie tijdens de duurdere uren in het weekend. Ook zijn er inmiddels andere marktplaatsen ontstaan waar aanbieders van elektriciteit hun opbrengst kunnen optimaliseren. Hier wordt verderop in dit hoofdstuk dieper op ingegaan.

Netwerktarieven

In Nederland zijn er anno 2008 nog ruim tien (openbare) netwerkbedrijven actief. Zij staan onder toezicht van de Dienst Toezicht en Uitvoering Energie (DTe). In technische codes zijn regels voor netbeheerders en aangeslotenen vastgelegd; sinds kort geldt dit ook voor aardgas, in separate codes. De structuur en wijze van berekening van de netwerktarieven zijn vastgelegd in de zogenaamde Tarievcodes.

Netwerkkosten bestaan uit de volgende deeltarieven: het aansluittarief (een eenmalige vergoeding én een periodieke vergoeding), het systeemdienstenttarief en het transporttarief.

Het eenmalige aansluittarief is gereguleerd tot een aansluiting van 10 MVA. Daarboven worden de kosten in rekening gebracht tot dat punt in het elektriciteitsnet waarop er voldoende capaciteit beschikbaar is. Deze eenmalige vergoeding kan als onderdeel van de investering worden gezien; in paragraaf 3.2.3 wordt dit verder uitgewerkt.

Het systeemdienstenttarief is een vergoeding voor het bewaken en in stand houden van de kwaliteit van de geleverde elektriciteit. Dit is een dienst die door TenneT, de landelijke netbeheerder, wordt uitgevoerd en via de netbeheerders aan de klant wordt doorberekend. In 2008 was het tarief hiervoor € 1,17/MWh – dit is verschuldigd over het volledige elektriciteitsverbruik. Deze vergoeding moet ook betaald worden voor elektriciteit voor eigen gebruik uit een WKK-installatie die parallel aan het openbare net geschakeld staat. Als de WKK-installatie in een eigen elektriciteitsnet draait dat jaarrond fysiek van het openbare net gescheiden is ('eilandbedrijf'), hoeft de exploitant geen systeemdiensten te betalen.

De hoofdmoot van de netwerkkosten wordt gevormd door de transportkosten. De hoogte en structuur van de transporttarieven hangen samen met de gecontracteerde capaciteit en de aansluitspanning. Voor kleinverbruikers worden de transportkosten in hoofdzaak via het kWh-verbruik in rekening gebracht. Op de hoogste spanningsniveaus vindt verrekening grotendeels plaats via een bedrag per kW gecontracteerd vermogen.

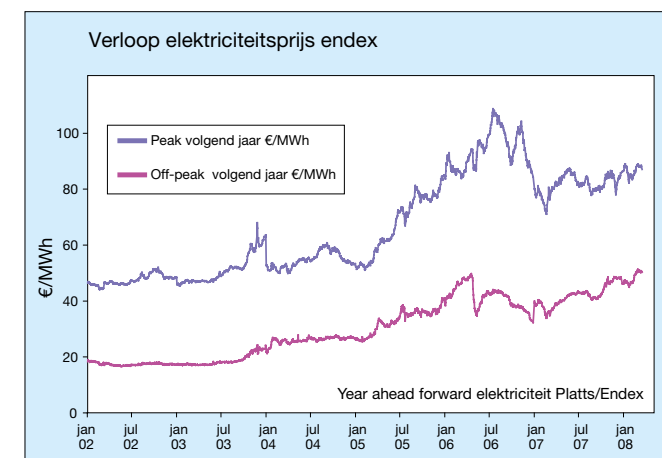
Naarmate het spanningsniveau lager is nemen de transportkosten toe. Dit komt door het zogenaamde cascadesysteem: elk span-

	Laag in €ct/m ³	Hoog in €ct/m ³
< 170.000 m ³ /jaar	11,0 (13,0)	14,0 (16,0)
1 mln m ³ - 1.000 uren	9,0 (11,5)	13,0 (15,5)
1 mln m ³ - 2.500 uren	5,0 (6,0)	3,5 (4,5)
1 mln m ³ - 4.000 uren	2,0 (2,6)	3,0 (3,6)
1 mln m ³ - 8.000 uren	1,0 (1,3)	0,5 (0,8)

Tabel 2 Tabel met indicatieve kosten voor capaciteit en transport

Tranche	2004	2005	2006	2007	2008
0 - 5.000 m ³	14,29	14,94	15,07	15,31 (1,412)	15,54 (1,433)
5.000 - 170.000 m ³	7,27	10,19	12,38	13,42 (2,245)	13,62 (2,279)
170.000 - 1mln m ³	2,27	3,11	3,40	3,72 (1,88)	3,78 (1,908)
1 - 10 mln m ³	1,13	1,15	1,16	1,18 (1,18)	1,20 (1,20)
> 10 mln m ³ zakelijk	0,75	0,76	0,77	0,78 (1,18)	0,79 (0,79)

Tabel 3 Energiebelasting op gas in de afgelopen jaren



Figuur 8 Het verloop van de forward-prijzen van elektriciteit vanaf 2002

ningsniveau draagt bij aan de kosten van de hogere niveaus. Het transporttarief is een zogenaamd postzegeltarief: het wordt in rekening gebracht onafhankelijk van de locatie waar de elektriciteit is geproduceerd. Producenten, zoals WKK-eigenaren, betalen op dit moment voor de levering aan het net geen transporttarief, maar worden alleen aangeslagen voor het aansluittarief. Tabel 4 geeft de indicatieve transportkosten per kWh weer voor enkele bedrijfstijden en spanningsniveaus (gemiddeld voor Nederland in 2008). De bedrijfstijd is hier het jaarverbruik (het in totaal afgenomen aantal kWh) gedeeld door het maximale vermogen (in kW). Dit is een maat voor de continuïteit in de afname.

De genoemde kosten zijn dus exclusief aansluitkosten en systeem-diensten, voor Nederland gemiddeld en slechts bedoeld als indicatie. Voor het kleinverbruik zijn de kosten vergelijkbaar met LS-grootverbruik (220/380 V). Het is overigens de bedoeling om per 2009 het transporttarief voor de kleinverbruikers helemaal los te koppelen van het verbruik (ook voor wat betreft aardgas) en het om te zetten naar een vast bedrag per jaar, dit om de administratieve processen te vereenvoudigen. Daarbij is het wel de bedoeling om deze loskoppeling in de sfeer van de energiebelasting te compenseren, waardoor de verbruiksafhankelijke kosten voor kleinverbruikers per saldo niet zullen wijzigen. De toezichthouder DTe stelt de netwerk-tarieven vast. Via 'maatstafconcurrentie' probeert de DTe de kosten omlaag te brengen, en met succes. Daar staat tegenover dat er de komende jaren fors geïnvesteerd moet worden in vooral het landelijke net, met name om nieuwe opwekking met bijvoorbeeld WKK, windparken en nieuwe (kolen)centrales, mogelijk te maken.

Als de elektriciteit uit een WKK-installatie voor eigen gebruik wordt aangewend, kan er aanzienlijk op de netkosten worden bespaard. De resterende inkoop uit het net zal door een lagere bedrijfstijd

Bedrijfstijd	LS-grootverbruik	MS (10 kV)	TS (50 kV)
1.000 uren	3,5 ct/kWh	3,5 ct/kWh	3,5 ct/kWh
2.500 uren	3,0 ct/kWh	2,0 ct/kWh	1,5 ct/kWh
4.000 uren	2,8 ct/kWh	1,6 ct/kWh	1,0 ct/kWh
8.000 uren	2,5 ct/kWh	1,3 ct/kWh	0,5 ct/kWh

Tabel 4 Indicatieve gemiddelde transportkosten per kWh

relatief wel veel duurder worden. Als de bedrijfstijd terugloopt van bijvoorbeeld 4.000 naar 2.500 uur stijgen de transportkosten bij LS grootverbruik van 2,8 naar 3 ct/kWh (tabel 4). Als de WKK-installatie alle elektriciteit in principe op één locatie levert, wordt er vaak een zogenaamd back-upcontract afgesloten, in geval de installatie door onderhoud of een storing niet draait en er wel een elektriciteitsvraag is. Hierbij gelden voor de hogere spanningsniveaus aparte tarieven.

Energiebelasting op elektriciteit

Voor de energiebelasting op elektriciteit gelden, net als bij aardgas, gestaffelde tarieven. In tabel 5 staat een overzicht van de energiebelasting van de laatste jaren (tarief in ct/kWh). Ook bij elektriciteit wordt de energiebelasting door de op één na laatste schakel in het leveringsproces in rekening gebracht: de leverancier van de eindgebruiker.

Voor elektriciteit die voor eigen gebruik is opgewekt, geldt een vrijstelling als hiervoor een WKK-installatie gebruikt is bij een Senterrendement van minimaal 60%. Het Senterrendement is de som van het volledige elektrisch rendement en 2/3 deel van het thermisch rendement. Het gaat hier enkel om het eigen gebruik; bij (door)levering aan derden is er wel gewoon energiebelasting verschuldigd, waarbij elke afnemer de diverse staffels moet doorlopen.

Kosten voor onderhoud en beheer

WKK-systemen vragen aanmerkelijk meer aandacht dan ketels. Er zijn onderhoudsintervallen voor het verversen van de smeeroil, het stellen van de kleppen, het vervangen van bougies en filters, etc. Het interval waarin deze activiteiten plaats dienen te vinden, verschilt per onderdeel.

Tranche	2004	2005	2006	2007	2008
0 - 10.000 kWh	6,54	6,99	7,05	7,16	7,27
10.000 - 50.000 kWh	2,12	2,63	3,43	3,69	3,75
50.000 - 10 mln kWh	0,65	0,86	0,94	1,02	1,04
> 10 GWh zakelijk	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
> 10 GWh niet zakelijk	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Tabel 5 Energiebelasting op elektriciteit in de afgelopen jaren

Iedere WKK-installatie beschikt over een preventief onderhoudsplan om schade aan het systeem te voorkomen en om storingen voor te zijn. Dit kan bijvoorbeeld met het onderhoud van een auto vergeleken worden. Aangezien het onderhoud specialistisch werk is, wordt het vaak uitbesteed aan de leverancier die ook het beheer op afstand op zich kan nemen. Daarbij worden de kritische parameters van de installatie (smeerolieverbruik, motor-temperatuur, trillingen, etc.) dan op afstand uitgelezen en geanalyseerd. Er zijn ook partijen in de markt die het hele systeem in beheer nemen en financieren (outsourcing).

Voor grotere systemen zijn er bovendien joint ventures mogelijk waarin de gebruiker en de beheerder in een aparte beheer-BV participeren. Daarnaast zijn er situaties waarin de outsourcer een conversiecontract sluit, waarbij de gebruiker stroom en warmte afneemt en zelf aardgas inkoop. De outsourcer garandeert dan een overeengekomen minimaal rendement en een minimale beschikbaarheid. Afwijkingen kunnen worden gecompenseerd met boetes en vergoedingen. Meer informatie over het beheer en onderhoud van een WKK-installatie staat in paragraaf 3.4. Ter indicatie is in tabel 6 een globale raming gegeven van de onderhoudskosten voor de verschillende typen WKK-installaties.

De kosten voor de machinebreukverzekering blijven verder buiten beschouwing. Deze verschillen namelijk zeer sterk per type, toepassing en vermogensgrootte. Daarnaast spelen de om- of achterliggende processen, de omgeving en mogelijke combinaties met andere machines een belangrijke rol. De jaarlijkse kosten kunnen

	Vermogensrange		Beheer en onderhoud (€ ct/kWh)	
	Van	Tot	Min	Max
Grote STEG	80 MWe	250 MWe	0,45	0,65
Kleine STEG	15 MWe	80 MWe	0,80	1,20
GT groot	8 MWe	45 MWe	0,50	0,65
GT klein	2 MWe	8 MWe	0,90	1,25
GM groot	800 kWe	10 MWe	0,50	0,90
GM klein	250 kWe	800 kWe	0,50	2,00

Tabel 6 Kostenindicatie per kWh voor beheer en onderhoud Bron: ECN

variëren van 0,25 tot 2% van de totale investeringslast (bron: www.cogenvlaanderen.be).

3.2.3 Benodigde investeringen

De kostprijs van een complete WKK-installatie wordt bepaald door de benodigde componenten van die installatie. In grote lijnen zijn de kosten terug te voeren op de onderdelen die reeds in paragraaf 3.1 genoemd zijn:

- De WKK-installatie ('prime mover') met generator.
- Het warmteoverdrachtsysteem.
- Een geluidsichte omkasting en uitlaat.
- Inpassing, elektronica en opstellingsruimte.
- De investering in netaansluitingen.

Netaansluitingen voor brandstof en elektra zijn vaak aparte investeringsprojecten. In deze paragraaf wordt ingegaan op de kosten voor de netaansluiting voor elektriciteit, maar niet op die voor aardgas.

Investing in de WKK-installatie

Voor de meest voorkomende WKK-installaties volgt hieronder een opsomming van de globale investeringskosten, inclusief de kosten van het warmteoverdrachtsysteem. Het gaat hierbij om een 'turn-key'-investering, waarbij de installatie volgens de specificaties wordt opgeleverd. De kosten van de netaansluitingen zijn hier nog niet in opgenomen. De opbouw van de investeringskosten verschilt sterk per WKK-categorie. Bij kleinere installaties bijvoorbeeld drukken de kosten van engineering zwaar op de totale investeringskosten. Ook is de invloed van het schaafeffect vrij

	Vermogensrange		Investeringsrange (€/kWe)	
	Van	Tot	Min	Max
Grote STEG	80 MWe	400 MWe	600	900
Kleine STEG	15 MWe	80 MWe	1.000	1.300
GT groot	8 MWe	45 MWe	800	1.100
GT klein	2 MWe	8 MWe	1.100	1.600
GM groot	800 kWe	10 MWe	350	700
GM klein	250 kWe	800 kWe	600	1.400

Tabel 7 Indicatie van de investeringskosten per kW Bron: ECN

groot. Grote WKK-installaties zijn vaak (industriële) maatwerk, waardoor veel onderdelen van de installatie min of meer uniek worden uitgevoerd. In tabel 7 (blz. 65) is een overzicht gegeven van de investeringskosten per kW_e.

Daar staat tegenover dat gasmotoren, door een zeer vergaande standaardisering van de te leveren installaties en door grote productievolumes, zeer lage investeringskosten voor hun vermogensgrootte hebben. Daardoor vallen de overheadkosten relatief laag uit. Daarnaast zijn de inpassingskosten over het algemeen laag. In tabel 8 is als globaal voorbeeld een gasmotor op een tuinbouwbedrijf uitgewerkt. De investeringskosten van een WKK-systeem boven 1,5 MWe zijn vrijwel evenredig met het vermogen. Daaronder neemt de prijs per kW_e exponentieel toe met de afname van het elektrisch vermogen (zie bijvoorbeeld figuur 9). Hetzelfde geldt voor de kosten van onderhoud per kW_e.

De investering in de aansluiting op het elektriciteitsnet

De aansluiting van een WKK-installatie op het elektriciteitsnet kan, afhankelijk van de situatie, tot aanzienlijke kosten leiden: tot wel 50% van de kosten van de investering in de WKK-installatie. De wijze van aansluiten dient daarom al vroeg in een projectstadium te worden bekeken. De fysieke aansluiting van een WKK-installatie op het openbare net is een taak van de lokale netbeheerder. In 1998 is in artikel 28 van de Elektriciteitswet geregeld uit welke elementen de kosten voor de aansluiting bestaan. Deze tarieven zijn volgens een vaste formule opgesteld en worden jaarlijks door de toezichthouder DTe bepaald.

Tot 10 MVA wordt een aansluiting tegen standaardtarieven in rekening gebracht, ongeacht de wijze waarop de aansluiting wordt gerealiseerd. Vanaf 10 MVA wordt de aansluiting gebaseerd op de projectkosten die op basis van voorcalculatie gemaakt worden. Vanaf 1 MVA mag de aansluiting desgewenst openbaar worden aanbesteed, maar daarbij moet de lokale netbeheerder de plannen met de technische specificaties van de aansluiting wel goedkeuren. Ook kan er vanaf 1 MVA op verzoek van de afnemer of producent worden afgeweken van de standaardaansluiting. Volgens de Elektriciteitswet heeft iedere afnemer recht op een aansluiting op het door hem gewenste spanningsniveau, tenzij dit om technische redenen redelijkerwijs niet van de netbeheerder verlangd kan worden. Bovendien heeft de afnemer

het recht te worden aangesloten op het dichtstbijzijnde punt in het net met de gewenste spanning, ongeacht de op dat punt beschikbare capaciteit. Voor aansluitingen van 10 MVA of hoger wordt op het dichtstbijzijnde punt in het net aangesloten waar capaciteit beschikbaar is.

Aanpassingen in het net die met de aansluiting verband houden, komen voor rekening van de netbeheerder die het betreffende net beheert. Als een netbeheerder vanwege de nieuwe aansluitingen op lagere netten een investering moet doen in zijn net op hogere spanning, dan mogen deze kosten niet via de aansluitkosten worden verrekend. Deze moeten via de transporttarieven gedekt worden. De netbeheerder is verplicht om de door de afnemer aan het net geleverde elektriciteit te transporteren tegen een tarief en andere voorwaarden die met de Elektriciteitswet in overeenstemming zijn.

Deze verplichting geldt voor zover de netbeheerder voor het gevraagde transport redelijkerwijs capaciteit ter beschikking heeft. De netbeheerder kan dus restricties stellen aan het aan te sluiten vermogen. Hij moet immers de gelegenheid krijgen om in voorkomende gevallen aanpassingen in het transportnet te realiseren. Deze restricties dienen echter wel tijdelijk te zijn. Wat in deze als tijdelijk beschouwd moet worden, is niet in de regelgeving aangegeven. In bijzondere gevallen kunnen termijnen zeer lang zijn.

Opsplitsing investeringskosten, WKK 1.000 kW _e in eilandbedrijf	
	Richtprijs in €
WKK-installatie (excl. condensor)	355.000
Telemetriesysteem	2.300
Additionele kosten	
Fundering + betonwerk	7.800
Dak-/geveldoorvoeringen	2.300
LS-kabel naar verdeelinrichting	3.000
Gasnet aansluiting	7.300
Inpassing op bestaande CV-installatie	17.200
Vergunningen en onvoorzien	6.800
Totale investeringskosten WKK (excl. condensor)	401.700
Kosten per kW _e vermogen, in €/kW _e	401

Tabel 8 Voorbeeld van de investeringskosten voor een gasmotor

De structuur en de wijze van bepaling van de netwerkstarieven, waaronder de aansluitvergoeding, worden geregeld in de Tarieven-code. De aansluitvergoeding wordt bepaald door drie tarieven:

- Een eenmalige bijdrage ter dekking van de initiële investeringskosten voor:
 - De fysieke verbinding met het net ('de knip').
 - De beveiligingsvoorzieningen op het overdrachtpunt.
 - De verbinding tussen 'de knip' en de beveiligingsvoorzieningen.
- Een periodieke vergoeding voor het gebruik van herbruikbare activa (zoals trafo's).
- Een periodieke vergoeding voor het in stand houden van de aansluiting.

In het standaardbedrag voor de verbinding is 25 meter kabel inbegrepen; wat er meer nodig is wordt tegen een door de DTe vastgesteld metertarief in rekening gebracht. Voor de lengte van de kabel wordt uitgegaan van de afstand tussen de beveiligingsvoorzieningen en de van toepassing zijnde aansluitwijze, gemeten langs het hart van de openbare weg. Over het algemeen is er een standaardindeling qua aansluitwijze, hoewel netbeheerders hier ook van af kunnen wijken. De indeling is als volgt:

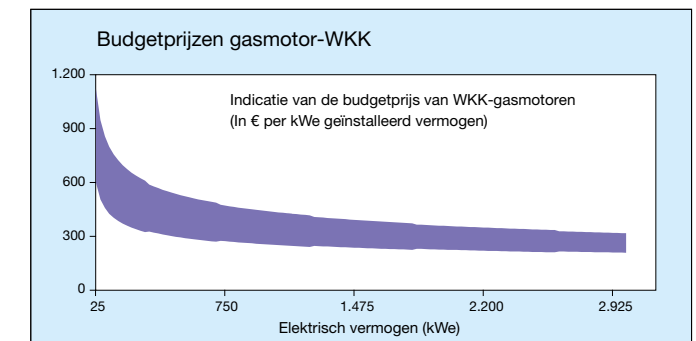
- T/m 60 kVA: Laagspanningskabel
- 60 kVA t/m 0,3 MVA: MS/LS-transformatorstation
- 0,3 MVA t/m 3 MVA: Middenspanningskabel
- 3 MVA – 10 MVA: Voedings- of verdeelstation MS-net
- > 10 MVA: Dichtstbijzijnde punt in het net met voldoende capaciteit

Uitgaande van de bovenstaande indeling volgt hier als voorbeeld een uitwerking met een aansluiting van 2,5 MVA en een aansluiting van 3,5 MVA. In het eerste geval kan aangesloten worden op een MS-kabel die langs de openbare weg loopt. De lengte van de aansluitkabel is 50 meter, dus moet er 25 meter extra betaald worden. In het tweede geval wordt uitgegaan van aansluiting op het dichtstbijzijnde HS/MS-station en heeft de aansluitkabel een lengte van 4 km. Ter indicatie: het tarief voor een MS-kabel ligt in de orde van € 60 per meter. Een meerlengte van 4 km betekent dan € 240.000 extra aan aansluitkosten, exclusief bijvoorbeeld 'kunstwerken' zoals het overbruggen van waterwegen (figuur 10).

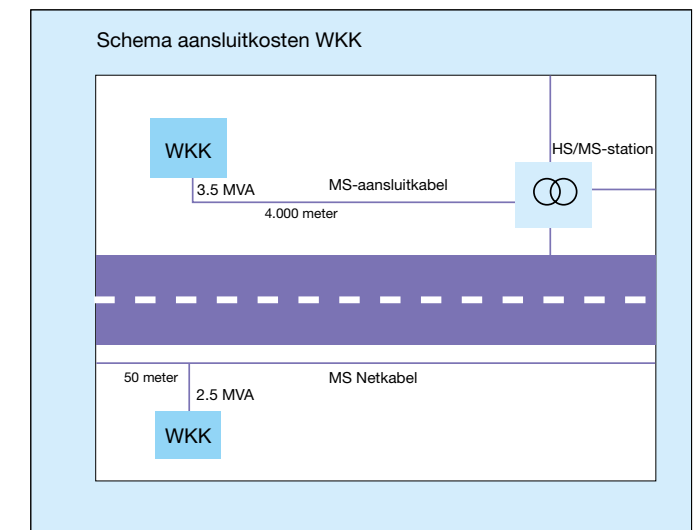
3.2.4 Invloed van de energiemarkt en energiecontracten

De prijsontwikkeling van aardgas

De belangrijkste kostenpost voor een WKK-installatie is de energie-inkoop, te weten de inkoop van aardgas. Een aanzienlijk deel van het aardgas wordt, al dan niet via wederverkopers, geleverd door GasTerra. GasTerra koppelt haar prijzen aan die van olieproducten, maar volgt daarbij in de formulering wel de prijs op de vrije markt. Daarmee is de prijs op de vrije markt richting-



Figuur 9 Kostenverloop van een gasmotor-package voor WKK



Figuur 10 Voorbeeld van aansluiting op het elektriciteitsnet

gevend geworden voor afnemers. Deze prijs wordt goed gereflecteerd door de TTF-prijs die op Endex genoteerd wordt. TTF staat hier voor Title Transfer Facility, een volume aan gas dat op het net gezet is. Daarnaast is het sinds 2006 ook mogelijk om op dagbasis gas te verhandelen, namelijk via de APX. Dit biedt de mogelijkheid om kortetermijngastekorten of -overschotten op 'day ahead'-basis te verhandelen. Deze kortetermijnmarkt biedt afnemers een extra optimaliseringsinstrument op basis van gas; hier wordt in dit boek niet verder op ingegaan.

Het verloop van de gasprijs voor consumenten en industrie is weergegeven in figuur 11, inclusief de kosten voor transport en energiebelastingen. De hoogte van deze twee posten is, zoals reeds eerder aangegeven, afhankelijk van de totale afname per jaar en van de maximale afnamepiek in het jaar. Voor huishoudens is in deze figuur uitgegaan van een verbruik van circa 2.600 m³ per jaar, voor de industrie van 1,3 miljoen m³.

Elektriciteitsverkoop

Sinds de liberalisering is het mogelijk geworden om elektriciteit op verschillende markten in te kopen of aan te bieden. De belangrijkste markten zijn de langetermijnmarkt, de kortetermijnmarkt en de onbalansmarkt.

De langetermijnmarkt

De langetermijnmarkt (soms ook wel aangeduid als Over The Counter (OTC)) is gebaseerd op langetermijncontracten tussen producenten en afnemers. De termijn van de contracten verschilt van enkele weken tot verscheidene jaren. De handel vindt plaats via handelaren of direct tussen aanbieder en afnemer. Als voorbeeld is in figuur 12 het verloop gegeven van de 'forwards' voor elektriciteit voor een jaar vooruit, dus van de prijzen op enig moment voor levering gedurende het hele volgende jaar. Uit het prijsverloop (in figuur 12 vanaf januari 2002 tot medio februari 2008) blijkt dat de elektriciteitsprijzen stijgen. Het verloop van de prijzen over de afgelopen jaren is reeds eerder aangegeven.

De kortetermijnmarkt

De kortetermijnmarkt (in hoofdzaak de APX-markt) is gebaseerd op levering de volgende dag. Aanbieders op deze markt geven vooraf aan tegen welke prijs (per uur) zij bereid zijn de volgende dag elektriciteit te leveren. De afnemers geven aan tegen welke prijs zij

elektriciteit willen kopen. Het resultaat van deze biedingen is één marktprijs voor een bepaald uur met een vastgesteld volume aan elektriciteit voor dat betreffende uur. Dit wordt voor alle uren van de volgende dag zo uitgevoerd. Het verloop van de APX-prijzen is erg grillig en wordt sterk bepaald door korte termijn overschotten en tekorten. Als voorbeeld zijn hier de APX-prijzen van 2006 gegeven in €/MWh. De prijzen op de langetermijnmarkten reageren in beperkte mate op de schommelingen op de APX-markt.

De onbalansmarkt

Naast de beide termijnmarkten is er ook een markt voor onbalans. Op deze markt organiseert TenneT het regelvermogen van het nationale elektriciteitsnet. De grote aanbieders van elektriciteit zijn verplicht om actief aan deze markt deel te nemen, terwijl andere aanbieders dat vrijwillig kunnen doen. Het totaal aan aangeboden vermogen valt uiteen in drie groepen:

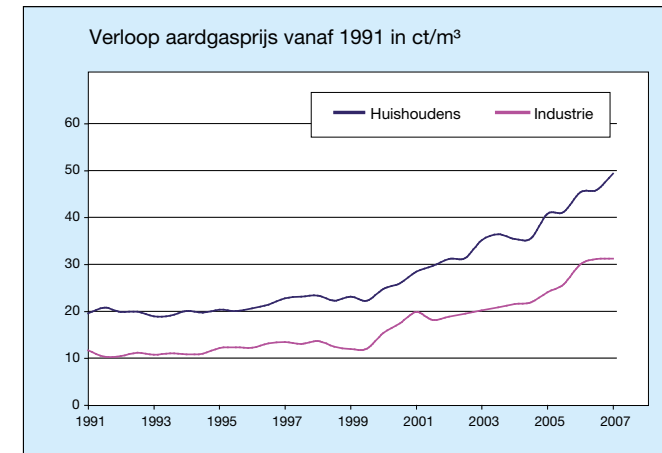
- Het regelvermogen. Dit vermogen kan continu worden aangestuurd door de landelijke frequentievermogensregeling. Het totale volume wordt bepaald op basis van het aansturingssignaal.
- Het reservevermogen. Dit vermogen wordt per keer afgeroepen, waarbij het volume wordt berekend op basis van de geboden afroeptijd.
- Het noodstroomvermogen.

De markt voor onbalans werkt twee kanten op: enerzijds kan er extra vermogen aangeboden worden voor opregeling, anderzijds is het ook mogelijk dat de aanbieder vermogen afschakelt of meer consumeert. De prijzen op deze markt variëren zeer sterk, waardoor het moeilijk is een voorspelling te doen.

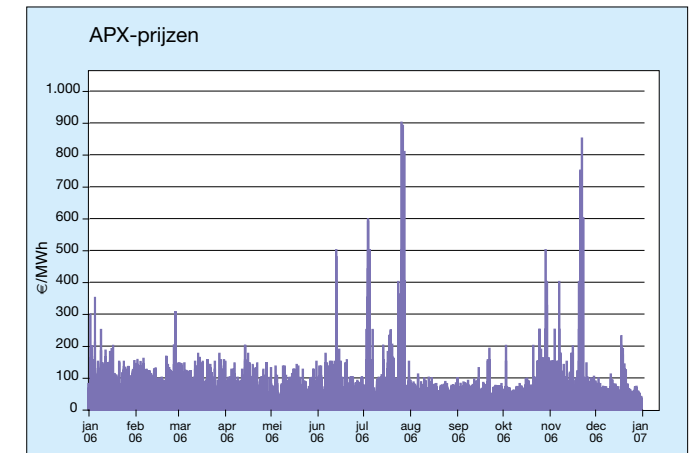
Als voorbeeld is in figuur 14 het prijsverloop gegeven van de onbalansprijzen op 20 februari 2008.

Modellen voor elektriciteitsverkoop

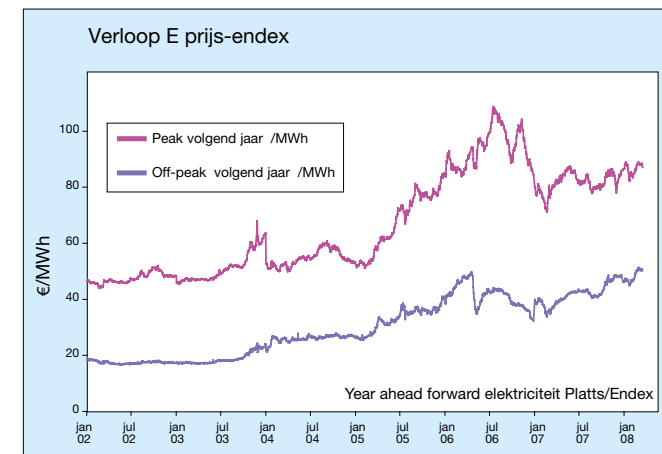
Een WKK-installatie kan elektriciteit produceren voor eigen gebruik of voor teruglevering aan het net. Afhankelijk van het type installatie kan de teruglevering gericht zijn op de eerder beschreven markten. Voor levering aan het net is het noodzakelijk om een PV-partij (Programma Verantwoordelijke) in te schakelen. De functie van de PV-partij is om de verschillen tussen transacties en werkelijkheid te verrekenen. Deze verschillen treden op als gevolg



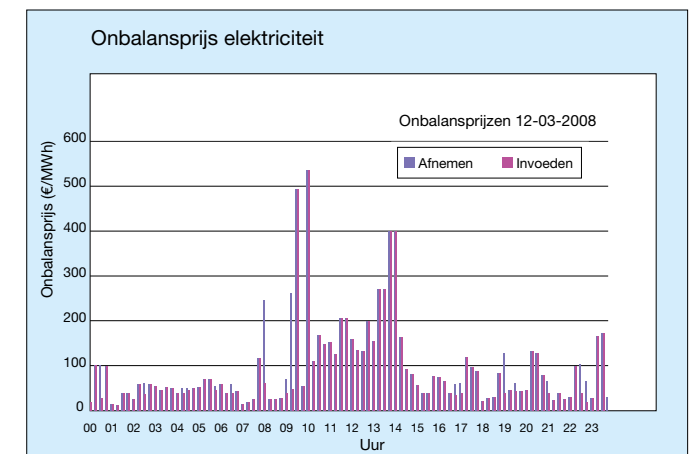
Figuur 11 Het verloop van de aardgasprijs 1991 tot 2007 (inclusief transport en belasting) Bron: www.energie.nl



Figuur 13 Verloop van de APX prijzen van elektriciteit in 2006



Figuur 12 Verloop van de forwardprijzen van elektriciteit vanaf 2002



Figuur 14 Verloop van de onbalansprijzen van elektriciteit vanaf 12 maart 2008 Bron: www.tennet.nl

van de afwijkingen tussen het koop- en verkoopcontract en de daadwerkelijke productie en/of het verbruik.

Daarnaast is er een MV-partij (Meet Verantwoordelijke) noodzakelijk. Deze verzorgt de plaatsing, controle en het uitlezen van de meter. Ook valideert de MV-partij de uitgelezen data en verstuurt zij de verbruiksgegevens naar de netbeheerders.

In het meest 'eenvoudige' geval zal de WKK-exploitant zijn elektriciteit op basis van een langetermijncontract aanbieden. Dit is voornamelijk tijdens de plateau-uren interessant, omdat de elektriciteitsproductiekosten met een WKK-installatie dan lager zijn dan de verkoopprijs. Tijdens de daluren is het vaak niet interessant om aan het net te leveren. De opbrengst is dan lager dan de productiekosten, terwijl er in een aantal gevallen vanwege leveringsverplichtingen ('must run vermogen') voor bijvoorbeeld stroomproductie wel geleverd moet worden. De 'forwards' geven een goede indicatie van de prijzen waartegen op dat specifieke moment verhandeld wordt. Bij verkoop wordt over het algemeen door de handelaars een handelsmarge ten opzichte van de forward-prijzen aangehouden.

Naast de 'normale' periodes van plateau- en daluren zijn er bijvoorbeeld ook verkoopregelingen die een verlengd plateau-tarief aanbieden (ook wel superplateau genoemd). Dit verlengde plateau loopt elke dag van 8 uur 's ochtends tot 8 uur 's avonds tijdens werkdagen en het weekend. Als de WKK-installatie in het weekend toch voor de warmteproductie moet draaien, kan deze regeling gunstig zijn.

Een andere manier om elektriciteit aan het net te verkopen is door de installatie te gebruiken als 'back-up', dus om mee te handelen op de marktplaatsen voor elektriciteit (zoals de APX-markt). De exploitant geeft de periodes aan (in uren) waarin de installatie aan het net kan leveren. Deze uren worden van tevoren verkocht aan een afnemer op de vrije markt. Als er op die uren geleverd moet worden, kan het zijn dat op de APX de elektriciteit tegen lagere kosten wordt aangeboden dan de productiekosten van de eigen WKK-installatie. De installatie hoeft dan niet te draaien, en de elektriciteit wordt in dat geval aangekocht op de APX-markt en vervolgens aan de afnemer doorgeleverd. Dit is uitgewerkt in het voorbeeld in figuur 15.

Rekenvoorbeeld van handel tussen OTC en APX-markt	
Stel dat een exploitant van een WKK-installatie van 1 MWe alle elektriciteit die gedurende het hele jaar tijdens de uren tussen 08:00 uur en 20:00 uur wordt opgewekt, voor € 78/MWh verkocht heeft. In totaal zijn dit 4.380 draaiuren met de WKK-installatie en dus 4.380 MWh. De verkoopopbrengst is dan $78 * 4.380 = € 341.640$.	
De variabele productieprijs van elektriciteit uit de installatie wordt hier op € 60/MWh (inclusief onderhoud) gesteld. Het exploitatieresultaat is dan € 78.840 aan het eind van dat jaar.	
Stel nu dat de APX-prijs tijdens de verkochte uren gedurende 1.200 uur lager is dan de productieprijs van elektriciteit van de eigen WKK. De gemiddelde APX-prijs is bijvoorbeeld € 38/MWh.	
Tijdens die 1.200 uur kan de exploitant de elektriciteit dan inkopen op de APX en direct doorleveren aan zijn afnemer (zonder dat de WKK-installatie draait) tegen deze gemiddelde inkoopprijs.	
De extra verkoopmarge bedraagt dan $60 - 38 = € 22/MWh$ gedurende 1.200 uur.	
Het extra handelsresultaat is dan $22 * 1.200 = € 26.400$ (afgerond 8% extra verkoopopbrengst). Hierbij is geen rekening gehouden met eventuele extra kosten voor onderhoud of bediening.	

Figuur 15 Rekenvoorbeeld optimalisatie met APX

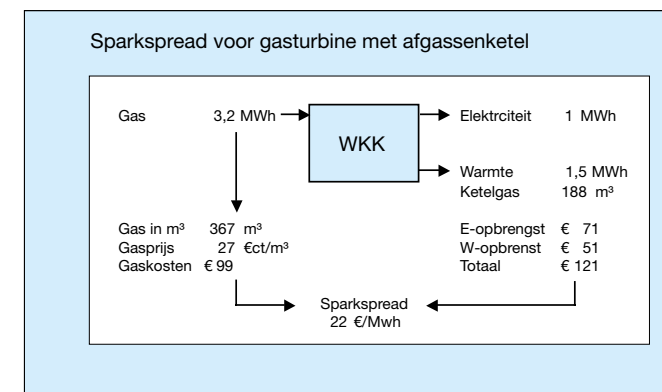
Een beperkende randvoorwaarde bij het optimaliseren via de APX is dat de afnemer op dat moment zelf geen warmtebehoefte mag hebben of dat hij deze tijdelijk kan uitstellen. Ook als de afnemer zijn eigen elektriciteit nodig heeft, is er weinig flexibiliteit om de installatie te optimaliseren. De grootte van de flexibiliteit verschilt per WKK-installatie.

Een andere mogelijkheid van de APX is het inkopen van elektriciteit voor eigen behoefte als de APX laag staat. De WKK-installatie zal dan niet voor eigen gebruik draaien. Door meer te 'spelen' met de draaiuren is er wel het risico dat er meer starts en stops plaatsvinden, waardoor er extra onderhoudskosten op kunnen treden. Ook bestaat de kans dat de installatie zijn geplande draaiuren niet maakt waardoor een eerder gecontracteerde gashoeveelheid niet wordt afgenomen.

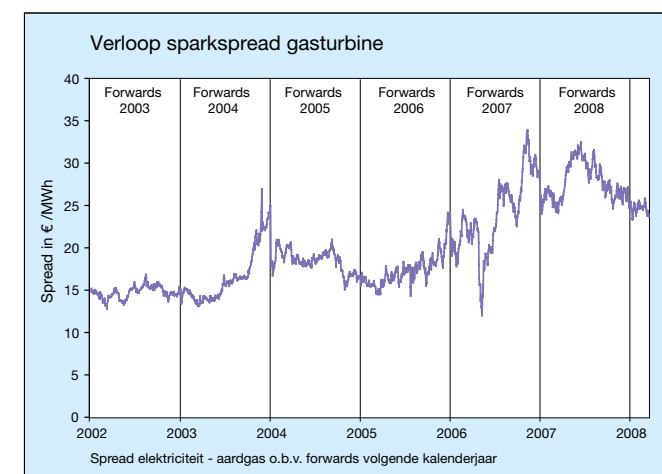
De WKK-installatie kan ook meedraaien in de onbalanspool van TenneT en dan zoals eerder aangegeven op afroep aan- of afgeschakeld worden. Bij een grote elektriciteitsafname door het eigen

Gasprijs (commodity)	€ 0,27/m ³
Elektriciteitsprijs plateau	€ 88,00/MWh
Elektriciteitsprijs dal	€ 50,00/MWh
Elektriciteitsproductie tijdens plateau-uren	54 %
Gemiddelde elektriciteitsprijs	€ 70,50/MWh

Tabel 9 Uitgangspunt berekening sparkspread



Figuur 16 Illustratie van een sparkspread WKK



Figuur 17 Verloop sparkspread voor een typische gasturbine vanaf 2002

bedrijf is er eventueel de mogelijkheid het bedrijfsproces aan te passen en de geproduceerde elektriciteit aan het net te leveren.

Als een WKK-producent onverhoopt zijn geplande levering aan het net door een storing of andere problemen niet kan maken, zal hij een onbalans in het net veroorzaken. De kosten ('boete') hiervoor bedragen dan in principe de onbalanskosten. Dit hangt echter ook af van de portfolio van de PV-partij. Bij een langdurige stilstand door bijvoorbeeld machinebreuk zal de WKK-producent zijn contract mogelijk af moeten kopen, wat uiteraard extra kosten oplevert.

De sparkspread

Het financiële rendement van een WKK-installatie wordt voor een belangrijk deel bepaald door de hoogte van de prijzen van elektriciteit, van gas en van de daaraan gerelateerde warmte. De relatie tussen de gas- en de elektriciteitsprijs kan in een sparkspread worden uitgedrukt. Dit is de brutomarge, uitgedrukt in euro's per geproduceerd MWh. Deze brutomarge is afhankelijk van de technische specificaties van de WKK-installatie en hieruit moeten onder andere de afschrijving en het onderhoud van de installatie worden bekostigd.

Als voorbeeld is in figuur 16 de sparkspread berekend voor een gasturbine met afgassenketel met een elektrisch rendement van 31,6% en een thermisch rendement van 46%. De geproduceerde warmte of stoom wordt vergeleken met een ketel met een rendement van 90%. Hieruit blijkt dat er voor de productie van 1 MWh elektriciteit 3,2 MWh gas nodig is. Omgerekend (op onderwaarde) naar aardgas betekent dit een hoeveelheid gas van circa 367 m³. Naast elektriciteit (1 MWh) wordt er ook warmte geproduceerd (circa 1,5 MWh). Deze wordt verrekend alsof zij uit een ketel komt. De sparkspread (het verschil tussen opbrengsten en kosten) is in dit voorbeeld $121 - 99 = € 22/MWh$.

In figuur 17 is het verloop over de afgelopen jaren te zien van de sparkspread voor diezelfde gasturbine met een afgassenketel. De spread is berekend op basis van commodityprijzen voor de groothandel, dus zonder enige opslagen, met de veronderstelling dat de prijzen voor elektriciteit en aardgas op hetzelfde moment worden vastgelegd. Er wordt gebruik gemaakt van forwardprijzen voor levering in het volgende jaar. Om die reden zitten er af en

toe sprongetjes bij het begin van het jaar. Om een en ander in perspectief te plaatsen: de investeringskosten voor de installatie in deze sparkspread bedragen circa € 1.250.000 per MWe (exclusief subsidies). Bij 8.000 bedrijfsuren en bij een afschrijving in 10 jaar tegen 7% rente zijn de afschrijvingskosten inclusief rente circa € 22 per MWh. De onderhoudskosten bedragen circa € 7/MWh. De sparkspread moet dan dus minimaal € 29 per MWh zijn om de kosten voor onderhoud, rente en afschrijving volledig te dekken.

3.2.5 Subsidie en fiscale voordelen

Er zijn diverse stimuleringsregelingen die de toepassing van een WKK-installatie aantrekkelijk maken. In deze paragraaf wordt een aantal landelijke subsidies en financieringsmogelijkheden besproken die anno 2008 actueel zijn. Veel sectoren maken reeds gebruik van WKK-installaties. Voor deze sectoren zal er, naast de standaardregelingen zoals EIA en SDE, weinig extra ondersteuning in de vorm van subsidies mogelijk zijn. Uiteraard is er wel extra steun bij projecten die als koploper de toepassing van WKK in nieuwe sectoren moeten stimuleren. Ook innovatieve WKK-toepassingen kunnen op die wijze worden ondersteund.

Energie Investering Aftrek (EIA)

De EIA bestaat sinds 1 januari 1997. Het is één van de instrumenten waarmee de overheid het Nederlandse bedrijfsleven stimuleert om voor energiezuinige bedrijfsmiddelen en duurzame energie te kiezen. Ondernemers kunnen 44% van de investeringen aan energiebesparende bedrijfsmiddelen van de fiscale winst (naast de normale afschrijving) aftrekken. Daarbij is de aftrek voor WKK gemaximeerd op € 350/kW voor motoren en op € 600/kWe voor overige installaties.

Met name bij kleine WKK-installaties ligt dit maximum aanmerkelijk lager dan de daadwerkelijke investeringen. De regeling is een initiatief van het Ministerie van Economische Zaken. De Belastingdienst en SenterNovem verzorgen de uitvoering van de regeling. Vanaf 2008 maakt de EIA onderscheid tussen warmtekrachtinstallaties aangedreven door zuigermotoren en installaties aangedreven door andere krachtwerktuigen. Warmtekrachtinstallaties met een groter elektrisch vermogen dan 150 MWe komen niet meer voor EIA in aanmerking. Deze grens is ingevoerd om de EIA juist te richten op 'kleinschalige' en decentrale opwekking van warmte en kracht.

Op de zogenaamde Energielijst is te vinden welke bedrijfsmiddelen voor EIA in aanmerking komen, bijvoorbeeld aanschaf- en montagekosten en voorzieningen die technisch noodzakelijk of dienstbaar voor de WKK-installatie zijn, zoals leidingen. Onderhoudskosten komen niet voor vergoeding in aanmerking en ontvangsten uit andere subsidies moeten van het investeringsbedrag worden afgetrokken. De kosten voor een energieadvies komen wel voor EIA in aanmerking, mits het advies ook in een daadwerkelijke energie-investering resulteert.

Energie-onderzoeksubsidies (EOS)

Er zijn vier typen EOS-subsidies, waarvan met name de EOS-Demonstratie relevant kan zijn. Deze subsidie is bedoeld voor het implementeren van nieuwe energietechnologieën in de omgeving waarin ze daadwerkelijk toegepast gaan worden. Voorwaarde voor deze regeling is dat het project nieuw is in Nederland. Binnen de EOS-Demonstratie zijn de meerkosten van de investering aan materiaalkosten subsidiabel ten opzichte van een referentiesituatie. Ook op regionaal niveau bestaan er subsidieregelingen. De beschikbaarheid daarvan verschilt per provincie. Hier wordt in dit boek niet verder op ingegaan.

Groenfinanciering

Met een groenfinanciering kan er tegen gunstige voorwaarden geld worden geleend voor de realisatie van projecten waarbij milieuwinst wordt geboekt. Groenfinanciering wordt verstrekt wanneer een investering interessant is met het oog op risico, milieubelang en economisch rendement, terwijl het project zonder groenfinanciering niet realiseerbaar zou zijn. Het projectvermogen moet daarnaast minimaal € 22.689 bedragen. De ervaring leert dat het rentetarief bij groenfinanciering 1 tot 1,5% lager kan liggen dan normaal.

Om in aanmerking te komen voor groenfinanciering moet er een groenverklaring afgegeven zijn. De regeling Groenprojecten regelt welke milieuprojecten in Nederland een groenverklaring kunnen krijgen. Het ministerie van VROM verstrekt deze verklaringen. Een Groenfonds van de bank vraagt de subsidie aan bij de Dienst Regelingen van het Ministerie van LNV of bij SenterNovem. Deze aanvraag neemt ongeveer acht weken in beslag. Er zijn diverse banken die groenfinancieringen verlenen; zij hanteren verschillende regels ten aanzien van rentepercentages, kredietrisico's, etc.

3.2.6 Bepaling van de rentabiliteit

Voor een nauwkeuriger bepaling van de rentabiliteit van de investering in de WKK-installatie voldoet de eerder aangehaalde SPOT niet meer. Doorgaans bepalen bedrijven de rentabiliteit op basis van de Netto Contante Waarde (NCW) of de Internal Rate of Return (IRR).

De NCW-methode hanteert het principe dat geld in de toekomst minder waarde heeft dan op dit moment het geval is. Er wordt een interne rente gehanteerd waarmee toekomstige cashflows lager gewaardeerd worden. Als voorbeeld wordt hier een jaarlijkse cashflow van € 1.000 gebruikt met een looptijd van 10 jaar. Deze cashflow levert over 10 jaar een bijdrage op van € 1.000 / (1+r)¹⁰ = € 385,- (bij een rente (r) van = 10%). De som van alle NCW's van alle jaren binnen de looptijd minus de initiële investering (dit is een negatieve cash-flow) geeft de totale NCW aan het eind van de looptijd weer. De interne rente (of disconteringsvoet) wordt in veel gevallen bepaald op 10%.

De IRR-methode werkt in principe hetzelfde als de NCW-methode, zij het dat nu de rente wordt berekend waarmee de NCW over de looptijd precies nul is. Vervolgens wordt de IRR vergeleken met datgene wat binnen het bedrijf als criterium wordt gehanteerd. Een IRR van 15% is gebruikelijk en komt bijvoorbeeld ook voor in de milieuvergunning bij energiebesparingsmaatregelen. Een IRR van 15% (vóór belasting) komt ongeveer overeen met een SPOT van vijf jaar (bij jaarlijks gelijke cashflows). Voorbeelden met de NCW- en de IRR-methode staan in tabel 10.

Naast de rentabiliteit kijken bedrijven ook naar de investeringsruimte die er op dat moment is. Uit het oogpunt van de milieuwetgeving is het meestal verplicht om bij een IRR van meer dan

Een project vergt een investering van € 500 en levert jaarlijks een besparing op de exploitatielasten op van € 100.
De disconteringsvoet is 10% met een duur van 10 jaar.
NCW: $(100/(1+0,1) + 100/(1+0,1)^2 + \dots + (100/(1+0,1)^{10}) - 500 = 113$
IRR (de rente i is hier het resultaat): $(100/(1+i) + (100/(1+i)^2 + \dots + (100/(1+i)^{10}) = 500 \Rightarrow i = 15\%$

Tabel 10 Voorbeeld Netto Contante Waarde en IRR

15% een WKK-installatie te plaatsen als dit technisch mogelijk is. Wanneer het bedrijf niet zelf wil investeren, is financiering door derden een mogelijkheid. Op basis van de economische gegevens kan ook worden beoordeeld of het draaien van een WKK-installatie in deellast rendabel is. Daarbij moet wel goed gekeken worden of de rendementen niet te laag zijn en wat de hoogte van de onderhoudskosten van de installatie is. Zo kan dan het marginale resultaat bepaald worden. Als bij een bepaalde belasting de baten niet tegen de opbrengsten opwegen, moet het systeem worden stilgezet, mits het hierdoor niet te vaak schakelt. Vaak blijkt dat het draaien op deellast in nachtsituaties niet haalbaar is, bijvoorbeeld als de onderhoudskosten erg hoog zijn.

3.2.7 Haalbaarheidsberekeningen

In deze paragraaf volgen enkele voorbeelden van haalbaarheidsberekeningen gebaseerd op het jaar 2007. De voorbeelden betreffen drie cases:

- Een grote STEG van 255 MWe.
- Een gasturbine met een afgassenketel (GT/AK) van 7 MWe.
- Een gasmotor bij een tuinder van 1.500 kWe.

Voor de cases 1 en 2 wordt uitgegaan van een back-upcontract van zes weken, voor case 3 wordt geen back-upcontract afgesloten. Alle installaties worden afgeschreven in tien jaar. De STEG en GT/AK leveren in deze cases stoom aan een industriële afnemer. De gasmotor produceert warmte voor de kas en gebruikt daarbij een buffer om tijdens de plateau-uren zoveel mogelijk draaiuren te maken. De energieprijzen zijn vastgesteld alsof deze in het vierde kwartaal van 2006 zijn afgesloten voor afname in 2007:

- Gasprijsniveau: forwardprijzen voor 2007 van het vierde kwartaal 2006 (21,7 ct/m³) met de dienstentarieven conform het entry-/exitsysteem in 2007.
- Marktprijs van elektriciteit: € 93,9/MWh voor plateau- en € 39,8/MWh voor daluren. Bij teruglevering aan het net wordt een 'korting' van 10% gehanteerd.

Voor investeringssubsidies is uitgegaan van 11,2% voordeel van de EIA voor zover het Senterrendement groter is dan 65% (in dit geval alleen bij de gasmotor-case). Het financiële resultaat van de cases is berekend in termen van de terugverdientijd en de interne rendementsvoet – beide na verrekening van rente en belasting. De resultaten staan in de nevenstaande tabellen. Wat met name

opvalt is dat de gasmotor-case een zeer korte terugverdientijd heeft en daarmee een hoge IRR (Internal Rate of Return). Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in het feit dat de motor in dit voorbeeld erg goedkoop in aanschaf en onderhoud is en door gebruik van een warmtebuffer vooral tijdens de plateau-uren kan draaien. Door de hoge rendementen (zowel thermisch als elektrisch) is de gasmotor een ideale manier om bij relatief kleinere locaties energie te besparen.

De STEG-case heeft een terugverdientijd van 5,6 jaar doordat de STEG ook tijdens de daluren ten behoeve van stoomlevering zal draaien. De terugverdientijd van deze case is mede zo hoog omdat de EIA door een te laag Senterrendement niet van toepassing is. De case met de gasturbine gecombineerd met de afgassenketel heeft een terugverdientijd die buiten de projectperiode valt. De kostenbesparing die met de WKK bereikt wordt, is niet hoog genoeg om de investering in de WKK-installatie binnen de looptijd terug te verdienen.

	Bedrijfs-tijd in uren	% productie tijdens plateau-uren	Eigen afname elektriciteit	Investering (€/kWe)	Onderhoud (ct/kWh)
1. STEG	6800	54%	25%	634	0,49
2. GT/AK	6100	60%	25%	1412	1,04
3. Gasmotor	4200	90%	0%	470	0,65

Tabel 11 Uitgangspunten rekenvoorbeelden

	TVT (jaar)	IRR
1. STEG	5,6	12,3%
2. GT/AK	> project	-4,2%
3. Gasmotor	2,5	34%

Tabel 12 Resultaten rekenvoorbeelden

STEG		
WKK karakteristiek		
Elektrisch rendement	43,9	%
Thermisch rendement	28,5	%
Elektrisch vermogen	255.000	kWe
Referentieketel	90	%
Energiehuishouding		
	referentie	WKK
Inkoop gas (m³)	142.270.779	449.276.145
Inkoop elektriciteit daluren (kWh)	239.700.000	14.981.250
Inkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	270.300.000	16.893.750
Verkoop elektriciteit daluren (kWh)	-	572.921.250
Verkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	-	682.953.750
Exploitatie in €		
	referentie	WKK
Gaskosten	31.986.523	101.035.203
Energiebelasting gas	1.191.697	-
Elektriciteitskosten	39.536.753	3.377.556
Energiebelasting elektriciteit	103.483	103.483
Onderhoud	-	8.496.600
Warmtekorting	-	3.203.600
Verkoop elektriciteit	-	76.691.573
Ondersteuning MEP	-	-
Resultaat		
	-72.818.455	-39.524.869
Verschil WKK versus ketel		
		33.293.586
Investering		
		161.670.000
Terugverdientijd (na belasting)		
		5,59
IRR (%)		
		12,3

Tabel 13 Rekenvoorbeeld STEG 255 MWe

Gasturbine met afgassenketel		
WKK karakteristiek		
Elektrisch rendement	28,5	%
Thermisch rendement	44,8	%
Elektrisch vermogen	7.000	kWe
Referentieketel	90	%
Energiehuishouding		
	referentie	WKK
Inkoop gasinkoop (m³)	8.482.958	17.041.656
Inkoop elektriciteit daluren (kWh)	5.600.000	350.000
Inkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	8.400.000	525.000
Verkoop elektriciteit daluren (kWh)	-	11.830.000
Verkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	-	17.745.000
Exploitatie in €		
	referentie	WKK
Gaskosten	1.925.676	3.869.988
Energiebelasting gas	142.083	-
Elektriciteitskosten	1.289.688	127.516
Energiebelasting elektriciteit	103.483	10.408
Warmtekorting	-	198.119
Onderhoud	-	444.763
Verkoop elektriciteit	-	1.891.440
Ondersteuning MEP	-	-
Resultaat		
	-3.460.930	-2.759.354
Verschil WKK versus ketel		
		701.576
Investering		
		9.886.240
Terugverdientijd (na belasting)		
		>projectperiode
IRR (%)		
		-4,2

Tabel 14 Rekenvoorbeeld gasturbine met afgassenketel 7 MWe

Gasmotor in de tuinbouw		
WKK karakteristiek		
Elektrisch rendement	41,0	%
Thermisch rendement	48,0	%
Elektrisch vermogen	1.500	kWe
Referentieketel	95	%
Energiehuishouding		
	referentie	WKK
Inkoop gas (m³)	883.086	1.747.775
Inkoop elektriciteit daluren (kWh)	-	-
Inkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	-	-
Verkoop elektriciteit daluren (kWh)	-	630.000
Verkoop elektriciteit plateau-uren (kWh)	-	5.670.000
Exploitatie in €		
	referentie	WKK
Gaskosten	214.819	424.757
Energiebelasting gas	17.181	-
Elektriciteitskosten	-	-
Energiebelasting elektriciteit	-	-
Onderhoud	-	40.925
Warmtekorting	-	-
Verkoop elektriciteit	-	472.257
Ondersteuning MEP	-	49.392
Resultaat		
	-232.000	55.968
Verschil WKK versus ketel		
		287.968
Investering		
		705.600
Terugverdientijd (na belasting)		
		2,45
IRR (%)		
		34,0

Tabel 15 Rekenvoorbeeld gasmotor in de tuinbouw 1.500 kWe

3.3 Uitwerking en realisatie

Nadat de mogelijkheden van WKK onderzocht zijn en er vastgesteld is welk WKK-systeem het best aansluit bij de gestelde wensen, kan een project tot de definitieve investeringsbeslissing worden vervolgd. In deze paragraaf wordt ingegaan op de belangrijkste aandachtspunten voor de daadwerkelijke realisatie van een project. Het gaat hierbij o.a. om de aanbesteding van de installatie, om de geldende regelgeving en om vergunningen en financiering. Daarna komen de realisatie en het in bedrijf nemen aan de orde.

3.3.1 Het definitieve ontwerp en de aanbesteding

Voor het uitwerken van het definitieve ontwerp bestaan er, afhankelijk van de contractvorm, verschillende mogelijkheden. Het is gebruikelijk dat de opdrachtgever de hoofdcomponenten (de gasturbine, de stoomturbine en de ketel of gasmotor) als deellevering aanvraagt bij leveranciers en zelf de engineering van de warmtekrachtinstallatie verzorgt. De opdrachtgever zorgt ook voor het ontwerp van het gebouw en de fundaties (civiel), een verbindend leidingwerk met alle warmtewisselaars en pompen (piping of ook wel 'balance of plant'), de bekabeling van elektriciteit en instrumentatie (electrical and instrumentation), het besturingssysteem en de afwerking (miscellaneous). Veelal wordt dit alles in samenwerking met een ingenieursbureau gedaan omdat dit proces veel engineeringcapaciteit vraagt.

Het voordeel van deze aanpak is dat de opdrachtgever het hele ontwerp zelf bepaalt en dus alles zelf in de hand heeft. Deze werkwijze leent zich daarom vooral voor unieke installaties. Het grootste nadeel is dat het risico voor het functioneren van de installatie bij de opdrachtgever komt te liggen. Juist in de onderlinge aansluiting tussen de componenten en de totale regeling van de installatie gaat er geregeld wat mis. Daarnaast moet de omvang van de werkzaamheden en de benodigde kennis niet onderschat worden.

Een tweede mogelijkheid is dat de leverancier van de hoofdcomponenten de gehele WKK-installatie ontwerpt en levert. Vaak gebeurt dit met een zogenaamde turn-key aanbidding: de installatie wordt ontworpen en vervolgens compleet werkend opgeleverd. Voor de opdrachtgever is het dan vooral van belang om de installatie heel goed te omschrijven (specificeren) in een aanvraagspecificatie ('specification' of 'bid book'). Daarbij gaat het met name om de volgende aspecten:

- De minimale leveringsomvang
- Functionele eisen (elektrische capaciteit, warmtelevering, wijze van bedrijven, etc.)
- Procescondities
- De locatie, beschikbare ruimte en middelen
- Kwaliteitseisen aan geleverde materialen en componenten
- De van toepassing zijnde normen en standaarden
- Landelijke en specifieke locatie-eisen
- Milieu- en vergunningseisen
- De benodigde documentatie bij de offerte en bij levering

Zorgvuldigheid is hierbij belangrijk omdat elementen die vergeten zijn, later tot extra kosten kunnen leiden. Zo resulteert een latere aanscherping van geluidseisen bijvoorbeeld altijd in extra kosten. De leverancier levert, samen met de aanbidding, documenten en berekeningen op die voor de vergunningverlening van belang

zijn, zoals processchema's, opstellings- en aanzichttekeningen en geluidsberekeningen. De documenten stellen de opdrachtgever ook in staat om de aanbidding te beoordelen op leveringsomvang en kwaliteit. Een gedetailleerd schema (P&ID of Piping and Instrumentation Diagram) geeft, beter dan een omschrijving, aan uit welk aantal pompen, instrumentatie, warmtewisselaars e.d. de installatie is opgebouwd. Zo'n schema moet daarom altijd bij een aanbidding worden opgevraagd.

Bij grote industriële warmtekrachtinstallaties boven de 50 MWe vindt een aanbidding vaak in consortiumverband plaats. Door deze constructie wordt het risico over meer leveranciers verdeeld. De werkwijze met betrekking tot het ontwerp en de levering van de installatie komt grotendeels overeen met de wijze zoals hierboven beschreven is. Wel is deze constructie juridisch complexer en vraagt zij meer inspanning van de opdrachtgever om op de uitvoering toe te zien.

De levering van een WKK-installatie laat zich goed als een complete (turn-key) levering bij een hoofdaannemer of consortium onderbrengen, omdat een WKK-installatie minder uniek is dan een doorsnee fabriek. De hoofdaannemer (contractor), meestal de leverancier van een van de hoofdcomponenten, kan putten uit een aantal standaardconfiguraties voor de WKK-installatie met de bijbehorende schema's, besturingen, etc. Herstel van eventueel eerder gemaakte fouten is meestal in het ontwerp verwerkt en bij problemen zijn het aanspreekpunt en de verantwoordelijkheid duidelijk. Het biedt voor de opdrachtgever dus voordelen om met deze constructie te werken. Het moet echter niet onderschat worden dat er ook in deze situatie nog een behoorlijke basis-kennis bij de opdrachtgever aanwezig moet zijn of moet worden ingehuurd.

Een gasmotor-WKK wordt vrijwel altijd als een complete 'package' geleverd, inclusief warmtewisselaars, generator, elektrische schakelingen, besturing en omkasting. Het overnemen van een deel van de levering leidt gemakkelijk tot technische problemen en discussie over aansprakelijkheid.

Het is voor de opdrachtgever belangrijk om na te gaan welke delen nog buiten de levering van de (turn-key) leveranciers vallen. Hierbij kan gedacht worden aan het bouwrijp maken, terreinver-

harding/wegen, koelwatervoorzieningen, aansluitingen op stoom, water, aardgas en elektriciteit, en procedurele zaken zoals MER en aanvullende onderzoeken. Deze onderdelen kunnen nog tot aanzienlijke kosten leiden en zijn ook voor de vergunningsaanvraag van belang.

Bijna alle bedrijfslocaties in Nederland zijn voorzien van een verbinding met het aardgasnet, maar de aansluitcapaciteit is lang niet altijd voldoende voor de hogere gascapaciteit die een WKK-installatie nodig heeft. Ook in het transport- en distributienet blijkt de laatste jaren echter een schaarste aan capaciteit te zijn ontstaan. Hetzelfde geldt voor het elektriciteitsnet. Daarom is het van groot belang om al in een vroeg stadium van het project overleg met het netwerkbedrijf te voeren over de beschikbare capaciteit van beide netten. Voor het definitieve ontwerp van de installatie is het van belang dat de plaats van de netverbinding bekend is, evenals het moment waarop de netverbinding gerealiseerd kan worden en, door een 'harde' offerte van het netwerkbedrijf, de kosten van de netverbinding.

Aanbesteding

Er zijn verschillende manieren van aanbesteding. Dit boek beperkt zich tot enkele basiszaken. Voor een goede doorloop van de aanbesteding is een aantal stappen noodzakelijk. Deze stappen vereisen mankracht, kennis en tijd. Bij gebrek aan een van deze drie onderdelen bestaat het risico op problemen die gedurende het hele project blijven opspelen.

Grofweg moeten tijdens een aanbesteding de volgende stappen worden doorlopen:

- Het specificeren van levering en onderhoud
- De selectie van aanbieders
- Het aanvragen van offertes
- De evaluatie van de aanbiedingen
- Onderhandelingen en het bestelgereed maken

Het specificeren van de installatie is hierboven beschreven. Het is zeer aanbevelenswaardig om tegelijk met de aanbidding voor de WKK-installatie een aanbidding voor meerjarig onderhoud aan te vragen. Ook daarvoor moet een aanvraagspecificatie geschreven worden, vooral om aan te geven waaruit het onderhoud moet bestaan, wat de opdrachtgever zelf doet en wat de voorwaarden

zijn. Vaak is er slechts een beperkt aantal onderhoudspartijen voor een WKK-installatie. Voor de hoofdcomponenten is de afnemer vaak gedwongen het onderhoud door de leverancier te laten uitvoeren. Als er pas ná de aanbesteding een onderhoudscontract wordt aangevraagd, brengt dit de opdrachtgever in een commercieel lastige positie.

De selectie van aanbieders is op basis van de specificatie meestal gemakkelijk te maken. Bij grote installaties vindt er vaak een pre-kwalificatie plaats om te voorkomen dat er aan teveel partijen een gedetailleerde aanbieding wordt gevraagd. Het schrijven van een complete aanbieding met een achterliggend ontwerp is voor een aanbieder namelijk een zeer kostbaar proces. Aanbieders moeten dan ook de nodige tijd krijgen om een offerte aan te leveren. Voor een 'package', zoals een gasmotor, volstaat een periode van drie tot vier weken – voor een grootschalige industriële WKK-installatie bedraagt deze al snel twaalf tot zestien weken.

De evaluatie van aanbiedingen kost vaak meer tijd dan in eerste instantie verwacht wordt. Er gaat veel tijd zitten in het vergelijkbaar maken van de aanbiedingen. Dat wil zeggen dat er nog allerlei aanvullende vragen gesteld en prijzen opgevraagd moeten worden, voordat de aanbiedingen volledig aan de specificaties voldoen en met elkaar kunnen worden vergeleken. Daarna is de evaluatie snel gemaakt. Voor deze fase moet voor een gasmotor een periode van drie tot vier weken worden uitgetrokken en voor een industriële installatie zes tot acht weken.

Garanties en clauses

Het is aanbevelenswaardig om op zijn minst garanties te verlangen voor prestaties en rendementen, de beschikbaarheid en betrouwbaarheid, de rookgas- en geluidsemisatie en de oplevertermijn. Daarbij moet er goed op gelet worden dat de definities voor alle onderdelen correct omschreven zijn; garanties zonder boeteclausules zijn weinig waard. Daarom moet er aan iedere garantie een boeteregeling worden opgehangen, al dan niet met een bonusregeling (bonus/malus), bijvoorbeeld als het rendement iets beter uitpakt dan is aangeboden. Voor rookgas- en geluidsemisaties gelden de minimale vergunnings- of wettelijke eisen. Eventueel kan er voor een lagere emissie een bonus worden overeengekomen, die voor de inrichting extra voordelen kan bieden. Nadat alle details van een aanbieding zijn uitge-

werkt, is er meestal een finale eindonderhandeling, waarin de definitieve aanneemsom bepaald wordt. Vaak vindt er daarbij ook nog afstemming plaats over allerlei inkoopvoorwaarden, zoals betalingstermijnen, garanties en de hoogtes van boeteclausules. Uiteraard moeten alle details van de besprekingen en onderhandelingen eenduidig zijn vastgelegd, alles met bevestiging van de leverancier. Daarna is de levering bestelgereed.

3.3.2 Regelgeving en vergunningen

In deze paragraaf worden de aspecten van regelgeving en vergunningen beschreven die van belang zijn voor WKK-installaties. Voor WKK-installaties op aardgas zijn vooral de emissie- en geluidseisen per individuele installatie een aandachtspunt. Daarnaast gelden er diverse algemene eisen, die beschreven zijn in het Besluit Voorzieningen en Installaties. Bovendien kunnen grote industriële WKC's (WarmteKrachtCentrales) en stadsverwarmingscentrales met de MER-plicht te maken krijgen. De relevante eisen en aspecten daarvan worden hieronder beschreven. WKK-installaties staan vaak op een inrichting die verplicht te maken heeft met CO₂- en NO₂-emissiehandel (de consequenties hiervan komen hieronder aan de orde). Grofweg is een inrichting een bedrijf of instelling. De 'inrichting' is een centraal begrip in de Wet milieubeheer.

Vergunningsprocedure

Of een inrichting vergunningsplichtig is, is geregeld in het 'Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer', beter bekend als het Activiteitenbesluit (Stb 415). Dit Besluit is per 1 januari 2008 van kracht geworden en vervangt voor diverse sectoren de 8.40 AmvB. Valt een inrichting in een categorie waarvoor het Activiteitenbesluit geldt, dan kan voor een WKK-installatie veelal volstaan worden met melding bij het bevoegde gezag, meestal de Gemeente. In het Activiteitenbesluit wordt verwezen naar de onderliggende regelgeving waaraan de WKK-installatie moet voldoen. Voor de glastuinbouw gelden zowel het Besluit Glastuinbouw (8.40 AmvB) als de eisen die in hoofdstuk 3 van het Activiteitenbesluit worden genoemd.

Inrichtingen die voor de Wet milieubeheer vergunningsplichtig zijn, moeten de normale vergunningsaanvraag- of wijzigingsprocedure doorlopen, ervan uitgaande dat de installatie binnen het bestemmingsplan past. Als dat niet het geval is, kan met een artikel

19.1-procedure een wijziging op het bestemmingsplan worden aangevraagd. De doorlooptijd daarvan is ongeveer een jaar. Een normale vergunningsaanvraag of -wijziging heeft een totale doorlooptijd van ca. zes maanden. Daarbij is het in de fase van de conceptvergunningsaanvraag van belang, goed met de betrokken ambtenaren te overleggen zodat alle eventuele aanvullende eisen op voorhand kunnen worden verwerkt.

Na het indienen van de definitieve aanvraag en het opstellen van een ontwerpbesluit, wordt deze gepubliceerd en ligt zij zes weken ter inzage. Belanghebbenden (bijvoorbeeld omwonenden en milieuorganisaties) kunnen hun standpunt met betrekking tot de aanvraag kenbaar maken of een hoorzitting aanvragen met de Provincie. Hierna wordt de definitieve beschikking opgesteld en wederom zes weken ter inzage gelegd. Belanghebbenden die in de eerste ronde hun standpunt al kenbaar hadden gemaakt, kunnen bij de Raad van State beroep tegen de vergunning aantekenen. Als er in deze zes weken geen beroep aangetekend is, wordt de vergunning vanaf zes weken na de ter inzage legging van kracht. Na de vergunningverlening kan er controle van de installatie door een vertegenwoordiger van de gemeente of provincie plaatsvinden.

Bevoegd gezag

Het bevoegd gezag voor de vergunningen verschilt per installatie. In principe is de Provincie bevoegd gezag als er een WKK-installatie wordt geplaatst die binnen een inrichting, waarvan de Provincie al bevoegd gezag is, valt en die een brandstof-input heeft van meer dan 50 MW (~ 15 tot 25 MWe). In alle andere gevallen is de Gemeente bevoegd gezag.

Bouwvergunning

Er moet een bouwvergunning aangevraagd worden als de WKK-installatie bij een buitenopstelling geplaatst wordt, als er verbouwingen aan de buitengevel noodzakelijk zijn, als bepaalde bedrijfsruimten een functiewijziging ondergaan en als er bouwkundige of constructieve elementen aangelegd moeten worden. Voordat er een aanvraag wordt ingediend, moet er dus altijd eerst met de gemeenteambtenaar overlegd worden. Als er een bouwvergunning nodig is, wordt deze pas verleend wanneer de milieuvergunning is afgegeven. Voor de bouwvergunning worden bouwkundige en aanzichtsaspecten (welstand) beoordeeld. Hier

kunnen aanvullende eisen uit voortvloeien. Een bouwvergunning kan worden aangevraagd bij de betreffende Gemeente; hiervoor is een standaard formulier beschikbaar. Over een reguliere bouwvergunning moet door de Gemeente binnen twaalf weken worden beslist. Deze termijn kan eenmaal, als daar aanleiding toe is, met zes weken verlengd worden. Aan de bouwvergunning zijn kosten verbonden, die per Gemeente verschillen. Voor meer informatie kan men terecht bij de Gemeente of bij het Ministerie van VROM (www.vrom.nl > bouwen en verbouwen > bouwregelgeving).

IPPC

Inrichtingen en installaties in Nederland moeten voldoen aan de IPPC-richtlijn (Europese Richtlijn 96/61/EG met betrekking tot geïntegreerde preventie en bestrijding van verontreiniging). Dit betekent dat vergunningen gebaseerd moeten zijn op de best beschikbare technieken (BBT). Het begrip BBT is enigszins subjectief en hangt ook van de lokale omstandigheden af. In de definitie van BBT zit onder andere het element economische haalbaarheid, dat voor nieuwbouw maar ook voor een eventuele verplichte aanpassing van bestaande installaties van belang is.

Als richtlijn voor het vaststellen van wat BBT is, is er een BBT-referentiedocument opgesteld (BREF, zie <http://eippcb.jrc.es>). In Nederland is deze richtlijn verwerkt in de Wet milieubeheer; deze zal ook in de BEES (emissie-eisen) opgenomen worden. Dit zal voor WKK-installaties over het algemeen betekenen dat als aan BEES A of B voldaan wordt, dit tot BBT wordt gerekend.

MER

Voor grote installaties kan een milieueffectrapportage (MER) een vereiste zijn. Voor installaties met een vermogen dat kleiner is dan 10 MWe is doorgaans geen MER nodig, maar bij plaatsing in een kwetsbaar milieu kan er toch om een MER worden gevraagd. Bij installaties met een groter vermogen dan 10 MWe, maar met een kleinere brandstofinput dan 300 MWth (~ 90 tot 150 MWe) wordt per geval bekeken of een MER noodzakelijk is. Bij grotere installaties is een MER altijd verplicht. De uitvoering van de MER verlengt de doorlooptijd met ca. één jaar en de projectkosten stijgen met ca. € 100.000 tot € 150.000. Een handleiding voor de MER is te vinden op de site van Infomil: www.infomil.nl (> wetgeving & handhaving > MER).

Besluit voorzieningen en installaties

Het 'Activiteitenbesluit voorzieningen en installaties' is van toepassing op WKK-installaties met een totaal motorisch vermogen dat kleiner is dan 15 MWe. Het besluit verwijst voor regelgeving voor installaties naar de 'Regeling algemene regels voor inrichtingen milieubeheer' (Staatscourant 223). Hierin staan regels voor WKK-installaties en wordt er verwezen naar het 'Besluit Voorzieningen en Installaties', kortweg BV&I (Stb 487). Dit laatste besluit geldt alleen voor inrichtingen waarvoor de Gemeente als bevoegd gezag optreedt, de installatie geen groter nominaal elektrisch vermogen dan 10 MWe heeft en geen andere brandstof gebruikt dan aardgas, propaan- of butaangas. Hieronder volgt een opsomming van de meest relevante regels volgens beide regelingen.

Voor gasmotoren geldt dat:

- Zij in een afgeschermd, veilige en brandveilige ruimte opgesteld moeten worden.
- Deze opstelling conform de 'Veiligheidsvoorschriften voor gasmotoren' van de Commissie Veiligheid Installaties voor het stoken van Aardgas (Visa, deel C 1994) moet zijn.
- Er een jaargemiddeld 'Senterrendement' is van ten minste 60% (elektrisch rendement en tweederde van thermisch rendement).
- Er een warmtemeter noodzakelijk is als er structureel warmte vernietigd wordt.
- De emissie-eisen conform BEES-B moeten zijn.
- Er geluidseisen zijn (tabel 1).

Voor gasturbines geldt dat:

- Zij in een afgeschermd, veilige en brandveilige ruimte opgesteld moeten worden.
- Deze opstelling conform de 'Veiligheidsvoorschriften voor het gebruik van aardgas in gasturbines' van de Commissie Veiligheid Installaties voor het stoken van Aardgas (N.V. Nederlandse Gasunie, uitgave 1997, 2^e druk) moet zijn.
- Er een jaargemiddeld 'Senterrendement' van ten minste 60% (elektrisch rendement en tweederde van thermisch rendement) is.
- De emissie-eisen conform BEES-B (indien de Gemeente bevoegd gezag is) moeten zijn.
- Er geluidseisen zijn (tabel 1).

Tijdstip	07:00 - 19:00	19:00 - 23:00	23:00 - 07:00
LAr, LT op de gevel van woningen	50 dB(A)	45 dB(A)	40 dB(A)
LAr, LT in in- en aanpandige woningen	35 dB(A)	30 dB(A)	25 dB(A)
LAmx op de gevel van woningen	70 dB(A)	65 dB(A)	60 dB(A)
LAmx in in- en aanpandige woningen	55 dB(A)	50 dB(A)	45 dB(A)

Tabel 1 Geluidseisen WKK per tijdblok. Bron: BV&I

Als een installatie groter is dan 15 MWe valt zij niet onder het Activiteitenbesluit en moet er een vergunningsprocedure doorlopen worden. BV&I geldt dan niet, BEES-A wel. Het bevoegd gezag kan dan voor emissies BEES-A (of scherper) volgen en voor de overige eisen zelf, binnen de wetgevende kaders, vaststellen wat van toepassing is. In de praktijk betekent dit meestal dat het bevoegd gezag de eisen uit het BV&I overneemt. Als de Provincie als bevoegd gezag optreedt, valt een gasturbine onder BEES-A. Meestal heeft de inrichting dan ook te maken met NO_x-emissiehandel (zie voor beide de aparte paragraaf hierover). Ook voor ingebruikname en beheer, onderhoud en inspecties worden eisen gesteld in het BV&I. Deze eisen worden in dit boek buiten beschouwing gelaten.

Naast de genoemde eisen moeten WKK-installaties natuurlijk voldoen aan de algemeen in Nederland en Europa geldende regelgeving voor apparatuur, waaronder het drukvatenbesluit, de Europese regels voor apparatuur op druk (PED), de Machinerichtlijn (CE-markering) en alle eisen voor elektrische installaties (NEN-EC, etc.). Ook gelden er diverse eisen voor de opslag van gevaarlijke stoffen (olie, brandstof, etc., bijv. CPR 15).

BEES A/B

Het 'Besluit Emissie-Eisen Stookinstallaties', kortweg BEES, is onderverdeeld in een versie A en een versie B. BEES-B is van toepassing voor installaties met een brandstofinput die lager is dan 50 MW (~ 15 MWe); BEES-A geldt voor grotere installaties. Als een installatie onder BEES-A valt is de Provincie automatisch bevoegd gezag. Uitzonderingen zijn gasturbines met een asvermogen van minder dan 1 MW, gasturbines met minder dan 500 draaiuren per jaar en zuigermotoren die minder dan 5.000 uur per jaar een pomp of compressor aandrijven.

Op dit moment is het Ministerie van VROM van plan om BEES-B te actualiseren met scherpere emissie-eisen. De emissie-eis voor NO_x wordt waarschijnlijk 30 gr/GJ en ook zal er een eis voor de emissie van koolwaterstoffen opgenomen worden. Daarnaast worden er aparte eisen voor biomassa toegevoegd. Deze eisen worden in de loop van 2008 bekend en in 2009 van kracht. Voor de gasmotoren zullen deze nieuwe eisen betekenen dat in veel gevallen een DeNO_x-installatie noodzakelijk wordt.

De eisen voor nieuw te bouwen installaties op aardgas zijn in BEES-B op dit moment (medio 2008) als volgt:

Categorie	NO _x -eis medio 2008
Gasmotoren < 50 kWas	800 g/GJ *
Gasmotoren > 50 kWas	140 g/GJ *
Gasturbines	65 g/GJ *
* Hierop is nog een rendementscorrectie van toepassing (vermenigvuldiging met 1/30 van het elektrisch rendement)	

Tabel 2 NO_x-eis in BEES-B medio 2008

Categorie	NO _x -eis medio 2008
Gasturbines < 50 MW brandstof	65 g/GJ*
Gasturbines > 50 MW brandstof	45 g/GJ
* Hierop is nog een rendementscorrectie van toepassing (vermenigvuldiging met 1/30 van het elektrisch rendement)	

Tabel 3 NO_x-eis voor gasturbines in BEES-A medio 2008

Eenzelfde eis geldt voor gasturbine-installaties, dat wil zeggen een combinatie met afgassenketel met eventueel een bijstookbrander – alle eisen conform ISO-condities. In BEES-A gelden voor gasmotoren dezelfde eisen als in BEES-B. Bij gasturbines geldt de eis voor nieuwe installaties conform tabel 3.

Ook hier is er eenzelfde eis voor gasturbine-installaties en zijn er ISO-condities van kracht. Voor bestaande gasmotoren en gasturbines en voor het gebruik van andere brandstoffen kunnen andere eisen gelden. Daarvoor wordt verwezen naar de volledige tekst van BEES-A en B. De actuele versie van BEES-A en B is te vinden op www.overheid.nl. Het bevoegd gezag mag afwijken

van het BEES en een lagere emissie voorschrijven. Reden temeer om pas definitief een WKK-installatie te bestellen als de vergunning onherroepelijk is.

Wet luchtkwaliteit

De wet- en regelgeving met betrekking tot de luchtkwaliteit is vastgelegd in de 'Wet luchtkwaliteit' (Stb. 2007, 414). Deze wet vervangt het 'Besluit luchtkwaliteit 2005' en is bedoeld om de negatieve effecten van te hoge verontreinigingsniveaus te minimaliseren en de lokale luchtkwaliteit te laten voldoen aan de Europese grenswaarden. De Wet luchtkwaliteit richt zich op fijnstof en NO_x. Voor WKK-installaties geldt vooral dat laatste als aandachtspunt. Voor bestaande installaties gelden de oude regels oftewel het overgangsrecht. Voor nieuwe installaties is het van belang te weten hoeveel de emissie van een WKK-installatie toevoegt aan de lokale concentraties. Voor bepaalde projecten met getalsmatige grenzen is vastgesteld dat deze 'niet in betekenende mate' (NIBM) aan de luchtverontreiniging bij mogen dragen. Deze projecten mogen zonder toetsing aan de grenswaarden voor luchtkwaliteit worden uitgevoerd. Een project draagt in 'niet betekenende mate' bij als de 1%-grens niet wordt overschreden. Deze 1%-grens is gedefinieerd als 1% van de grenswaarde voor de jaargemiddelde concentratie van NO_x oftewel 0,4 microgram/m³. De bepaling of dit laatste het geval zal zijn, hangt af van de huidige waarden – het vaststellen daarvan is specialistisch werk. Het verdient aanbeveling om dit onderwerp in het beginstadium van een vergunningsaanvraag met de betrokken ambtenaren te bespreken.

Geluidseisen

In het BV&I worden voorschriften voor geluid genoemd waaraan de desbetreffende WKK-installaties moeten voldoen. Er worden eisen gesteld voor geluidsniveaus op de gevel, in de woning en in aanpandige woningen. Deze eisen zijn verder uitgesplitst voor drie tijdblokken in een etmaal; zie tabel 1.

Inrichtingen die vergunningsplichtig zijn, moeten voldoen aan de eisen van de 'Wet milieubeheer'. Aan een vergunning worden voorschriften verbonden die nodig zijn ter bescherming van het milieu. Het bevoegd gezag heeft enige mate van vrijheid om te beoordelen wat het beschermingsniveau is en aan welke objecten dat geboden wordt. De 'Handreiking industrielawaai en vergunningsverlening'

(1998) is een hulpmiddel bij het bepalen van het beschermingsniveau. De Wet milieubeheer gaat daarbij uit van het feitelijk gebruik van een inrichting. Naast de 'Wet milieubeheer' geldt de 'Wet geluidshinder' (Wgh). Deze wet heeft een meer planologische grondslag. Voor industrieën op gezoneerde industrieterreinen gelden zowel de Wm als de Wgh als toetsingscriteria naast elkaar.

Technisch is er veel mogelijk om de geluidsemisatie naar de omgeving te verlagen. Een geluidswerende omkasting die het directe geluid dempt, is standaard bij zowel gasmotoren als gasturbines. Een standaardeis is 75 dB(A) op 1 meter afstand, maar tegen meerkosten is ook 70 of 65 dB(A) mogelijk. Aan kanalen, ventilatieroosters, rookgasreinigers en schoorstenen wordt veelal een standaardeis gesteld van 75 dB(A) op 1 meter afstand. Ook deze eis kan strenger gesteld worden, bijvoorbeeld op 65 dB(A). Tegen meerkosten kunnen extra dempers op de schoorsteen en ventilatieroosters worden aangebracht. Ook door dikkere (geluids-)isolatie op de kanalen kan deze lage eis gehaald worden. Zo kan een gasmotor zelfs in een woonwijk worden toegepast. Voor gasturbine-installaties gelden min of meer vergelijkbare waarden voor het kanaalwerk, de ketel en de schoorsteen.

Voor een nieuwbouw industriële WKK-installatie is vooral de bijdrage die de installatie aan het geluidsniveau op de zonegrens levert van belang. Hierbij spelen dan niet alleen de geluidsdruk-niveaus zoals opgegeven in $L_p <= 75$ dB(A) een rol, maar ook het totale geluidsvermogen (L_{wr} in dB(A), afhankelijk van het totaal geluiduitstralende oppervlak). Een belangrijk aandachtspunt is het bedrijven van diverse installaties tegelijk, omdat het gezamenlijke geluidsniveau tot een overschrijding van de geluidsnorm kan leiden, daar waar een enkele installatie wél voldoet. Als de waarden op de grens overschreden worden, kan dat aanleiding zijn om scherpere eisen aan een WKK-installatie op te leggen.

Naast de genoemde (vergunningseisen voor de geluidsemisatie naar de omgeving gelden voor het eigen personeel de Arbo-eisen. Voor een ruimte waar medewerkers permanent blootgesteld zijn aan geluid, geldt een geluidseis van 85 dB(A); daarboven is geluidsbescherming vereist. De invloed van een WKK-installatie op het totale geluid in een ruimte is afhankelijk van de ruimte zelf en van vele andere factoren. Uit een geluidsberekening kan herleid worden hoe groot de maximale geluidsbelasting van een

nieuw te plaatsen WKK-installatie mag zijn. Binnen de geluidsomkasting zal het geluidsniveau voor bijv. personeel zonder meer te hoog liggen om onbeschermd naar binnen te gaan. Zie voor verdere informatie www.arbo.nl.

Emissiehandel

Inrichtingen die groter zijn dan 20 MW brandstofinput, vallen vanaf 2005 onder de CO₂-emissiehandel. Voor de waarde van 20 MW worden zowel ketels als WKK-installaties meegerekend. Bij grotere WKK-exploitanten wordt deze waarde dan ook al snel overschreden.

CO₂-emissiehandel

Het systeem van CO₂-emissiehandel is officieel per 1 maart 2005 in werking getreden. Bedrijven in dit systeem hebben per jaar emissierechten nodig om een bepaald aantal tonnen CO₂ uit te stoten. Deelnemende bedrijven krijgen per jaar in een zogenaamd allocatieplan rechten toebedeeld. Deze rechten moeten worden aangevraagd. Wat men tekort komt of over heeft, kan via de emissiehandel ingekocht of verkocht worden.

Voor 2005 tot en met 2007 was de verdeling van rechten opgenomen in het 'Nationaal Allocatieplan'. Vanaf 2008 is er een nieuwe allocatieronde gestart, waaraan ook bedrijven mee moeten doen die eerder door een uitstoot van minder dan 25 kton CO₂ per jaar in een uitzonderingsregeling vielen. De overheid heeft in de allocatie minder CO₂-emissierechten uitgegeven dan er op dit moment aan feitelijke CO₂-emissie optreedt. Er ontstaat dus een schaarste en daarbij zal op de plaatsen waar dat het meest kosteneffectief is, CO₂-emissie worden bespaard. Aan de WKK-installaties van deelnemende bedrijven (die uiterlijk in 2002 gerealiseerd zijn) zijn rechten toebedeeld die maximaal 7% hoger liggen dan de daadwerkelijke uitstoot. Voor volgende periodes zullen de allocatieplannen voor een periode van vijf jaar worden opgesteld.

De Nederlandse Emissieautoriteit (NEa) verleent aan het begin van elk jaar namens de overheid een deel van de emissierechten aan de deelnemers aan de emissiehandel. Deze bedrijven dienen hun daadwerkelijke CO₂-uitstoot volgens vastgestelde protocollen te meten en ieder jaar aan de NEa te rapporteren hoeveel CO₂ zij hebben uitgestoten. Vervolgens moeten zij zoveel CO₂-emissierechten aan de NEa overleggen als ze aan uitstoot hebben gerappor-

teerd. Zo dekken de bedrijven hun emissie af met emissierechten. Omdat emissierechten verhandelbaar zijn, kunnen bedrijven bij een dreigend tekort tijdig rechten kopen. Bedrijven moeten hun CO₂-rechten voor het voorgaande jaar uiterlijk in april in hun bezit hebben. Een tekort aan rechten wordt door de overheid beboet. Deze boete betekent daarmee in feite de bovenkant van de marktprijs voor CO₂-rechten (anno 2008 is dit € 40 per ton).

Bedrijven die meedoen aan het Europese handelssysteem voor CO₂ kunnen ook emissierechten in landen buiten de Europese Unie kopen. Zij kunnen daarvoor gebruik maken van het clean development mechanism (CDM) en joint implementation (JI). CDM en JI zijn instrumenten uit het Kyoto-protocol. Met CDM kunnen bedrijven duurzame energie en schone technologieën in ontwikkelingslanden stimuleren; met JI kunnen zij de uitstoot van broeikasgassen in andere industrielanden verminderen. Meer over CDM en JI staat in het dossier Klimaatverandering. Bedrijven kunnen de hoeveelheid CO₂ die door hun investeringen in andere landen daalt, aftrekken van de hoeveelheid CO₂ die zij zelf uitstoten. CDM en JI zijn alleen interessant als zij goedkoper zijn dan het kopen van emissierechten op de markt. De CO₂-emissiehandel is voor WKK-installaties van belang omdat deze met een nominaal thermisch ingangsvermogen van meer dan 20 MW onder de regeling vallen. Er wordt een uitzondering gemaakt voor installaties die gevaarlijke afvalstoffen of stadsafval verbranden.

De handel in CO₂-emissies heeft onder andere effect op de marktprijs van elektriciteit. Het blijkt dat de marktprijs, en daarmee de opbrengst van netlevering, door de CO₂-kosten gestegen is. Dit is gunstig voor eigen opwekking met WKK. Daarnaast moeten er wellicht rechten voor de WKK-installatie ingekocht worden en deze kosten hebben invloed op de kostprijs van de door de installatie geproduceerde elektriciteit. Emissiehandel zou het energiebesparings- en CO₂-reducerende effect van WKK-installaties moeten belonen. Of dit daadwerkelijk gebeurt, hangt af van het nettoresultaat van de allocatie van rechten, de eventuele koop van extra rechten en de extra opbrengst door de invloed van elektriciteit op de marktprijs.

NO_x-emissiehandel

Zoals er voor de CO₂-emissiehandel een systeem is opgezet, is dat ook het geval voor de NO_x-emissiehandel. Bedrijven zijn verplicht

in dit systeem mee te draaien als zij een totaal thermisch vermogen van minimaal 20 megawatt (brandstof) hebben. De Nederlandse overheid heeft dit systeem om drie redenen opgezet. Ten eerste heeft Nederland, net als andere Europese landen, in internationaal verband afgesproken om de uitstoot van NO_x verder terug te dringen naar een duurzaam niveau. In de tweede plaats kan een handelssysteem voor het bedrijfsleven goedkoper zijn dan de huidige maatregelen en ten derde is het duidelijk dat de afgesproken normen met de bestaande beleidsinstrumenten niet gehaald worden. Er zijn dus nieuwe instrumenten nodig.

In 2001 hebben de lidstaten van de Europese Unie (EU) afspraken gemaakt over de maximale NO_x-uitstoot van elk land in 2010. Deze zijn vastgelegd in de Europese NEC-richtlijn (NEC staat voor National Emission Ceilings oftewel nationaal emissieplafond). In deze richtlijn mag Nederland in 2010 niet meer dan 260 kiloton NO_x uitstoten. De nationale emissiedoelstelling in het Nationale milieubeleidsplan is echter bijna 30 kton strenger dan de internationale afspraken van 260 kton. Zo wil de overheid garanderen dat Nederland, ook bij tegenvallers, aan haar internationale afspraken voldoet.

In het 'Besluit emissie-eisen stookinstallaties' (BEES) en het 'Besluit verbranden afvalstoffen' (BVA) staan de eisen voor specifieke stookinstallaties vermeld. Deze eisen zijn afhankelijk van het soort installatie, de grootte en de leeftijd ervan en het type brandstof dat zij gebruikt. Toch zal Nederland met deze maatregelen het emissieplafond van 231 kiloton uit het NMP4 niet halen.

Door de handel in NO_x-emissierechten kan de industrie, in de ogen van de overheid, haar bijdrage aan de emissietaakstellingen kosteneffectief leveren. Emissiehandel heeft als voordeel dat er NO_x-reducties worden gerealiseerd in die bedrijven waar dat naar verhouding het goedkoopst is.

Het handelssysteem voor NO_x-emissie is relatief eenvoudig: bedrijven in de zware industrie (de wet spreekt van inrichtingen) krijgen een prestatienorm opgelegd. Deze norm is voor alle bedrijven gelijk en wordt voor stookinstallaties uitgedrukt in grammen NO_x-emissie per gigajoule (GJ) gebruikte energie. Bedrijven die onder de prestatienorm blijven, kunnen hun overschot aan rechten verkopen aan bedrijven die boven deze norm komen. De prestatienorm

Klasse	NO _x -verbrandings-installatie	NO _x -proces-installatie	Bepaling NO _x -vracht	Controle en bijstelling bepaling NO _x -vracht	Registratiefrequentie vracht-berekeningen
	Thermisch vermogen (MWth)	Vracht (ton/jaar)			
1	NO _x -verbrandings-installatie ≥ 100, afvalverbrandings-installaties en meeverbrandingsinstallaties zoals bedoeld in het Besluit verbranden afvalstoffen	≥ 150	Continue metingen van de NO _x -concentratie en continue meting of berekening van het afgasdebiet.	Parallele meting eenmaal per jaar, verificatietest en eenmaal per drie jaar kalibratie; onzekerheid < 20% van de jaargemiddelde concentratie en streefongnauwkeurigheid < 15% voor het afgasdebiet	Minimaal uurwaarden Halfuurwaarden indien het 'Besluit verbranden afvalstoffen' van toepassing is
2	≥ 50 en < 100	≥ 75 en < 150	Op basis van vastgestelde kentallen	Periodiek meten (eenmaal per halfjaar)	Minimaal maandwaarden In geval van het gebruik van diverse kentallen: ieder uur
3	≥ 20 en < 50	≥ 30 en < 75	Op basis van vastgestelde kentallen	Periodiek meten (eenmaal per twee jaar)	Minimaal maandwaarden In geval van het gebruik van diverse kentallen: ieder uur
4	≥ 1 en < 20	≥ 1 en < 30	Op basis van vastgestelde kentallen	Periodiek meten (eenmaal per vier jaar)	Minimaal maandwaarden In geval van het gebruik van diverse kentallen: ieder uur

Tabel 4 Monitoringeisen voor NO_x-emissiehandel

of Performance Standard Rate (PSR) geeft aan hoeveel NO_x-rechten bedrijven met hun bedrijfsvoering opbouwen.

Tot 2010 gelden de volgende prestatienormen: 52 g/GJ in 2008, 46 g/GJ in 2009 en 40 g/GJ in 2010. Onder het systeem van NO_x-emissiehandel vallen de volgende categorieën:

- Bedrijven met verbrandingsinstallaties die een totaal thermisch vermogen hebben van minimaal 20 megawatt (MWth). Het thermisch vermogen geeft aan hoeveel brandstof een installatie maximaal kan verstoken. Het gaat hierbij om raffinaderijen, elektriciteitscentrales en bijvoorbeeld (petro)chemische bedrijven.
- Bedrijven met procesinstallaties, zoals bij de productie van staal, salpeterzuur en fosfaat.
- Bedrijven met een combinatie van verbrandings- en procesinstallaties.

In tabel 4 (hierboven) is een overzicht gegeven van de verschillende klassen waarin de installaties kunnen vallen en aan welke monitoringseisen zij moeten voldoen.

3.3.3 Financiering

Het financieren van WKK-installaties komt in grote lijnen overeen met algemene projectfinanciering. Daarom wordt in deze subparagraaf alleen op enkele bijzonderheden met betrekking tot WKK ingegaan.

Financiering door banken

Het begrip WKK is een bekend begrip bij banken en een voorstel voor financiering kan daarom op redelijk reguliere wijze worden beoordeeld. Standaardseisen zijn een succesvol doorlopen vergunningstraject, een onderbouwing van de investering met harde offertes en langjarige zekerheid voor de afname van energie, bijvoorbeeld met leveringscontracten en eventueel beschikbare subsidies. Daarnaast is voor ieder project het projectrendement in combinatie met het risicoprofiel doorslaggevend voor goedkeuring van de financiering. Bij grote projecten zullen banken een 'due diligence' uitvoeren, een onderzoek naar degelijkheid en betrouwbaarheid. Daarbij spelen de betrouwbaarheid van de techniek, inclusief statistieken van de beschikbaarheid van gasturbines en dergelijke, een rol.

In de jaren negentig zijn er vanuit banken veel industriële projecten in joint venture-verband gefinancierd met 80% vreemd vermogen. Dat kon toen nog vrij gemakkelijk. Bankens zullen bij industriële projecten nu kritischer zijn, gezien de relatief lage rentabiliteit (zie ook paragraaf 3.2 Economische analyse) en de ervaringen uit het verleden. Projecten in de glastuinbouw daarentegen, konden de afgelopen jaren wel gemakkelijk met vreemd vermogen worden gefinancierd, vanwege de positieve rentabiliteit voor moderne, grote gasmotoren. Belangrijke factoren hierbij zijn een gunstige elektriciteitsmarkt met een positieve sparksread voor drie tot vijf jaar, in combinatie met een gegarandeerde afname van warmte (en CO₂) en daardoor een kortere terugverdientijd van de gasmotor.

Joint ventures

In de jaren negentig werden industriële projecten vaak ondergebracht in een aparte bv. Het ging hierbij dan om een joint venture tussen het industriële bedrijf als afnemer van stoom en het elektriciteitsbedrijf als afnemer van overtollige elektriciteit. Deze constructie was zeer interessant omdat beide partners 10% kapitaal inbrachten en de overige 80% door banken werd gefinancierd. De boekhoudkundige regels stonden destijds een 'off-balance' financiering toe, waardoor het project voor beide partners niet of nauwelijks op de balans drukte en de leencapaciteit niet of slechts beperkt werd aangetast. Voor industriële bedrijven, die hun kapitaal bij voorkeur in de 'core business' investeren, was dit een aantrekkelijke situatie. Bovendien kon er door de hefboomwerking een zeer aantrekkelijk rendement op het geïnvesteerde eigen vermogen behaald worden.

Voorbeeld: een project met een rendement van 12% dat voor 80% is gefinancierd met vreemd vermogen tegen een rente van 6%, levert een rendement op het eigen vermogen op van: $(12\% - 0,8 * 6\%) / 0,2 = 36\%$.

Bij een tegenvallend resultaat kan de hefboom ook de andere kant uit werken.

Sinds het Enron-schandaal zijn de boekhoudkundige regels aangescherpt. Nu moet een bv waarin een WKK-installatie op de balans is opgenomen, vermeld worden als de installatie aan de volgende voorwaarden voldoet:

- De WKK-installatie is fysiek met het bedrijf verbonden.
- Het bedrijf is de enige afnemer en heeft zich langjarig tot afname verplicht.

Daarmee is het voordeel van off-balance financiering van de baan. Desondanks is een aparte bv een veel toegepaste constructie voor een warmtekrachtcentrale waarin verscheidene partijen participeren.

Leasing

Leasing is een veel toegepaste manier voor het financieren van WKK-installaties. Bedrijven die apparatuur verleen kunnen daarmee namelijk een belastingvoordeel realiseren. Dit voordeel is wel sterk afhankelijk van de nationale belastingregels en de boekhoudkundige regelgeving. Voorwaarde is dat de te verleen installatie uit algemeen gehanteerde technologieën bestaat met voorspelbare prestaties, kosten en levensduur. Over het algemeen voldoen WKK-installaties aan deze eisen.

Ten opzichte van financiering door een bank heeft leasen een aantal voordelen. De belangrijkste zijn:

- 100% financiering: met leasing wordt vaak 100% gefinancierd, terwijl een bank meestal minder ver gaat.
- Vaste cash-flows: de bedragen liggen langjarig vast.
- Lagere kosten: de belastingvoordelen die met leasing worden bereikt, leiden in de juiste omstandigheden tot lagere kosten voor financiering dan een banklening.
- Off-balance financiering: in het geval van een operationele lease wordt de investering niet op de balans opgenomen en wordt de leencapaciteit van het bedrijf niet aangetast.
- Heldere en eenvoudige structuur: leasen geeft minimale administratieve kosten, wat de boekhouding kan vereenvoudigen.

Bij leasen kan een onderscheid gemaakt worden tussen 'financial lease' en 'operational lease'. Het verschil tussen beide vormen hangt af van de vraag wie het economische risico van de installatie draagt. Draagt de gebruiker dit risico dan is er sprake van een financial lease. Is dat de investeerder c.q. eigenaar, dan is er sprake van operational lease. In het geval van grootschalige WKK-installaties, die grotendeels gedurende de technische levensduur worden geleased, wordt de financial leaseconstructie toegepast. De gebruiker is dan verantwoordelijk voor onderhoud, belastingen

en verzekeringen. Soms is er sprake van een ‘lease and sale back’-constructie. In dat geval vervalt het eigendom van de installatie aan het einde van de looptijd van het contract aan de gebruiker.

In de glastuinbouw wordt hoofdzakelijk operational lease toegepast. De WKK-installatie staat dan niet op de balans van de tuinder en er is sprake van een situatie die sterk lijkt op verhuur. Leveranciers kunnen vaak behulpzaam zijn bij het aandragen van een leasemaatschappij.

Cross-border leaseconstructies, die in de jaren negentig onder andere in de energiesector van toepassing waren, zijn inmiddels fiscaal onmogelijk gemaakt.

3.3.4 Het besluitvormingsproces

De feitelijke investeringsbeslissing is het bestellen van de WKK-installatie. Hoewel de beslissing soms al (informeel) in een eerder stadium is genomen, worden er pas echt grote financiële verplichtingen aangegaan bij het daadwerkelijk bestellen van de WKK-installatie. Afbestellen is eigenlijk ‘not done’ en leidt tot zeer hoge kosten, afhankelijk van het stadium waarin het ontwerp en de uitvoering zich bevinden. Alleen in uitzonderlijke situaties, waarin tijdswinst cruciaal is, worden er afspraken met de leverancier gemaakt over het tot op bepaalde tijdstippen kunnen afbestellen. De bestelkosten van materialen zijn bijvoorbeeld tot ca. twee maanden na bestelling nog relatief beperkt, maar nemen daarna snel toe.

Bij het nemen van de investeringsbeslissing is het van belang om allereerst zoveel mogelijk zekerheden te bieden. Voor een WKK-installatie betekent dit vooral dat er positief over vergunningen beschikt is, offertes bestelgereed zijn (de prijs ligt vast), subsidies positief zeker gesteld zijn of dat er positief over is besloten, dat de financiering rond is en dat de contracten voor afname en levering van energie gereed zijn. Deze zaken zijn voor financiers meestal harde voorwaarden. Daarnaast spelen er echter ook andere factoren een rol. Meestal willen beslissers inzicht hebben in gevoeligheden voor bewegingen op de energiemarkt, een visie op toekomstverwachtingen en een risico-inschatting van factoren als contractbreuk e.d. Het al dan niet participeren door andere partijen, bijvoorbeeld door de afnemer van energie of een energiebedrijf, heeft grote invloed op de perceptie van risico’s.

Als alle bovengenoemde aspecten uitgewerkt zijn, kan een investeringsbeslissing in principe snel worden genomen. De praktijk leert dat een beslissing soms snel genomen wordt, maar dat deze ook nog wel eens onverwacht lang op zich kan laten wachten, oplopend tot jaren. Bij dat laatste moet bedacht worden dat er dan allerlei zaken veranderd kunnen zijn, zoals de prijzen van apparatuur (staalprijs, koerswijzigingen), de beschikbare capaciteit op het net, energieprijzen etc. Op zijn minst moet er met indexaties rekening gehouden worden.

3.3.5 Planning en realisatie

Tijdens de realisatie is de rol van de opdrachtgever vooral op bouwtoezicht gericht. Zeker als een project in zijn geheel is uitbesteed, ligt de coördinatie tussen aannemers c.q. contractors geheel bij de hoofdaannemer. Om ervoor te zorgen dat de aannemer en zijn medewerkers zich op het eigen terrein van de opdrachtgever aan de Nederlandse wettelijke eisen en arbo-wetgeving houden, moet de opdrachtgever toezicht houden. Tijdens het bouwproces moeten eisen voor veiligheid en milieu in acht worden genomen.

Daarnaast moet de opdrachtgever tijdens de bouw controleren of de geleverde installaties aan alle eisen in de besteldocumenten met betrekking tot de leveringsomvang, de kwaliteit, isolatiediktes, bouwmethodes, meet- en regelapparatuur, etc. voldoen. Een belangrijk onderdeel van het bouwtoezicht is het managen van de documentenstroom. Aannemers leveren veel tekeningen, schema’s, beschrijvingen en andere documenten aan, die soms goedgekeurd dienen te worden of soms slechts ter informatie worden ingediend. Met de documentenstroom wordt de opdrachtgever niet alleen geïnformeerd over het ontwerp van de installatie, maar ook over de voortgang, de kwaliteit en het doorlopen van noodzakelijke keuringen (Stoomwezen, Gasunie, laskeuringen, etc.). Daarnaast kan de opdrachtgever actief een aantal inspecties in werkplaatsen van de aannemers uitvoeren, om tijdig de kwaliteit te inspecteren.

Een (hoofd-)aannemer moet zelf zijn toeleveranciers inspecteren. Daarnaast zijn ook inspecties van de opdrachtgever van belang om te checken of de aannemer(s) en fabrikanten zelf voldoende inspecteren en laten controleren. Deze inspecties moeten in een vroeg stadium plaatsvinden omdat later niet alle details meer fysiek geïnspecteerd kunnen worden en om een veel ernstiger vertraging bij een reparatie in het veld te voorkomen. Voor de opdracht-

gever zijn vertragingen ongewenst en de gevolgschade zal nooit geheel door de boetes op te late oplevering worden gedekt.

Als alle installaties zijn geleverd, geïnstalleerd en gemonteerd, bereikt de bouw het stadium van mechanisch compleet (‘mechanical complete’). Meestal is hieraan een protocol verbonden. Dit moet voor de opdrachtverlening reeds zijn vastgesteld en na inspectie door de opdrachtgever worden getekend. Het is raadzaam ook hieraan een betalingstermijn te koppelen en niet met een vage

definitie als ‘alle componenten geleverd’ te volstaan. Soms worden delen van het systeem apart ‘mechanical complete’ verklaard.

Nadat de installatie mechanical complete is, wordt zij in bedrijf genomen. Ook deze procedure moet voor opdrachtverlening met de (hoofd-)leverancier overeengekomen zijn om meningsverschillen tijdens de opstartfase te voorkomen, temeer omdat er veel verschillende definities van inbedrijfsname, ook wel commissioning and start-up genoemd, circuleren.

Globaal tijdsschema gasmotor-project														
Maand	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Specificatie en offertes aanvragen	—													
Opstellen offertes leveranciers		—												
Evaluatie van offertes			—											
Bestelling / melding bij bevoegd gezag / subsidies aanvragen			◁▷											
Levertijd / bouwtijd / opstart				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Inbedrijfsname														◁▷

Tabel 5 Globaal tijdsschema van project met een gasmotor-WKK

Globaal tijdsschema industriële WKK																		
Maand	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	t/m	30	31	32	33
Pre-kwalificatie	—	—																
Specificatie en offertes aanvragen			—	—														
Opstellen aanbiedingen contractors					—	—	—											
Evaluatie van offertes								—	—									
Vergunningsaanvragen				—	—	—	—	—	—									
Subsidieaanvragen										—	—	—						
Investeringsbeslissing / bestelling												◁▷						
Levertijd / bouwtijd												—	—	—				
Commissioning / opstart															—	—	—	
Inbedrijfsname																		◁▷

Tabel 6 Globaal tijdsschema van project met een industriële WKK (zonder MER-procedure)

De inbedrijfsname

De inbedrijfsname vindt plaats in verschillende stappen. Alle elektrische apparatuur en instrumentatie worden eerst met laagspanning getest ('cold loop testing') en vervolgens met normale spanning ('hot loop testing'). Daarna komen start-stop, draairichting, trillingsopnemers e.d. aan de orde, gevolgd door het droogtesten van alle systemen ('dry commissioning' of 'dry sequence testing'). Als blijkt dat alles goed functioneert, worden de systemen gevuld met medium (water, smeerolie en koelmiddel). Vaak moeten ook de leidingen gespoeld of schoongebazen worden en eventueel behandeld tegen corrosie (beitsen en passiveren).

Daarna worden de pompen en andere apparatuur met vulling getest op onder andere functioneren en lekdichtheid ('wet commissioning' of 'wet sequence testing'). Als alle subsystemen goed functioneren kan er voor de eerste keer met brandstof in de machines getoetst worden ('first fire'). Ook daarna echter moeten er nog vele situaties worden getest, zoals vollast/nullast, normale start-stop-cyclus, noodstop, etc. Problemen moeten worden opgelost totdat iedere test succesvol doorlopen wordt. Uiteindelijk wordt het moment bereikt van volledig goed functioneren. Hierna vindt er soms een gedeeltelijke overdracht plaats, waarna de operators van de opdrachtgever de installatie, al dan niet onder toezicht van de hoofdaannemer, in gebruik kunnen nemen.

Voorafgaand aan de oplevering moeten, zoals bij de opdrachtverlening bepaald is, de garantietesten succesvol doorlopen zijn. Een onderdeel van de testen is een duurttest van bijvoorbeeld één of twee weken. Als er dan problemen optreden moeten deze worden opgelost, waarna de installatie opnieuw de duurttest moet doorlopen. Als alle testen goed doorlopen zijn kan de installatie opgeleverd worden. Vaak vindt er daarvoor nog een onderhandeling plaats, waarin al het meer- en minderwerk en alle eventuele boetes en resterende punten worden afgewikkeld. De garantietermijn gaat na oplevering en na de formele overdracht in. Pas daarna is de eigenaar volledig verantwoordelijk voor de installatie.

In tabel 5 en 6 (blz. 87) is een globaal tijdschema van een gasmotorproject en een industrieel WKK-project opgenomen.



3.4 Beheer en onderhoud

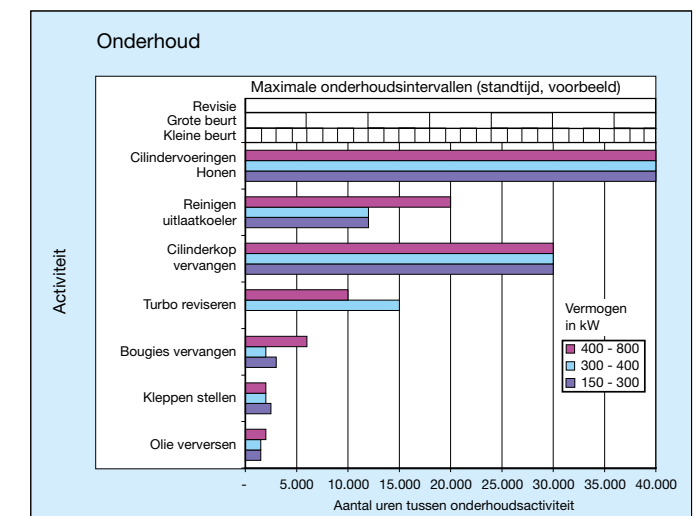
Bedrijven en instellingen die een warmtekrachtcentrale aanschaffen, bereiken daarmee een significante energiebesparing. Daar staat wel tegenover dat er beslag wordt gelegd op de investeringsruimte en de onderhoudsdienst van die organisatie. Het is daarom van belang een afweging te maken van de mogelijke manieren waarop de warmtekrachtcentrale gefinancierd, beheerd en onderhouden moet worden. Deze paragraaf begint met een beschrijving van de onderhoudsbehoefte van een warmtekrachtcentrale en de verschillende vormen van beheer en financiering. Daarna volgen de afwegingen die een rol spelen bij de keuze van het beheermodel en de wijze waarop een contract tot stand kan komen, namelijk door aanbesteding.

3.4.1 De onderhoudsbehoefte

De onderhoudsbehoefte van een warmtekrachtcentrale is sterk afhankelijk van de gekozen opzet. Daarbij is er een groot verschil tussen gasturbines en gasmotoren. Bij een gasturbine is het onderhoud beperkt en vooral gericht op de randapparatuur. Voor de turbine zelf kan met één- à tweejaarlijks onderhoud worden volstaan. De compressorschoepen worden wekelijks met een vloeistof, zoals water met additieven, via 'nozzles' schoongebazen. Daarbij is het geleverde vermogen van de installatie gedurende korte tijd minder groot. De installatie moet periodiek geïnspecteerd worden en de smeeroliefilters vervangen.

Het onderhoud van gasturbines kan alleen door gespecialiseerde bedrijven verricht worden. Standaard ondergaat een gasturbine op aardgas iedere 8.000 draaiuren een inspectie van de verbrandingskamer en liners ('combustion inspection'), iedere 24.000 draaiuren een inspectie van het hetegaspad ('hot gas path inspection') en iedere 48.000 draaiuren een 'major overhaul'. Naast het onderhoud is ook een goede monitoring van de gasturbine van belang. Belangrijke metingen zijn drukmetingen na de compressor (in verband met vervuiling), de in- en uittredetemperatuur van lucht en rookgas bij de turbine (in verband met het rendement) en trillingsbewaking (bescherming van de machine). Als gevolg van gepland onderhoud is de beschikbaarheid van gasturbines

in de range van 1-5 MW 97%. Wordt hierbij de uitval door storingen meegerekend, dan is dit 92%. Een gasmotor vraagt veel meer aandacht. De onderhoudsintervallen van componenten variëren van 1.500 uur (het verversen van de olie) tot 40.000 uur (het honen van cilindervoeringen). Een vereenvoudigde weergave in gegeven in figuur 1.



Figuur 1 Voorbeeld van onderhoudsintervallen van een gasmotor

Onderhoudsintervallen zijn onder andere afhankelijk van het type en het vermogen van een gasmotor, maar ook van de belasting en het temperatuurniveau waarop de motor zijn warmte afgeeft. Desondanks ligt de beschikbaarheid van een grote gasmotor (> 800 kW) door geplande onderhoudsactiviteiten rond de 97%. Inclusief storingen is dit zo'n 91%, een fractie lager dan die van een gasturbine. Het basisonderhoud (eerstelijns- of eerste lijns onderhoud) van gasmotoren kan eventueel door eigen medewerkers worden uitgevoerd; zij moeten hier dan wel een opleiding voor gevolgd hebben. Voor revisies, tweede-, derdelijns- en hoger onderhoud moet een extern bedrijf worden ingehuurd.

Voor zowel gasturbines als voor gasmotoren geldt dat zij in beginsel zonder personeel kunnen draaien. Bewaking op afstand is mogelijk. Om adequaat te kunnen reageren op storingen (zoals lekkage, e.d.) die niet of moeilijk doorgegeven worden door sensoren, is een dagelijkse ronde gebruikelijk.

Het grootste risico bij een slecht onderhouden WKK-installatie is de mechanische schade die kan ontstaan door het vastlopen van zuigers, lagers, etc. Bij een papierfabriek in Tsjechië sloeg jaren geleden een stoomturbine op hol door een slecht onderhouden stoomklep.

De klep moest de stoomtoevoer direct afsluiten als de generator plotseling van het net zou worden geschakeld en daardoor geen belasting meer zou ondervinden. Na zo'n calamiteit is het een hele toer om de turbineschoepen die door het turbinehuis en soms zelfs door het dak van de fabriek slaan, weer terug te vinden.

Gedurende de garantieperiode is de leverancier van de installatie verantwoordelijk voor eventuele ontstane schade. Na het bereiken van een bepaald aantal afgesproken draaiuren is de garantieperiode afgelopen. Als de machine minder draait dan zij volgens de prognose zou doen, wordt een maximale termijn opgenomen.

Een machinebreukverzekering dekt in de regel alleen schade aan de installatie. Het onderhoudscontract, de machinebreukverzekering en de daaruit volgende garanties dekken geen gevolgschade. Een verzekeraar zal de garantie op de machine (machinebreuk) overnemen als aan de volgende eisen voldaan is:

1. Er is een onderzoeksrapport opgesteld dat de status van de installatie ten aanzien van de fabrieksspecificaties aantoont.

2. Er worden periodieke analyses uitgevoerd, zoals een smeerolieonderzoek, of technische analyses conform de voorschriften van de leverancier.
3. Alle bedienings- en onderhoudsvoorschriften van de leverancier/fabrikant worden strikt opgevolgd.
4. Het logboek moet bij inspectie altijd ter inzage aanwezig zijn.
5. De installatie mag uitsluitend draaien op de door de leverancier bij aanvang opgegeven, goedgekeurde brandstofsoort(en).

Bij schade is de klant verantwoordelijk voor het aantonen van de juiste bedrijfsvoering, de inzet van goedgekeurde brandstoffen en vooral het uitvoeren van onderhoud conform de voorschriften. Het is dan ook gebruikelijk de machinebreukverzekering bij het onderhoudsbedrijf onder te brengen, zodat er geen discussie over de schuldvraag kan ontstaan. Onderzoek in opdracht van de Vereniging Gasturbine (VGT, Utrecht, 2006) toonde aan dat meer dan de helft van de schades aan gasturbines terug te leiden is op fouten bij het ontwerp (van nieuwe en gereviseerde systemen). Ook bleek dat meer dan de helft van de schadegevallen door thermische belasting ten gevolge van start-stop operations ontstond. Slechts drie van de achtenveertig onderzochte schadegevallen waren het gevolg van fouten in de bedrijfsvoering.

3.4.2 Beheervormen

Voor het beheer en onderhoud is een aantal varianten van contractvormen mogelijk met een veelheid aan mengvormen. Een indeling die voor onderhoud gehanteerd wordt, is de mate waarin de onderhoudsfirma voor het proces verantwoordelijk is. De Federatie Aandrijven en Automatiseren (FEDA) geeft zes niveaus aan voor Service Level Agreements (SLA) boven de normale verplichtingen zoals het leveren van documentatie en productgarantie (niveau 0). Op het hoogste niveau (SLA-categorie 6) is het onderhoudsbedrijf verantwoordelijk voor het continu verbeteren van de procesprestaties, waaronder de verlaging van de lifetime-kosten van het systeem. Een andere indeling is de mate waarin de onderhoudsfirma het beheer overneemt. In deze indeling kan het contract de vorm hebben van regie, fixed price, een raamcontract of van een prestatiecontract (figuur 2).

Fixed price-contracten kunnen uit contracten bestaan die gebaseerd zijn op eenheidspreizen voor specifieke handelingen, zoals het verversen van olie (inspanningscontract) of een jaarbudget,

zoals het onderhoud van een gasmotor (resultaatcontract). In het geval van een resultaatcontract worden er Service Level Agreements afgesproken, waaronder een periodieke beoordeling van de onderhoudstoestand van de installatie. Voor het meten van de onderhoudsconditie van installaties bestaan gestandaardiseerde methoden.

In een prestatiecontract zijn zogenaamde Key Performance Indicators (KPI's) opgenomen, zoals veilig werken, milieu, betrouwbaarheid, beschikbaarheid, rendement en onderhoudskosten. Een bonus-malusregeling zorgt ervoor dat de onderhoudsfirma naar een continue verbetering streeft. Deze streefwaarden kunnen jaarlijks bijgesteld worden, waarmee de lat steeds hoger komt te liggen. Een dergelijke vorm van partnership leidt tot een verregaande samenwerking met de bijbehorende wederzijdse afhankelijkheid. Op gemeenschappelijk niveau wordt er naar een maximumwinst voor de opdrachtgever gestreefd, waarbij de opdrachtnemer, naast de normale marges, in de gerealiseerde resultaten deelt.

Voor het verzamelen van prestatie-indicatoren moet er vaak geïntegreerd worden in een monitoringsysteem. Het kost enige tijd voordat een dergelijk systeem werkt en daarom is het gebruikelijk dat er een inwerkperiode is waarin de partijen naar een prestatiecontract toegroeien. Omdat zo'n contract van beide partijen een investering vraagt, moet er wel een intentieverklaring zijn waaruit blijkt dat zij een aantal jaren met elkaar in zee willen gaan.

Een stap verder dan prestatiecontracten gaat een constructie waarbij de onderhoudsfirma naast het beheer en onderhoud ook de financiering voor haar rekening neemt. Dit zijn zogenaamde operational lease-contracten. Bij deze contracten wordt gekozen wie de juridische eigenaar van de systemen wordt. Bij een nieuw te bouwen ketelhuis kan het totale proces van Design, Build, Finance & Operate (DBFO) bij een ander bedrijf worden neergelegd (bij 'Operate' is 'Maintenance' inbegrepen). In dat geval wordt er afgerekend op basis van de geleverde producten zoals elektriciteit, stoom, warmte, koude en gassen. Met indexcijfers kunnen externe invloeden zoals de stijging van energieprijzen en arbeidskosten worden gecompenseerd. De opdrachtnemer zal er dan naar streven het systeem economisch te optimaliseren, zodat hij een concurrerend tarief aan kan bieden en desondanks voldoende winst kan genereren. Vooraf moet worden vastgelegd wat er na afloop

van het contract met het ketelhuis gebeurt. In de meeste gevallen wordt een bepaald onderhoudsniveau en een overdrachtssom afgesproken. De opdrachtgever kan er dan voor kiezen om het beheer over te nemen of opnieuw aan te besteden.

Een volledige outsourcing van een ketelhuis kan ook vanuit een bestaande situatie plaatsvinden. Het bestaande ketelhuis moet dan worden getaxeerd. Daarnaast moet er een regeling getroffen worden voor de overname van het personeel van het ketelhuis. Deze processen dienen zeer zorgvuldig te verlopen.

3.4.3 Keuzecriteria voor de beheervorm

In welke gevallen is het interessant om tot outsourcing van onderhoud, beheer en/of financiering van een warmtekrachtcentrale over te gaan? De huidige trend is om alles wat niet met het primaire proces te maken heeft, door anderen te laten doen. Het is dan ook eerder de vraag waarom er niet tot outsourcing overgegaan wordt als iemand een warmtekrachtcentrale heeft of op wil starten.

Uit een onderzoek blijkt dat bedrijven die hun energievoorziening uitbesteed hebben, daar de volgende redenen voor hebben:

- Energievoorziening is geen kernactiviteit van het bedrijf.
- De contractor heeft een grotere deskundigheid.
- Hogere financiële efficiency (kostenbesparing).
- De financiering (geen beslag op liquiditeit).
- Een hogere (verwachte) voorzieningszekerheid.
- Lagere financieringskosten (de contractor accepteert een lagere interne rentevoet dan de uitbestedende partij).

Taak	Contractvorm			
	Regie	Fixed price	Raam	Prestatie
Beheer onderhoudsconcepten				
Keuze werkmethoden				
Werkvoorbereiding en planning				
Matraalbeheer				
Aansturing uitvoering				
Uitvoering				
Onderhoudsregistratie				
Zwaartepuntenanalyse				
Storingsanalyse				
Design of maintenance				
Administratie				

Zelf (blauw), Zelf/uitbest. (groen), Uitbesteden (paars)

Figuur 2 Contractvormen

Andere argumenten die in de literatuur voorkomen zijn:

- Minder personeel op de loonlijst (headcounts).
- Gebruik kunnen maken van de schaalgrootte van de inkoop van de contractor.
- Een lagere belasting van het management (minder aan te sturen personeel).
- Een lagere belasting van de inkoopafdeling (minder facturen).

De volgende argumenten kunnen belemmerend zijn voor uitbesteding:

- De installaties zijn niet vrij benaderbaar en/of niet geconcentreerd gepositioneerd, waardoor het onderhoudspersoneel alle productiegebouwen, waar geheime procedés en/of kritische (zoals hygiënische) processen plaatsvinden, door moet.
- Aan de warmtekrachtcentrale worden dermate hoge eisen ten aanzien van kwaliteit (van bijvoorbeeld stoom), betrouwbaarheid en/of beschikbaarheid gesteld, dat geen enkele out-sourcer hieraan wil of (betaalbaar) kan voldoen.

3.4.4 De aanbesteding van outsourcing

Bij de wijze van aanbesteding van warmtekrachtcentrales is de startsituatie van groot belang: gaat het om een nieuw te bouwen centrale of om overname van een bestaande centrale?

Aanbesteding van outsourcing van een nieuwe centrale

Bij de aanbesteding van outsourcing van een nieuwe centrale kunnen verschillende fasen worden onderscheiden, namelijk de initiatie-, de selectie-, de contract-, de realisatie-, de beheer- en de afloophase (figuur 3).

Initiatiefase

In de initiatiefase zet de uitbesteder de voor- en nadelen van uitbesteding op een rij en maakt hij een voorlopige keuze. Ook worden de randvoorwaarden voor de levering vastgelegd.

De uitbesteder bepaalt welke energiedragers er in welke hoeveelheden met welke kwaliteit, betrouwbaarheid en beschikbaarheid moeten worden geleverd. Het wordt voor de aanbieder een stuk eenvoudiger als hem een belastingpatroon of een belastingduurcurve beschikbaar gesteld worden. Ook moet er een prognose van de te verwachten ontwikkelingen in het gebruik worden afgegeven, met de daarbijhorende bandbreedte.

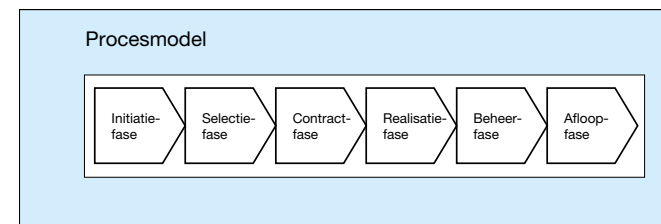
De eisen en randvoorwaarden van de uitbesteder kunnen worden vastgelegd in een prestatiebestek. Dit bestek moet zoveel mogelijk een 'black box'-benadering hebben om de aanbieders maximale ruimte in de oplossingsrichting te geven. Naast technische randvoorwaarden moeten er ook milieu- en arbotechnische zaken opgenomen worden.

Daarnaast zijn de beschikbare ruimte en de fysieke en personele demarcatie cruciaal. De fysieke demarcatie is de scheidslijn tussen de installatie van de contractor en de uitbesteder, bijvoorbeeld een flens (een verbindingstuk op een pijp) inclusief de pakking. De personele demarcatie bestaat uit het ter beschikking stellen van personeel voor bijvoorbeeld inspectierondes. Het is aan te bevelen om van tevoren weegfactoren voor de beoordeling op te geven, ook in aanbestedingen die niet aan de Europese aanbestedingsregels hoeven te voldoen.

Aanbestedingen kunnen gespiegeld worden aan de prijzen die in de markt gebruikelijk zijn, of aan de prijzen die door de opdrachtgever op basis van een schaduwberekening zijn berekend. Mochten de aanbestedingen hierboven zitten, dan moet de aanbesteding worden afgebroken. Soms is het efficiënter om deze criteria vooraf te vermelden zodat aanbieders die hier niet aan kunnen voldoen, zich zonder onnodige kosten terug kunnen trekken.

De selectiefase

De selectiefase is op te splitsen in een voorselectie en eindselectie. Gezien de hoge kosten die er voor zowel de uitbesteder als de contractors met een aanbestedingsproces gemoeid zijn, moet er eerst een voorselectie worden gemaakt om het aantal aanbestedingen te beperken. In de voorselectie oriënteert de uitbesteder zich op geschikte marktpartijen. Aspecten zoals cultuur, betrouwbaarheid, flexibiliteit en klantgerichtheid staan daarbij bovenaan. Het



Figuur 3 Proces van uitbesteding van outsourcing energievoorziening

is aanbevelenswaardig om referenties na te trekken en om op directieniveau gesprekken te voeren.

De cultuur van de aanbieder moet passen bij de strategie van de opdrachtgever. Bij de beoordeling kunnen de volgende vragen aan bod komen:

- Heeft de aanbieder voldoende visie en robuustheid om ook op langere termijn met volle inzet mee samen te blijven werken, ook als het economisch slechter gaat?
- Heeft de aanbieder voldoende te bieden aan haar personeel, zodat het verloop niet te groot is?
- Heeft het personeel voldoende niveau en scholingsmogelijkheden, zodat het een bijdrage aan een continue verbetering kan leveren?
- Welke accountmanagers worden er op het project gezet en hoe wordt er met personeelwisselingen omgegaan?
- In welke mate biedt de aanbieder transparantie in haar streven naar continue verbetering van processen?
- In hoeverre is de aanbieder geïnteresseerd in haar afnemers en wil zij meedenken om gemeenschappelijk tot verbeteringen te komen?

Het gaat niet alleen om het leveren van energie, maar vooral ook om een win-winsituatie. Daarbij kan de opdrachtgever zich concentreren op het primaire proces en met de hoogst mogelijke zekerheid energie tegen sterk concurrerende tarieven inkopen. Het kan zo zijn dat kleine wijzigingen in het productieproces leiden tot reductie van de tarieven, omdat er minder capaciteit hoeft te worden bijgeplaatst. Van de aanbieder mag worden verwacht dat hij zich verdiept in het afnamesysteem, zodat beide partijen hun winst kunnen maximaliseren. Uit de referenties en uit de financiële positie blijkt de betrouwbaarheid van de aanbieder. Ook kan een beoordeling van het interne kwaliteitssysteem, die verder gaat dan de reguliere ISO-certificering, een hulpmiddel zijn om het vertrouwen te vergroten. Periodiek overleg op directieniveau kan zekerheid geven over het feit dat het partnership op alle niveaus gedragen wordt.

De contractor maakt een basisontwerp voor een centrale in de selectiefase en bepaalt een tarief per energiedrager en eventueel een basisbedrag en/of een initieel bedrag. Op basis van de laagste kosten over de looptijd van het project, en na eventuele weging

van andere factoren, kan dan vervolgens uit de aanbieders uit de voorselectie een keuze worden gemaakt.

Contractfase

In de contractfase wordt het juridische document opgesteld waarin de afspraken voor samenwerking vastgelegd worden. Als eerste moet er een gemeenschappelijke visie worden opgenomen die de basis van het contract vormt. Deze visie is leidend bij eventuele interpretatiegeschillen bij de uitvoering van het contract. Daarnaast worden in ieder geval de voorwaarden uit het prestatiebestek opgenomen. Een goed contract moet evenwichtig zijn en voor beide partijen zowel de marktbrede als de projectgebonden risico's afdekken. De aspecten waaraan een contract getoetst kan worden, zijn weergegeven in figuur 4 (blz. 94).

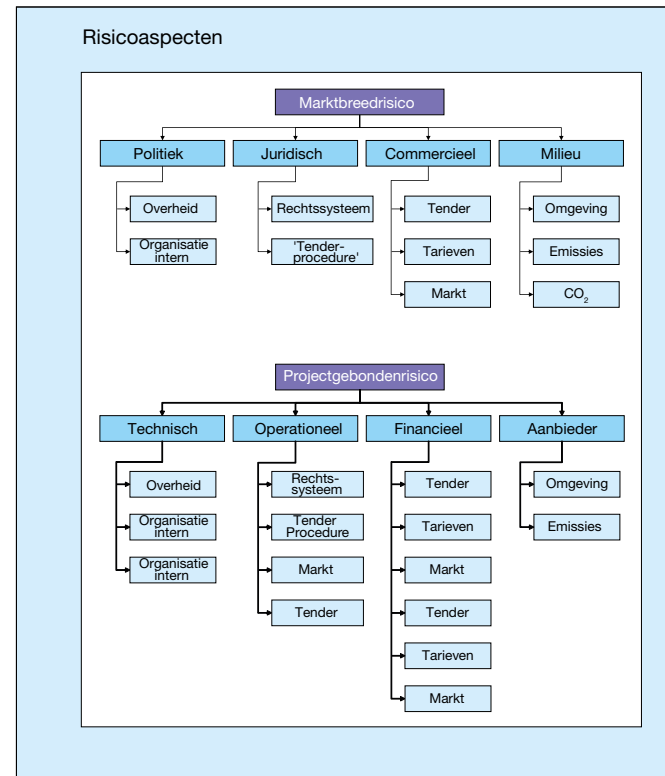
Realisatiefase

Omdat de contractor meestal op het terrein van de uitbesteder aan het bouwen is, moet er ook in de realisatiefase intensief contact plaatsvinden en is het belangrijk steeds de uitgangspunten van het contract te bewaken. Als een opdrachtgever onvoldoende verstand van zaken heeft en/of extra zekerheden in wil bouwen, kan een commissioner worden ingeschakeld. Deze kan als onafhankelijk, technisch accountant het gehele proces, van het aanmaken van een prestatiebestek tot en met de contractafloophase, toetsen. De commissioner beperkt zich dus niet tot de fysieke oplevering van de installatie, maar beoordeelt ook tekeningen en berekeningen.

Beheerfase

In de beheerfase moet er periodiek overleg plaatsvinden op zowel strategisch (directie), als op tactisch (planning) en operationeel niveau (uitvoering). Dit is ook in grafische vorm weergegeven in figuur 5 (blz. 94). Daarnaast moet er een transparant systeem in werking te zijn voor het beoordelen van de Key Performance Indicators, zoals beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Bij storingen dient er direct een analyse- en acceptatieprotocol in werking te treden. Het kan namelijk voorkomen dat de bron van een storing bij de uitbesteder ligt en dit telt dan niet mee in de beoordeling. Jaarlijks moeten de indexcijfers voor ontwikkelingen in bijvoorbeeld de energie- en de arbeidskosten vastgesteld worden.

In vrijwel alle branches is het moeilijk om een betrouwbare prognose van de ontwikkeling in het energiegebruik te maken. Van tevoren



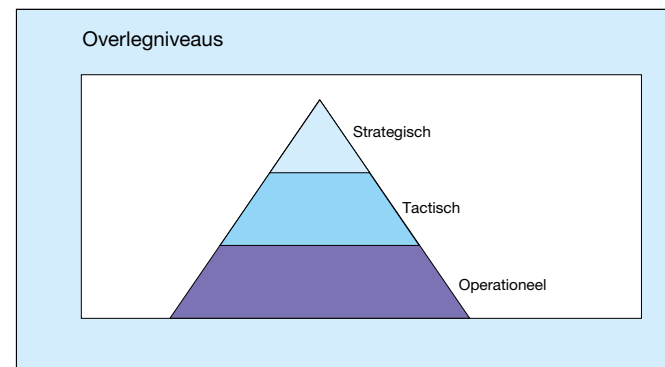
Figuur 4 Risicoaspecten die gedekt moeten worden in een outsourcingcontract

moeten er daarom afspraken worden gemaakt over de procedures die bij uitbreidingen of inkrimpingen moeten worden gevolgd. Wanneer de contractor misbruik maakt van zijn positie, dient er een mogelijkheid te zijn het contract te beëindigen.

Het is wel van belang dat de uitbesteder enige deskundigheid in huis heeft om als gelijkwaardige gesprekspartner van de contractor te kunnen fungeren. In een goed contract helpt de contractor de totale energiekosten van de uitbesteder te verlagen. Dit kan betekenen dat de contractor zich ook in de gebruikerskant verdiept. Door zogenaamd loadmanagement kunnen investeringen in de uitbreiding van de centrale worden uitgesteld.

Daarnaast kan de centrale op een hoger rendement gebracht worden door bij aanpassing van productiesystemen het gebruik van stoom voor verwarming waar dat mogelijk is te vervangen door centrale verwarming. Door een betere regeling op warmte-wisselaars kan de retourtemperatuur gunstig worden beïnvloed, waardoor het rendement toeneemt en er minder pompenergie gebruikt wordt.

Als de capaciteit van een energiecentrale uitgebreid moet worden, kan het voor alle partijen goedkoper zijn om een stuk loadmanagement toe te passen. Als de capaciteit van leidingen en pompen moet worden uitgebreid, kan het in totaliteit goedkoper zijn regelingen en warmte-wisselaars aan te passen, zodat het temperatuurverschil over aanvoer en retour groter wordt.



Figuur 5 Overlegniveaus in de beheerfase

Afloopfase

Ruim voordat het contract in de afloopfase komt, dienen de partijen in overleg te treden over het vervolg. Het zal moeilijk zijn een energiecentrale weer in eigen beheer te nemen, omdat na verloop van jaren de deskundigheid bij de uitbesteder is weggevloeid. Als de communicatie gedurende de looptijd van het contract goed is geweest en het vertrouwen aan beide kanten niet geschonden is, zal het contract worden verlengd. Is dit niet het geval, dan zal er naar een nieuwe contractor moeten worden gezocht. Het is uiteraard de bedoeling dat de installatie ook het laatste contractjaar in goede conditie blijft. Daarom moet er in het contract een meetbare onderhoudstoestand gedefinieerd worden, zodat de installatie zijn waarde blijft behouden.

Outsourcing van een bestaande centrale

Bij een bestaande centrale is outsourcing beduidend complexer. De opdrachtgever heeft de nodige apparatuur en er is een technische dienst, die doorgaans al jaren bij de installaties betrokken is geweest. Beide aspecten vragen om speciale aandacht.

De waarde van een bestaande centrale kan door een onafhankelijke partij op basis van de vervangingswaarde, de leeftijd van de componenten, de revisieplanning en de onderhoudstoestand worden bepaald.

Een goede communicatie met het personeel van het bestaande ketelhuis is belangrijk. Welk perspectief krijgen zij? Kunnen ze elders in het bedrijf aan de slag of worden ze op vrijwillige basis door de contractor overgenomen? Er zijn wettelijke regels waaraan moeten worden voldaan. Bij overname van personeel moet er een regeling worden getroffen om het verschil in salaris te compenseren en voor overtollig personeel moet er een outplacementtraject worden ingezet. Het is belangrijk om het moment tussen de bekendmaking van de outsourcing en

de overdracht zo kort mogelijk te houden, dit om de vlucht van hooggekwalificeerd personeel te voorkomen en dus de bedrijfszekerheid van de centrale veilig te stellen. Onderhandelingen met de ondernemingsraad kunnen echter tijdrovend zijn. Als overgangssituatie kan besloten worden om het personeel op basis van vrijwilligheid tijdelijk bij de contractor te detacheren, zodat medewerkers de gelegenheid hebben kennis te maken met de nieuwe organisatie.

Tot slot is er bij overname van een centrale enige tijd nodig om de meetsystemen voor de Key Performance Indicatoren op te zetten en te valideren. Het kan daarom nodig zijn de contractfase als een tweetrapsraket op te bouwen, waarbij er eerst een jaar wordt gewerkt aan de overgang en pas daarna op, basis van een outsourcingcontract, met een bonus-malusregeling.

Samenvattend

Outsourcing biedt goede kansen, maar het traject van selectie, contractvorming, beheerfase en afloopfase vraagt de nodige zorgvuldigheid.

De Omval te Amsterdam, typisch voorbeeld van outsourcing Bron: Hanneke Wijte



3.5 Micro-WKK

Als WKK op woningniveau wordt toegepast, spreken we van micro-WKK. Een micro-WKK-installatie voorziet een woning van ruimteverwarming en soms ook van warm tapwater. Daarbij reduceert de installatie door eigen productie de elektriciteitsvraag uit het net. Voor Nederland en omliggende landen wordt er op dit moment gekeken naar de ontwikkeling van micro-WKK-systemen met een elektrisch vermogen van circa 1 kWe. Dit vermogen sluit goed aan bij het gemiddelde elektriciteitsverbruik van een huishouden. Voor de relatief grote woonfuncties kunnen grotere micro-WKK-installaties gebruikt worden. Micro-WKK is afgebakend als een WKK-installatie met een vermogen dat kleiner is dan 5 kWe.

Micro-WKK levert energiebesparing en CO₂-emissiereductie op ten opzichte van de meest efficiënte HR-ketel en de centrale opwekking van elektriciteit. In vergelijking met de huidige gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte genereert micro-WKK per jaar een primaire energiebesparing van 300 tot 400 m³ aardgas en een reductie van de CO₂-emissie van circa 700 tot 800 kg CO₂ per huishouden. Micro-WKK wordt daarom als een van de alternatieven voor de HR-ketel voor de toekomst gezien. De micro-WKK-installatie moet één-op-één uitwisselbaar zijn met de bestaande verwarmingsketel. Het toestel wordt op de plaats van de bestaande CV-ketel geïnstalleerd en werkt net als de CV-ketel op aardgas. Op het moment dat er een warmtevraag optreedt, wordt er naast warmte tegelijkertijd ook elektriciteit geproduceerd. Eventuele productieoverschotten aan elektriciteit worden aan het net geleverd. Het is de ontwikkeldoelstelling om het ruimtegebruik, de geluidsproductie, de onderhoudsbehoefte en de installatiewerkzaamheden vergelijkbaar te maken met die van een HR-ketel. Door een flinke besparing op de elektriciteitsrekening kan de consument de meerprijs ten opzichte van de HR-ketel terugverdienen.

3.5.1 Stand van zaken anno 2008

Het idee om een WKK-installatie op het schaalniveau van een huishouden te ontwerpen bestaat al geruime tijd. Op verschillende continenten wordt er aan de conceptontwikkeling van



Figuur 1 De micro-WKK zorgt voor warmte en elektriciteit. Bron: Asue

micro-WKK-installaties gewerkt. Wereldwijd zijn hier naar schatting ruim honderd bedrijven mee bezig. Een aantal jaren geleden raakte de zoektocht naar een geschikt WKK-systeem op woningniveau in een stroomversnelling. Op dit moment hebben er in Nederland reeds verschillende veldtesten met uiteenlopende micro-WKK-concepten plaatsgevonden, zowel op basis van Stirling-technologieën als op basis van brandstofcellen. Gezien het grote aantal partijen wereldwijd dat zich richt op de ontwikkeling van micro-WKK, zullen er naar verwachting de komende jaren nog meer veldtesten volgen. Naast Nederland en enkele andere Europese landen is Japan op dit moment zeer actief in de ontwikkeling van micro-WKK; daar draaien inmiddels al 70.000 micro-WKK-eenheden op basis van een gasmotor (circa 1 kWe). Deze installaties worden in Japan buiten de woning opgesteld, waardoor de techniek nog niet geschikt is voor toepassing in Nederlandse huishoudens.

In Nederland is sinds 2008 de uitrol van de eerste 10.000 micro-WKK-eenheden gestart. Deze installaties worden door verschillende leveranciers geleverd. Hierdoor krijgen verscheidene technologieën de kans om zich op de Nederlandse markt te bewijzen. Ondertussen staat de ontwikkeling van nieuwe typen micro-WKK, waaronder de brandstofcel, niet stil. Ook de technologieën die heden ten dage op de markt worden gebracht, hebben nog een groot potentieel voor verdere ontwikkeling.

3.5.2 Technologie

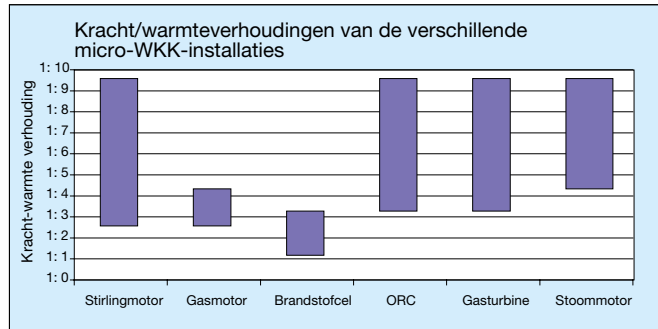
Micro-WKK is een containerbegrip voor zeer uiteenlopende technologieën. Deze technieken verschillen onderling niet alleen in thermische en elektrische rendementen van elkaar, maar bijvoorbeeld ook op het gebied van emissies, brandstofflexibiliteit, geluidsproductie en ruimtegebruik. In deze subparagraaf wordt allereerst het verschil op het gebied van rendementen en de ontwikkelfase toegelicht. Daarna worden de verschillende technologieën uitgebreid apart besproken.

Rendementen

Het totaalrendement (het opwekrendement van warmte plus elektriciteit) van micro-WKK-installaties wordt verondersteld hetzelfde niveau te bereiken als dat van een moderne HR-ketel. Voor het eerste type Stirlingmotoren dat nu op de markt gebracht wordt, zal het totaalrendement al op 107% liggen. Voor bijvoorbeeld



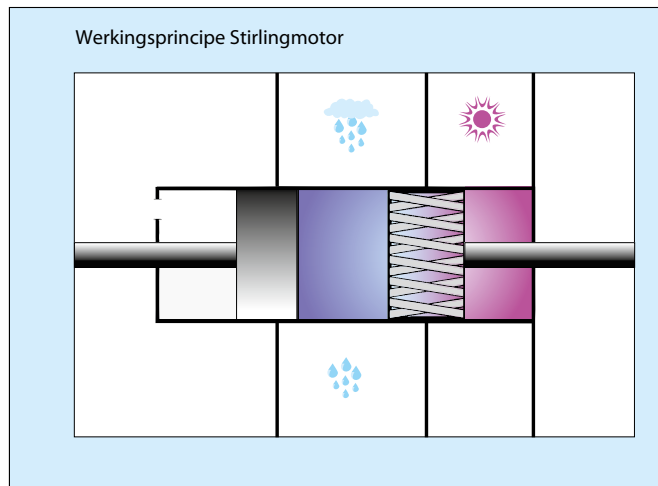
MicroGen micro-WKK Bron: MicroGen



Figuur 2 Kracht/warmteverhoudingen van de verschillende micro-WKK-technologieën

	Concept-ontwerp	Systeem-ontwerp	Demonstratiefase	Start markt-introductie	Groot-schalige toepassing
Stirlingmotor					
Gasmotor					
Brandstofcel					
ORC					
Gasturbine					
Stoommotor					

Tabel 1 Ontwikkelingsfase van micro-WKK-technologieën in Nederland



Figuur 3 Micro-WKK met Stirlingmotor

brandstofcellen moet er vanuit de huidige prototypes nog een verbeterslag worden gemaakt om ook het totaalrendement hiervan op het niveau van een HR-ketel te brengen. Het onderscheid tussen de verschillende technieken ligt in de verhouding tussen de geproduceerde warmte en elektriciteit (kracht). Deze verhouding bepaalt de inzet van micro-WKK in de warmtebehoefte van de woning en de omvang van de jaarlijkse productie van elektriciteit. In figuur 2 is het bereik van de kracht/warmteverhoudingen van de verschillende micro-WKK-technologieën weergegeven. Hierbij is ook het ontwikkelpotentieel voor de verschillende typen micro-WKK-installaties meegenomen.

Ontwikkelingsfase

De diverse micro-WKK-technologieën bevinden zich in verschillende fasen van ontwikkeling. De ontwikkeling van elke technologie is in tabel 1 in vijf stadia weergegeven, van conceptontwerp tot grootschalige toepassing. De meeste technologieën bevinden zich in de fase van systeemontwerp en demonstratie. Van alle technologieën staat de Stirlingmotor het dichtst bij marktintroductie. Hoewel de gasmotor in Japan zich reeds in de fase van grootschalige toepassing bevindt, is het huidige model vooralsnog niet geschikt voor de Nederlandse markt.

Stirlingmotor

De eerste Stirlingmotor werd al in het begin van de 19de eeuw ontwikkeld. Sindsdien is hij in kleine nichemarkten, zoals een motor voor de scheep- en ruimtevaart, gebruikt. Met name binnen de ruimtevaart is het concept van de vrije-zuiger Stirlingmotor verder ontwikkeld en geoptimaliseerd. Het resultaat is een efficiënte, compacte en robuuste motor, die in micro-WKK-toestellen voor woningen toegepast kan worden. De eerste generatie micro-WKK-installaties die op de markt komt zal dan ook van een Stirlingmotor voorzien zijn (figuur 3).

Op dit moment vinden er verschillende testen plaats, zowel duurproeven waarbij de robuustheid van het apparaat wordt getest, als proeven in woningen waarbij naar optimale sturing op comfort wordt gekeken. Zoals vermeld is micro-WKK op basis van een Stirlingmotor op dit moment van alle technologieën het dichtst bij marktintroductie. Verscheidene leveranciers van HR-ketels hebben momenteel een installatie op basis van een Stirlingmotor in ontwikkeling.

Werkingprincipe

De Stirlingmotor is een externe verbrandingsmotor waarbij vanaf de buitenkant een cilinder wordt verhit waarin het gas expandeert. Deze expansie is de drijvende kracht voor het bewegen van de zuiger in de cilinder. Door het verwarmde gas in de cilinder naar een gekoeld gedeelte te verplaatsen, neemt het volume weer af. Als gevolg van het verplaatsen van lucht tussen de warme en koude zijde en als gevolg van de resulterende volumeverandering, ontstaat een cyclus die de zuiger in beweging houdt. De lage-temperatuurwarmte die vrijkomt, wordt voor verwarming gebruikt. De mechanische energie van de beweging van de zuiger wordt met behulp van een generator omgezet in elektriciteit. Dankzij het condenseren van de verbrandingsgassen en het gebruik van zowel de warmte als de elektriciteit, ontstaat er een hoog totaalrendement van de motor.

Er zijn verschillende typen Stirlingmotoren in ontwikkeling. De hoofdtypen zijn te onderscheiden in kinematische en vrije-zuiger Stirlingmotoren. De kinematische Stirling zet de kinetische energie van de zuigers om in een draaiende beweging, waarmee vervolgens elektriciteit wordt geproduceerd. In een vrije-zuiger Stirling levert de zuiger via een elektromagnetisch veld energie aan een lineaire generator. Daarnaast kunnen er in het proces verschillende gassen als medium worden gebruikt, zoals stikstof, helium, CO₂ en lucht.

Toepassing

Micro-WKK met Stirlingtechnologie sluit goed aan bij de behoeften van de consument. Er wordt warmte en elektriciteit geproduceerd in een goed passende verhouding en bovendien heeft de installatie een lage onderhoudsvraag, produceert zij weinig geluid en zal zij vergelijkbare afmetingen met die van de gebruikelijke HR-ketel hebben. Door de externe verbranding die wordt toegepast bij een Stirlingmotor, in plaats van verbranding in de cilinder van een zuigermotor, kunnen er verschillende energiebronnen gebruikt worden. Voorlopig zal aardgas als brandstof dienen, maar de toepassing van biogas, groen gas of waterstof is ook mogelijk.

De Stirlingmotor zal zich de komende jaren nog sterk ontwikkelen, waardoor het aandeel van elektriciteit ten opzichte van de warmteproductie toeneemt. Deze ontwikkeling past optimaal bij de ontwikkeling van het energiegebruik van Nederlandse huis-

houdens, waarin de warmtevraag per huishouden af- en de elektriciteitsvraag juist toeneemt.

Gasmotor

De gasmotor-WKK is een beproefde technologie in Nederland. Er staan reeds duizenden motoren met een vermogen van 300 kWe en groter opgesteld, met name in de glastuinbouw, maar ook in de gebouwde omgeving. Door seriematige productie zijn de kosten voor gasmotoren fors gedaald.

Werkingprincipe

Het werkingprincipe van de gasmotor is vergelijkbaar met dat van een automotor. Een gasmotor is een zuigermotor waarbij in het eerste deel van de cyclus een mengsel van aardgas en lucht wordt aangezogen en gecompriëerd. Door een bougie komt het mengsel tot ontbranding waarna er een expansieslag volgt (Otto-principe). Daarbij drijft een zuiger de krukas aan. Een generator zet deze mechanische energie vervolgens om in elektriciteit. Door grootschalige toepassing is de techniek van de gasmotor al ver ontwikkeld en zijn de maximaal haalbare rendementen zeer hoog. Dit is het gevolg van uiteenlopende technische verbeteringen, zoals een verhoging van de gemiddelde werkdruk in de motor. Op kleinschalig niveau zijn de rendementen aanzienlijk lager, maar kan er op de ontwikkeling van de grotere gasmotoren worden meegelift.

Emissies van gasmotoren zijn een belangrijk aandachtspunt, zeker op een kleiner schaalniveau. Om het vereiste emissieniveau te halen is een rookgasreinigingssysteem nodig. Daardoor wordt de vereiste investering groter. Ook de demping van geluid is een aandachtspunt in de verdere ontwikkeling van deze technologie.

Toepassing

In Japan draaien er al meer dan 70.000 micro-WKK-installaties op basis van een gasmotor. Omdat deze installaties buiten staan (zoals in Japan gebruikelijk is), worden er minder strikte eisen gesteld aan geluid, trillingen, onderhoud en ruimtegebruik. Ook moet er nog gekeken worden naar de integratie van de gasmotor in de warmtehuishouding zoals die voor typisch Nederlandse huishoudens geldt. Door een verdere doorontwikkeling op deze punten kan de gasmotor micro-WKK op termijn een volwaardig alternatief voor de Nederlandse markt vormen.

Brandstofcel

In diverse sectoren wordt er hard aan de ontwikkeling van brandstofcellen gewerkt, zodat deze in de toekomst efficiënt kunnen worden toegepast in bijvoorbeeld woningen en auto's. Een brandstofcel is een toestel dat gasvormige brandstof direct kan omzetten in elektrische energie. Door de tussenstap van verbranding over te slaan (een tussenstap die bij conventionele elektriciteitsopwekking wel wordt gemaakt), kan er een zeer hoog elektrisch rendement behaald worden. De warmte/krachtverhouding verschilt hierdoor aanzienlijk van die van bijvoorbeeld Stirlingmotoren. Op grotere schaalgroottes dan micro-WKK zijn er concepten van een brandstofcel in combinatie met een gasturbine in ontwikkeling, die samen een elektrisch rendement behalen van 70%.

Een brandstofcel werkt niet op aardgas maar op waterstof. Om een brandstof als aardgas geschikt te maken voor een brandstofcel, dient er daarom eerst omzetting van aardgas in waterstof plaats te vinden 'reforming'. Dit kan, afhankelijk van het type brandstofcel, in een apart apparaat (de reformer) gebeuren of binnen de brandstofcel zelf 'internal reforming'. Er is een groot aantal verschillende typen brandstofcellen in ontwikkeling, die onderling in toegepaste membranen en daardoor in bedrijfstemperatuur van elkaar verschillen. Hierdoor kan er een grove tweedeling worden gemaakt in hoge- en lage-temperatuur-brandstofcellen. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

Werkingsprincipe

Fysiek bestaat de brandstofcel uit drie lagen: de anode waarlangs waterstof (H_2) stroomt, de kathode waarlangs zuurstof (O_2) stroomt en het elektrolyt dat beide lagen scheidt en de elektriciteit geleidt. In de anode wordt waterstof gesplitst in elektronen en protonen (H^+). De elektronen worden via een extern geleidend circuit naar de kathode geleid, terwijl de overblijvende protonen (H^+) zich door het elektrolyt naar de kathode verplaatsen. In de kathode worden de elektronen aan de protonen en aan zuurstof gebonden en vormen zij gezamenlijk water (H_2O). De elektronen die via het externe circuit worden geleid, vormen de elektrische stroom die de energie levert. Brandstofcellen hebben een lage spanning, maar door een aantal brandstofcellen in serie te schakelen ontstaat er een stack, dat wil zeggen een serie-schakeling van brandstofcellen, waardoor de gewenste elektrische spanning wordt bereikt.

Er zijn twee soorten brandstofcellen die in het bijzonder in de belangstelling staan voor toepassing als micro-WKK, namelijk de Solid Oxide brandstofcel (SO of SOFC) als hogetemperatuur-brandstofcel en de Proton Exchange Membrane (PEM) als lage-temperatuurbrandstofcel. Voor lage temperaturen wordt er daarnaast ook gekeken naar de toepassing van de Phosphoric Acid brandstofcel (PAFC). De SO-brandstofcel kan direct door aardgas worden gevoed en werkt op een hoge temperatuur, namelijk 600 tot 900 °C 'internal reforming'. Deze hoge werkingstemperatuur heeft als gevolg dat er enige opstarttijd nodig is om de brandstofcel op temperatuur te krijgen. De PEM-brandstofcel werkt op lagere temperaturen (< 100 °C) en kan mede daardoor snel in de gewenste output opstarten en schakelen. Deze brandstofcel werkt echter uitsluitend op zeer zuiver waterstof. Omdat woningen op dit moment niet over een technische installatie voor de toevoer van waterstof beschikken, zal aardgas eerst door middel van een reformer in waterstof moeten worden omgezet, wat ten koste gaat van het rendement.



Testopstelling brandstofcellen Bron: NedStack

Toepassing

Brandstofcellen hebben een hoog elektrisch rendement vergeleken met andere technologieën die voor micro-WKK worden gebruikt. Bij een gelijkblijvend elektrisch vermogen ontstaat er hierdoor een lagere warmte/krachtverhouding dan bij toepassing van andere technieken. Daardoor zal er bij eenzelfde warmteproductie meer elektriciteit worden geproduceerd. Om de elektriciteitsproductie van de micro-WKK-installaties niet te veel uit de pas te laten lopen met de elektriciteitsvraag van het huishouden, moet er worden gekeken naar de inpassing van brandstofcellen in de verschillende typen huishoudens. Door de grootte van de brandstofcel aan te passen, zijn er diverse inpassingen mogelijk. Ook kan door een combinatie met warmte- en/of elektriciteitsopslag de energetische inpassing in een huishouden geoptimaliseerd worden.

De ontwikkeling van brandstofcellen is veelbelovend. De kostprijs daalt gestaag en er wordt aan een verdere verlenging van de levensduur gewerkt. Daarnaast wordt er naar de prestaties van brandstofcellen tijdens hun levensduur gekeken. Momenteel vinden er testen plaats met de eerste typen micro-WKK-installaties op basis van een brandstofcel met dezelfde afmetingen als een CV-ketel. Er wordt nog veel (fundamenteel) onderzoek gedaan naar de werking van verschillende membranen. Door goedkopere materialen en materiaalreductie toe te passen en met een efficiënte serieproductie, zal de prijs van brandstofcellen verder dalen.

Organic Rankine Cycle (ORC)

Een stoomturbine werkt volgens de normale Rankine-cyclus, een thermodynamisch principe. Deze stoomcyclus wordt momenteel in de industrie en in elektriciteitscentrales toegepast. De Organic Rankine Cycle is een stoomcyclus waarbij in plaats van water een organische stof als medium dient. Door de toepassing van zo'n organisch medium kan een lagere verwarmingstemperatuur gebruikt worden omdat de verdampingstemperatuur van de gebruikte organische stoffen lager is dan die van water. Hierdoor wordt het mogelijk om, zonder hoge stoomdruk, op kleine schaal elektriciteit op te wekken. Door de werking op lage temperatuur kunnen er bovendien meer materialen worden gebruikt dan bij de stoomcyclus. Een ORC kan gebruik maken van restwarmte (bijvoorbeeld uit de rookgassen van een gasmotor), maar kan ook direct door een brander worden aangedreven.

Werkingsprincipe

De Organic Rankine Cycle is een thermodynamische cyclus, waarbij een medium op druk gebracht en verwarmd wordt en daardoor verdampt en expandeert en vervolgens weer wordt afgekoeld. Met een turbine of expansiemotor kan de expansie benut worden voor de opwekking van elektriciteit. Door de toepassing van een organisch medium hoeft er geen oververhitting meer plaats te vinden en kan er dus met lagere temperaturen worden gewerkt. In een micro-WKK-installatie wordt door middel van een generator, die aan een zogenaamde scroll-compressor gekoppeld is, elektriciteit opgewekt, een veelgebruikte techniek in onder andere airconditioningsystemen. De organische stof stroomt door een gesloten circuit en komt daardoor niet in of buiten het toestel vrij. Bij de toepassing van een ORC in de woning wordt de brander van de CV-ketel als warmtebron ingezet. Hierdoor wordt de hoogwaardige warmte uit de brander eerst benut voor de productie van elektriciteit en vervolgens voor ruimteverwarming en warm tapwater.

Toepassing

De ORC wordt momenteel voor hogere vermogens gedemonstreerd, waarbij restwarmte uit bijvoorbeeld gasmotoren of industriële processen gebruikt wordt voor het opwekken van elektriciteit. De ORC op kleinere schaal is in ontwikkeling en wordt in het laboratorium getest. Door het gebruik van bestaande componenten zal de kostprijs van deze systemen naar verwachting laag zijn. Rankine cycli, organisch of met stoom, worden uitwendig gestookt. Daardoor kunnen ze net als Stirlingmotoren met andere brandstoffen dan aardgas worden gevoed. Voor grotere systemen komt ook restwarmte als 'brandstof' in aanmerking.

Gasturbine

Gasturbines zijn bekend van grote toepassingen zoals in de industrie en in straalvliegtuigen. Deze gasturbines met hun grote vermogens zijn ver ontwikkeld en vormen een efficiënte manier om energie om te zetten. Als een gasturbine in een WKK-installatie wordt ingezet, wordt ook de verbrandingswarmte nuttig aangewend. Omdat deze warmte op hoge temperatuur vrijkomt, worden gasturbines op grote schaal gecombineerd met stoomturbines, de zogenaamde STEG's (Stoom en Gas). In het geval van micro-WKK wordt de warmte voor ruimteverwarming en voor de verwarming van tapwater gebruikt.



Model van micro-WKK met ORC Bron: Daalderop



Micro-gasturbine Bron: MTT

Werkingsprincipe

Micro-gasturbines werken thermodynamisch gezien volgens dezelfde cyclus als de grote gasturbines, namelijk volgens de Brayton-cyclus. Bij deze cyclus wordt de binnenkomende lucht in een roterende compressor op druk gebracht en vervolgens vindt er door toevoeging van warmte en brandstof verhitting van de gecomprimeerde lucht plaats, waardoor het volume van de lucht sterk toeneemt. De hete lucht geeft vervolgens een groot deel van zijn energie af aan de turbine waarin de lucht expandeert. Gasturbines zijn zeer compact en hebben lagere emissies dan bijvoorbeeld gasmotoren. Bovendien bieden ze de mogelijkheid om met verschillende brandstoffen te werken; zo kan er naast aardgas ook waterstof of biogas gebruikt worden. Er zijn ook gasturbines die op olie of op pyrolyseolie draaien.

Toepassing

Het gebruik van gasturbines in micro-WKK-installaties bevindt zich in de conceptfase. Het ontwerpen van een microgasturbine brengt grote uitdagingen met zich mee, omdat er bij schaalverkleining andere processen in de turbine optreden.

Stoommotor

Stoommotoren worden slechts mondjesmaat toegepast en met name in mobiele toepassingen. Ze zijn onder meer bekend van de stoomlocomotief. Recent is er in Nederland een nieuwe stoommotor bij een slibverwerker geïnstalleerd, die een overschot aan stoom nu omzet in elektriciteit.

Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe achter de stoommotor is de Rankine-cyclus, die reeds bij de ORC genoemd is. Water wordt onder druk gebracht en verhit, waardoor het verdampt en expandeert, waarna het vervolgens weer gecondenseerd wordt. In de motor wordt de expansie gebruikt voor het in beweging brengen van een zuiger. Deze beweging wordt omgezet in elektrische energie.

Toepassing

Anno 2008 wordt de stoommotor alleen toegepast bij grotere vermogens, al vindt er nu ook aanpassing voor het gebruik in huishoudens plaats. De toepassing in woningen stelt echter andere eisen aan de technologie dan die bij grote vermogens. Er wordt dan ook intensief gewerkt aan het verhogen van de efficiency

en het verlagen van de kosten, de onderhoudsbehoefte en de geluidsproductie. Momenteel is er een stoommotor op de Nederlandse markt verkrijgbaar die in grote huizen en kleine bedrijven gebruikt kan worden.

3.5.3 De inpassing van micro-WKK

De productie van elektriciteit en warmte

De eerste typen micro-WKK-installaties hebben een warmte/krachtverhouding die goed bij de warmte- en elektriciteitsvraag van een gemiddeld Nederlands huishouden aansluit. Ook past deze installatie in cascadesystemen voor grotere toepassingen voor bijvoorbeeld kantoren, horeca en openbare gebouwen. Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat er een groot ontwikkelpotentieel is voor bestaande en nieuwe technieken. Het elektrisch rendement van micro-WKK-installaties zal de komende jaren aanzienlijk toenemen. Verbeterde Stirlingmotoren en brandstofcellen hebben een beduidend lagere warmte/krachtverhouding, waardoor er bij gelijke warmteproductie meer elektriciteit wordt geproduceerd. Waar de Stirlingtechnologie momenteel een warmte/krachtverhouding heeft van circa 6:1, kunnen nieuwe technieken naar verwachting een verhouding van 3:1 of zelfs lager bereiken.

Door de veranderende verhouding tussen productie van kunnen nieuwe concepten worden uitgewerkt en wordt ook de toepassing in goed geïsoleerde woningen met een lagere warmtevraag interessant. Dergelijke woningen kenmerken zich door een gelijkmatige verdeling van de warmtevraag voor ruimteverwarming. Ondanks die beperkte warmtevraag kan er door het jaar heen een goede elektriciteitsproductie gerealiseerd worden. Micro-WKK-installaties met een lage warmte/krachtverhouding kunnen ook voor de productie van warm tapwater worden ingezet. Daarnaast is het denkbaar dat er in de toekomst meer elektriciteit bij huishoudens wordt geproduceerd dan er binnen de woning nodig is, en dat dit overschot aan het net wordt geleverd. Het is echter de vraag of dat economisch aantrekkelijk zal zijn.

De veranderende verhouding tussen de elektriciteits- en warmteproductie van micro-WKK-installaties sluit goed aan bij de veranderende energievraag van huishoudens. Door na-isolatie van bestaande woningen en door oude huizen door beter geïsoleerde nieuwbouw te vervangen, daalt de gemiddelde warmtevraag voor

ruimteverwarming. Mogelijk beïnvloedt in de toekomst ook de klimaatverandering de warmtevraag in woningen. De elektriciteitsvraag van huishoudens stijgt door het gebruik van meer elektrische apparaten en door een langere gebruiksduur. Als gevolg van een afnemend aantal personen per huishouden blijft de vraag naar warm tapwater naar verwachting de komende jaren stabiel.

Regeling

Bij micro-WKK-installaties worden er twee producten geleverd, te weten warmte en elektriciteit, waarvan het afnamepatroon niet altijd synchroon loopt. Een intelligente regeling is daarom noodzakelijk. Bij de keuze van de regelstrategie moeten de eigenschappen van de technologie, zoals de opstarttijd, het regelbereik en het start- en stopgedrag worden meegenomen om zo het behoud van hoge rendementen te waarborgen. Met een regeling waarbij het aantal starts en stops beperkt blijft, worden doorgaans de beste rendementen gerealiseerd.

Individuele regeling: warmte- of elektriciteitsvraagvolgend

Met name de eerste generaties micro-WKK-installaties zullen een relatief hoge warmte/krachtverhouding hebben, waarbij de geproduceerde elektriciteit als bijproduct beschouwd wordt. De sturing van de productie van het toestel zal dan ook warmte-vraagvolgend zijn. Het toestel start op als er een vraag naar warmte is en produceert dan tegelijkertijd elektriciteit. De elektriciteitsvraag heeft geen invloed op de regeling van de micro-WKK-installatie.

Nieuwe micro-WKK-technologieën die een lagere warmte/krachtverhouding hebben, produceren relatief veel elektriciteit. Daardoor kan ook een elektriciteitsvraagvolgende regeling interessant worden, of een combinatie van beide regelingen. Het warmtecomfort in de woning is leidend en zal dat ook in het ontwerp van nieuwe regelingen voor micro-WKK-installaties blijven. Er mogen immers geen concessies aan het comfort in de woning gedaan worden. De toepassing van warmteopslag kan hier mogelijk uitkomst bieden.

Het is op dit moment nog niet helder op welke manier een elektriciteitsvraagvolgende regeling zou moeten werken. De elektriciteitsproductie door de micro-WKK-installatie valt voornamelijk in de periode dat de vraag naar elektriciteit groot is. Hoe deze productie het best geoptimaliseerd kan worden, zal

onder andere van het type micro-WKK-installatie, de tariefstructuren voor de afname van elektriciteit en gas, het afnamepatroon van warmte (ruimteverwarming en warm tapwater) en elektriciteit afhangen. Een randvoorwaarde bij het implementeren van volledig elektriciteitsvraagvolgende micro-WKK-installaties is de aanwezigheid van een efficiënte en economisch aantrekkelijke warmtebuffering en/of opslag van elektriciteit. Dit zal in de toekomst nader moeten worden onderzocht.

Het gebruik van micro-WKK als noodstroomvoorziening is mogelijk, maar wordt op korte termijn niet verwacht omdat hiervoor extra investeringen in de regelapparatuur en de elektriciteitsopslag noodzakelijk zijn. Ook zal de maximale productie van de micro-WKK-installatie onvoldoende zijn om de totale elektriciteitsvraag op te kunnen vangen. Micro-WKK kan voor een preferente groep worden ingezet, waardoor in ieder geval een deel van de elektriciteitsvraag kan worden afgedekt.

Huishoudens kunnen voorlopig nog niet zelfvoorzienend worden door toepassing van micro-WKK. Allereerst is dat omdat de productie van elektriciteit niet altijd gelijktijdig met het verbruik ervan optreedt. Daarnaast is de piekproductie onvoldoende om de totale elektriciteitsvraag af te kunnen dekken. Opslag van elektriciteit kan hiervoor een oplossing zijn. Hiervoor is echter een relatief grote opslagcapaciteit nodig, die niet zomaar met een aantal accu's kan worden ingevuld. Op woningniveau worden er op dit moment wel oplossingen met hogere opslagcapaciteiten en vermogensdichtheden uitgewerkt, maar deze systemen zijn nu nog erg kostbaar.

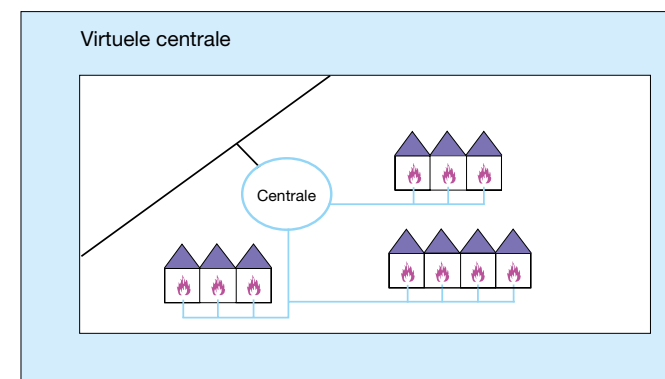
Virtuele centrale

Na een succesvolle marktintroductie kan de groei van micro-WKK enkele honderden MW per jaar aan elektrische capaciteit bedragen. Dergelijke vermogens zullen een significante elektriciteitsproductie hebben die op nationale schaal meetelt. Veel micro-WKK-installaties kunnen flexibel worden ingezet en bijvoorbeeld elektriciteit produceren als dat nodig is, of juist even alleen warmte produceren bij een aanbodoverschot. Als de werking van deze micro-WKK-installaties op elkaar wordt afgestemd ontstaat er een virtuele elektriciteitscentrale (ook wel 'virtual power plant' of vpp genoemd), die feitelijk uit vele kleine opwekkers bestaat. Voor het realiseren van een virtuele centrale

is een verbinding van een grote groep micro-WKK-installaties met een centrale computer nodig. Deze centrale computer kan met behulp van een sturingsprogramma de diverse installaties aansturen. Op dit moment wordt er software ontwikkeld voor een optimale aansturing van micro-WKK-installaties op afstand.

Door de centrale sturing van de opwekcapaciteit van de micro-WKK-installaties in woningen kunnen de productie en levering van elektriciteit geoptimaliseerd worden. Bij een toename van niet-stuurbare decentrale opwekkers, zoals windenergie, is er behoefte aan flexibele bronnen waarvan de energieproductie kan worden aangepast. Een gezamenlijk netwerk van micro-WKK-toestellen vormt een dergelijke flexibele bron, die in of af kan schakelen als daar aanleiding toe is, bijvoorbeeld bij een grote verandering in de elektriciteitsproductie van windparken. Door inpassing van micro-WKK-installaties kunnen netverliezen worden beperkt en opwekkingskosten (investeringen en standby verliezen van reservecapaciteit) worden geminimaliseerd. Ook bij centrale sturing van micro-WKK worden er geen concessies aan het comfort in de woning gedaan. Door het gebruik van micro-WKK in combinatie met warmteopslag binnen de woning ontstaat er een grotere vrijheid om de installatie zonder verlies van comfort te sturen.

Naast de technische uitdaging om communicatiestandaarden en betrouwbare sturingsprogramma's te ontwikkelen, zijn er nog diverse onderwerpen waar aandacht aan moet worden besteed, voordat de virtuele centrale in werking kan worden gesteld:



Figuur 4 Virtuele centrale

- Ten eerste is het van belang te weten welke partij de sturing op zich kan nemen: de netbeheerders, de energiebedrijven of bijvoorbeeld een handelsmaatschappij.
- Ten tweede, wie is de eigenaar van de micro-WKK-installatie?
- Ten derde moet worden bepaald welk aspect geoptimaliseerd wordt, bijvoorbeeld de netstabiliteit, de energiekosten van de consument, de centrale elektriciteitsproductie of het beperken van de CO₂-emissie.
- Ten vierde moet worden vastgesteld hoe de baten van een virtuele centrale over de deelnemers worden verdeeld. Daarvoor moeten de belangen van de verschillende betrokken partijen eerst op één lijn gebracht worden.

Pas wanneer er duidelijkheid en overeenstemming over deze aspecten bestaat, kan de virtuele centrale worden gebruikt.

Voor een goede marktintroductie van micro-WKK is het van belang dat de aanschaf en de installatie ervan soepel verlopen. Er wordt hard gewerkt aan het ontwikkelen van plug and play toestellen, waarbij het systeem bij de consument op dezelfde wijze als bij een CV-ketel wordt geïnstalleerd. Elektriciteitslevering wordt dan mogelijk door enkel de stekker in het stopcontact te steken.

Als het elektrisch vermogen van een micro-WKK-installatie niet groter is dan 1 kWe, zullen er geen problemen met zekeringen en bedrading in de woning ontstaan en hoeft er geen aparte groep gemaakt te worden om het toestel op aan te sluiten. Het systeem is hierdoor eenvoudig te installeren. De micro-WKK-toestellen die nu voor de Nederlandse markt ontwikkeld worden, zijn voornamelijk gedimensioneerd op 1 kWe. Grote huishoudens, kleine kantoren, de horeca e.d. kunnen zwaardere elektriciteitsaansluitingen hebben en kunnen daardoor ook grotere micro-WKK-installaties of zelfs een cascade van installaties aansluiten.

Aansluiting op het elektriciteitsnet

De energiemarkt is op dit moment nog niet volledig ingericht op elektriciteit die door consumenten wordt geleverd. De consument is vooralsnog een afnemer van elektriciteit van het net en geen (tijdelijke) leverancier. Voordat het plug-and-play-model wordt toegepast, is het belangrijk dat de elektriciteitsvoorziening dan ook in zowel technisch als economisch opzicht ingericht is op tweerichtingsverkeer van elektriciteit.

Nadat een micro-WKK-installatie in een woning geïnstalleerd is, moet dit aan de netbeheerder en de energieleverancier worden gemeld. De energieleverancier kan dan de voorschotbedragen voor gas en elektriciteit hieraan aanpassen. Een uitzondering hierop is de projectmatige installatie van micro-WKK-systemen; deze moet ruim voor de installatie aan de netbeheerders worden gemeld.

De netbeheerders zullen door de plaatsing van opwekkers op laagspanningsnetten hun bedrijfsvoering enigszins aan moeten passen om zo tweerichtingsverkeer te faciliteren en het onderhoud aan het elektriciteitsnet veilig uit te kunnen voeren. De netbeheerders zijn ook betrokken bij testen die de invloed van micro-WKK-installaties op laagspanningsnetten simuleren. Uit deze zogenaamde 'weilandproeven' is gebleken dat grotere aantallen installaties zonder problemen op het elektriciteitsnet in een wijk kunnen worden aangesloten.

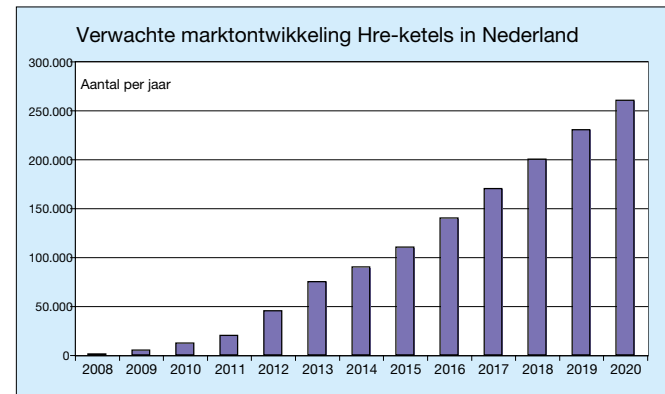
3.5.4 Micro-WKK in de markt

Micro-WKK staat aan de vooravond van marktintroductie. Er is inmiddels een groot aantal partijen betrokken bij de techniekontwikkeling en marktvoorbereiding. Hieronder volgt een overzicht van de stand van zaken.

Marktverwachtingen

De ontwikkelaars van micro-WKK-installaties en ketelfabrikanten, verenigd in de Smart Power Foundation, hebben een visie ontwikkeld op de marktontwikkeling van micro-WKK in Nederland.

Uit deze visie blijkt dat micro-WKK tot 2020 een van de belangrijkste opvolgers van de HR-ketel wordt. Hierbij is ervan uitgegaan dat micro-WKK een succesvolle marktintroductie doorloopt en dat er daarmee een massaproductie en kostprijsreductie op gang komt, waardoor een consument met een gemiddeld verbruik in staat wordt gesteld om de meerprijs van zijn installatie ten opzichte van een HR-ketel binnen vijf jaar terug te verdienen. Naast economisch voordeel biedt micro-WKK een oplossing die zonder ingrepen in de woning, het verwarmingssysteem of de elektrische installatie geïnstalleerd kan worden. In figuur 5 (blz. 106) is de marktontwikkeling weergegeven zoals deze in 2008 door de Smart Power Foundation wordt voorzien. Tot 2020 zullen er circa 1,5 miljoen micro-WKK-installaties geplaatst worden. Hiermee wordt evenveel elektriciteit geproduceerd als met een grote elektriciteitscentrale.



Figuur 5 Verwachte marktontwikkeling HRe-ketels in Nederland

Inmiddels zijn de eerste typen micro-WKK-installaties gereed om de markt op te gaan voor een eerste leerperiode. Tijdens deze leerperiode moeten vraag en aanbod verder op elkaar worden afgestemd. De productie van grotere aantallen micro-WKK-installaties zal op gang moeten komen. Daarnaast moet er van de ervaringen in het veld worden geleerd. De installatie van de eerste 10.000 installaties vormt een leertraject waarvoor de overheid ondersteuning beschikbaar stelt.

Ook wordt er nagedacht over de mogelijkheden om micro-WKK te ondersteunen in de aanloop naar seriematige productie en een goed werkende installatiemarkt. Het zal naar verwachting dus nog een paar jaar duren voordat micro-WKK klaar is om de massamarkt te betreden. Na verloop van tijd zal er concurrentie ontstaan tussen verschillende aanbieders. Hierdoor zullen er partijen van het speelveld verdwijnen omdat hun technologie onder de maat is. Door deze concurrentie ontstaat er ook een drijfveer om te werken aan de verdere technologische ontwikkeling van de diverse typen micro-WKK.

Marktvorbereiding

Er is in Nederland inmiddels een breed draagvlak voor het micro-WKK-concept ontstaan. De meeste partijen die zich bezighouden met de toekomstige verwarming van de gebouwde omgeving en de verkoop en distributie van elektriciteit, zijn hierbij betrokken. In een aantal samenwerkingsverbanden wordt er aan een snelle en probleemloze introductie van micro-WKK op de markt gewerkt:

- Een aantal energiebedrijven heeft zich verenigd in de stichting Slim met Gas. Het doel van deze stichting is het bereiken van een verhoging van het rendement waarmee aardgas wordt omgezet. Zo ijvert zij sinds 1 januari 2007 voor de ontwikkeling van gastoepassingen die een significante reductie geven van het gebruik van aardgas en de emissie van CO₂. Slim met Gas zal de marktintroductie van de eerste 10.000 micro-WKK-installaties begeleiden. Daarnaast zal de stichting zich bezighouden met kennisopbouw en communicatie op het gebied van efficiënte gastoepassingen.
- De Smart Power Foundation (SPF) is een stichting van micro-WKK-ontwikkelaars en ketelfabrikanten, die het aanbod van micro-WKK zal gaan verzorgen. SPF werkt daarom een visie uit om de marktintroductie van micro-WKK zo voorspoedig mogelijk te laten verlopen. Ze houdt zich bezig met overheidssteuning, communicatie op het gebied van micro-WKK en het wegnemen van marktknelpunten.
- Cogen Nederland, de belangenvereniging voor WKK in Nederland, faciliteert sinds 2001 een werkgroep Micro-WKK, waarin ketelfabrikanten, energiebedrijven en overkoepelende organisaties verenigd zijn om de markt voor micro-WKK te ontwikkelen. Naast het samenbrengen van partijen en het ontwikkelen van draagvlak, houdt de werkgroep zich bezig met het oplossen van knelpunten op het snijvlak van consumenten, energiebedrijven en ketelfabrikanten.
- Binnen Energietransitie, een initiatief van overheid en bedrijven, is de werkgroep Decentrale Gastoepassingen als onderdeel van het Platform Nieuw Gas opgericht. Het doel van deze werkgroep is het stimuleren van efficiënte gastoepassingen (waaronder micro-WKK) in de gebouwde omgeving. De werkgroep werkt hiervoor concrete ideeën uit en ontwikkelt een visie op een duurzamere energievoorziening. Ook probeert de werkgroep knelpunten weg te nemen door overleg te voeren met relevante partijen zoals beleidsmakers.

Deze samenwerkingsverbanden verenigen verschillende sectoren en kunnen daardoor slagvaardig werken aan een snelle en goede introductie van micro-WKK op de markt.

Voordeel voor de consument

Micro-WKK zorgt voor een besparing op de energiekosten van een huishouden; de gasconsumptie van huishoudens zal in beperkte

mate toenemen door de elektriciteitsproductie, maar de elektriciteitsinkoop uit het net neemt sterk af. Een gemiddeld Nederlands huishouden kan naar schatting 20% op de energiekosten besparen ten opzichte van het gebruik van een HR-ketel en de inkoop van elektriciteit uit het net. Deze besparing is wel sterk afhankelijk van de vraag naar ruimteverwarming en daarmee van de mogelijkheid om elektriciteit te kunnen produceren. Een huishouden met een ruimteverwarmingsvraag van 1.500 m³ kan met de huidige micro-WKK-installaties op jaarbasis circa 2.500 kWh elektriciteit produceren en bespaart daarmee een bedrag van ca. € 350 op de energierekening. Van de opbrengsten op de energierekening kan de meerinvestering in micro-WKK worden terugverdiend. Zoals uitgelegd in deze subparagraaf over marktverwachtingen zal een Nederlands huishouden na een succesvolle marktintroductie, de meerprijs van een micro-WKK-installatie binnen vijf jaar terug moeten kunnen verdienen. In sommige gevallen zal dit zelfs maar drie tot vier jaar zijn.

Bijdrage aan milieudoelstellingen

Volgens de CBS-energiebalans verbruiken de Nederlandse huishoudens momenteel ongeveer 10 miljard m³ aardgas en 24 TWh elektriciteit. Dat komt neer op een primair energieverbruik van circa 540 PJ per jaar. De totale uitstoot van CO₂ door de gebouwde omgeving wordt op 30 Mton per jaar geschat. Hierbij zijn emissies als gevolg van aardgas- en elektriciteitsverbruik inbegrepen.

Een micro-WKK-installatie levert primaire energiebesparing en CO₂-emissiereductie op ten opzichte van de meest efficiënte HR-ketel en centrale opwekking van elektriciteit. De Stichting Energie Prestatiekeur heeft in samenspraak met partijen in de sector een keurlabel voor micro-WKK-toestellen ontwikkeld: het Gaskeur HRe. Toestellen die van dit keurlabel voorzien zijn, voldoen aan alle gaskeur- en aanvullende criteria met betrekking tot micro-WKK. Het keurmerk garandeert een minimum aan efficiency waardoor er een significante energiebesparing ten opzichte van de HR-ketel optreedt. Toestellen met dit keurlabel mogen als HRe-ketels in de markt worden gezet, waarbij de 'e' voor elektriciteit staat. De eerste toestellen die op de markt komen, zullen dit label dragen.

In vergelijking met de huidige gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte, levert het gebruik van micro-WKK jaarlijks een energiebesparing op van 300 tot 400 m³ aardgasequivalenten en een CO₂-emissiereductie van circa 700 tot 800 kg CO₂ per

huishouden. Als de marktontwikkeling van micro-WKK volgens de eerder geschetste verwachtingen verloopt, kan micro-WKK in 2030 een energiebesparing van 50 tot 55 PJ per jaar bereiken. Dit komt overeen met een jaarlijkse besparing van 1 tot 2 miljard m³ aardgas. De emissie van CO₂ als gevolg van verwarming en elektriciteitsgebruik in woningen wordt dan met 1,5 tot 3,0 Mton per jaar gereduceerd, uitgaande van een moderne aardgasgestookte STEG-installatie als referentie (STEG staat voor Stoom En Gas, omdat er een stoomcyclus met een gasturbine wordt gecombineerd. Deze centrales behalen op dit moment de hoogste elektrische rendementen ten opzichte van andere elektriciteitsopwekkers). Micro-WKK kan dus significant aan de vermindering van het energiegebruik in de gebouwde omgeving bijdragen.

Tot slot

Micro-WKK is een innovatief, energiebesparend concept dat een groot ontwikkelpotentieel heeft. Micro-WKK kan goed gecombineerd worden met andere duurzame opwekkers op laagspanningsnetten, zoals elektrische zonne-energie, zonthermische systemen en kleine windturbines. Ook in de verdere toekomst zal micro-WKK op basis van duurzame brandstoffen, zoals waterstof en groen gas, een rol kunnen spelen in een volledig duurzame, Nederlandse energievoorziening. ■

Hoofdstuk 4

Voorbeeldprojecten

In dit hoofdstuk worden diverse WKK-projecten beschreven die in de afgelopen jaren zijn gerealiseerd. Deze voorbeelden gaan over verschillende technieken en komen uit verschillende sectoren, waaronder de industrie, huishoudens, zwembaden, de glastuinbouw en ziekenhuizen. Ze zijn zo gekozen dat er verschillende ontwerp- en gebruiksaspecten van WKK aan bod komen.

1. Agfa-Gevaert: de industriële WKK-toepassing van gasmotoren in combinatie met afgassenketels voor levering van stoom, elektriciteit en warmte. Door slimme warmtebenutting heeft de centrale een totaalrendement van 102%.
2. Bosbad Putten: een mini-gasturbine levert warmte en elektriciteit aan een zwembad. Dit project is als demonstratie gestart, maar anno 2008 maakt het zwembad nog steeds gebruik van deze zeer betrouwbare installatie.
3. Emmtec services: een STEG met twee gasturbines en een stoomturbine voor de levering van stoom, warmte en elektriciteit aan het industrieterrein Emmtec. De aanschaf van een gereviseerde gasturbine bevorderde de haalbaarheid van dit project.
4. Micro-WKK: een veldtest met een state-of-the-art micro-WKK-installatie op basis van een Stirlingmotor voor gebruik in huishoudens in Groningen. De HRe-ketel levert naast warm water ook 1 kWe elektriciteit.
5. De Omval: vier gasmotoren zorgen voor de opwekking van warmte, koude en noodstroom voor een kantorencomplex, winkels en woningen.
6. UMC Utrecht: gasmotoren voor het opwekken van elektriciteit, koude en warmte. Bij uitval van het landelijke net voorziet het systeem de belangrijkste faciliteiten van noodstroom, zonder uit te vallen.
7. Vathorst: een energiecentrale voor wijkverwarming op basis van gasmotoren met netlevering van elektriciteit. De installatie voorziet circa 2.500 nieuwbouwwoningen van warmte.
8. Gebr. De Groot Kwekerijen: een gasmotor levert warmte en CO₂ aan de tuinbouwkas en tegelijkertijd elektriciteit aan het openbare net met een significante besparing op de energiekosten als resultaat.

4.1 Project Agfa-Gevaert, Mortsel (België)

Agfa produceert in het Belgische Mortsel polyesterfilms voor toepassingen in drukkerijen en medische beeldvorming. Er werken circa 4.000 medewerkers. Bij Agfa worden er vier gasmotoren ingezet om naast warmte ook stoom te produceren, die beide worden gebruikt in het productieproces. Voor de stroomproductie wordt gebruik gemaakt van een bijgestookte afgassenketel.

Bij Agfa in België bedraagt de basiselektriciteitsbehoefte 18 MW, met pieken van 30 MW in de zomer als alle koeling in werking is. Agfa beschikt over verschillende netten voor stoom, warmte en koude. Twee stoomnetten van 7 en 17 bar, een CV-net van 90/70 °C en een restwarmtenet met een zwevende temperatuur die afhankelijk is van het overschot (rond de 30 °C). Het restwarmtenet voedt de verschillende warmtepompen van het bedrijf (bij elkaar 6 MW). Er zijn verschillende koudenetten, waaronder een 7 °C-net, dat mede gevoed wordt door een door stoom aangedreven compressiekoelsysteem. In 2007 heeft Agfa, na zich jarenlang georiënteerd te hebben, een nieuwe energiecentrale op basis van vier gasmotoren van ieder 2 MWe gebouwd. Door een inventieve warmtebenutting heeft de centrale een totaalrendement van 102% op onderwaarde.

De motoren hebben een netto elektrisch rendement van 40%. De volledige motorwarmte wordt benut terwijl de afgassen met een temperatuur van 40 °C de schoorsteen verlaten. De naverbrander bij een van de afgassenketels zorgt nog voor een extra besparing. Volledige benutting van de motorwarmte vindt plaats door zowel de stralingswarmte, als de motorkoeling en de koeling van de turbocompressor nuttig in te zetten:

- De stralings- en convectieverliezen van de gasmotoren worden afgezogen en voor een droogproces elders in de fabriek



De energiecentrale van Agfa



Eén van de gasmotoren bij Agfa Bron Agfa-Gevaert



Stephan Thijs, projectleider van Agfa: 'Met de naverbranding van de rookgassen halen we het onderste uit de kan'

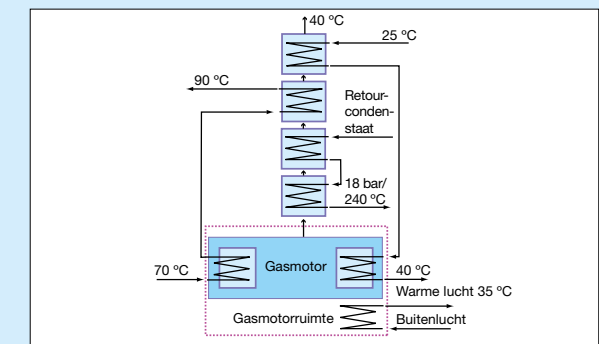
gebruikt. Hiervoor is een apart kanaal over een leidingbrug aangelegd.

- De koeling van de lucht uit de turbocompressoren vindt in twee stappen plaats. De warmte uit de laagste temperatuurtrap wordt ingezet in het restwarmtenet. De warmte van de hoogste temperatuurtrap dient als voorverwarming van het 90/70 °C-net.
- De motorkoeling (olie- en mantelcarter) wordt voor de voorverwarming van het 90/70 °C-net ingezet.

De rookgassen verlaten de motor met een temperatuur van rond de 500 °C en stromen door de verschillende secties van de stoomketel (achtereenvolgens een oververhitter, een verdamer, twee economisers en een rookgascondensator). In de ketel wordt 1,25 ton/h oververhitte stoom (340 °C, 19 bar) geproduceerd. Het warmwatercircuit (90/70 °C) wordt naverwarmd met de economiser en het restwarmtesysteem wordt door de rookgascondensator gevoed.

Een van de vier WKK-units is bovendien uitgerust met een brander in de afgassenketel. De 'lean burn'-motoren bezitten in de afgassen nog voldoende zuurstof voor de verbranding van aardgas. De temperatuur van de rookgassen wordt hiermee opgevoerd van 500 tot 800 °C, waarmee zo'n vier ton extra stoom van

Schematische weergave van de WKK-installatie bij Agfa



Figuur 1 Schematische weergave van de WKK-installatie bij Agfa

19 bar geproduceerd wordt. Ook het vermogen van het hoge- en lagetemperatuur warmwater wordt hiermee vergroot. Gezien de goede ervaringen met dit proces worden de andere drie units medio 2008 ook uitgerust met een brander (figuur 1).

Deze configuratie levert een totale brandstofbesparing op van 37%. Voor de productie van 1.970 kWe is in een gascentrale met

een rendement van 42,6%, inclusief netverliezen, zo'n 4.690 kW aan aardgas nodig. Stoomproductie, warmwater en warme lucht zouden per unit zo'n 3.134 kW aardgas vergen.

De energiecentrale heeft rond de € 6,5 miljoen gekost. Daar komen nog eens systeem aanpassingen bij van rond de € 1 miljoen. De terugverdientijd is minder dan drie jaar. Door subsidies vanuit het Vlaamse groencertificatensysteem is de terugverdientijd echter teruggebracht tot ruim onder de twee jaar, wat voor een bedrijf als Afga alleszins acceptabel is.

Kerneigenschappen:	
Motor:	Caterpillar G3520C
Leverancier motor:	Eneria (Overijssel)
Leverancier stoomketel:	Clayton
Installateur:	Devis (Geel)
Externe consultant:	Indea
Bruto elektrisch vermogen:	
	4 * 2.020 kWe
Netto elektrisch vermogen:	
	4 * 1.970 kWe
Thermisch vermogen stoom 1,25 t/h 19 bar 340 °C:	
	4 * 965 kWth
Thermisch vermogen HT warmwater (90 °C):	
	4 * 1.327 kWth
Thermisch vermogen LT warmwater (40 °C):	
	4 * 555 kWth
Warme lucht (35 °C):	
	4 * 200 kWth
Input aardgas:	
	4.930 kW
Netto elektrisch rendement:	
	40.0%
Netto thermisch rendement:	
	61.8%
Totaal rendement:	
	101.8%

Tabel 1 Eigenschappen energieinstallatie



Afgassenketel Bron: Agfa-Gevaert

4.2 Project Bosbad Putten

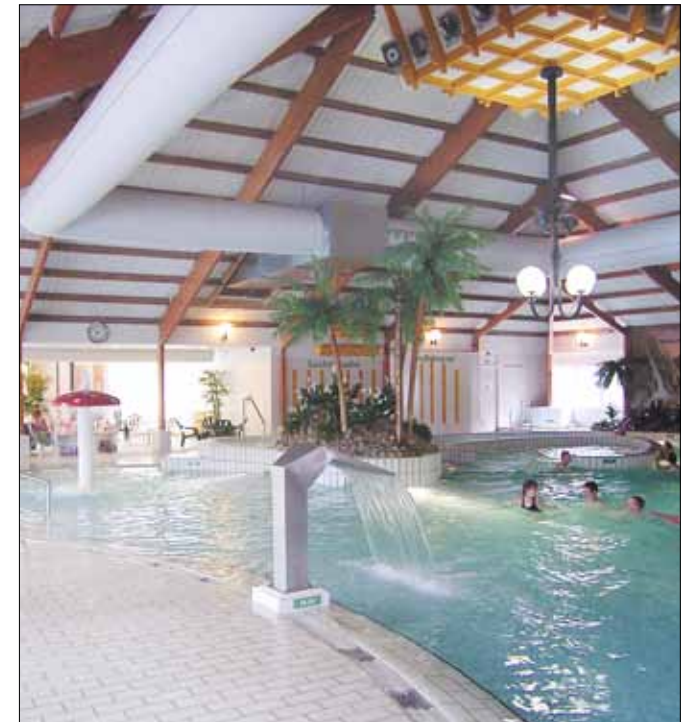
Het Bosbad in Putten heeft verschillende zwembaden waaronder een subtropisch bad en een verwarmd buitenbad. Het zwembad heeft zo'n 30 medewerkers in dienst. Met een gemiddeld aantal bezoekers van rond de 350.000 per jaar behoort het zwembad tot de top 10 zwembaden in Nederland.

In 2001 kreeg het zwembad in Putten een primeur met de installatie van de eerste microgasturbine in Europa. Het demonstratieproject was een gezamenlijk initiatief van GasTerra b.v. (het toenmalige Gasunie Trade & Supply) en Nuon.

De microgasturbine neemt in dit project bijzonder weinig plaats in. In de foto op de pagina 114 is de beheerder bij de kast van de gasturbine te zien. Achter de gasturbine (niet op de foto) staat de regelkast die ook de CV-ketels aanstuurt. Met een elektrisch vermogen van 28 kWe levert de generator een deel van de elektriciteitsvraag voor het zwembad. De restwarmte uit de rookgassen (64 kW) wordt via een rookgaskoeler in het CV-systeem ingezet. Deze rookgaskoeler is hydraulisch parallel geschakeld aan de CV-ketels. De gasturbine draait in principe op vollast en afhankelijk van de warmtevraag worden er extra CV-ketels bijgeschakeld.

De turbine haalt een totaalrendement van 90%. Doordat er een verbinding tussen het ketelhuis en het tropisch binnenbad gemaakt is, kan de turbine het hele jaar draaien.

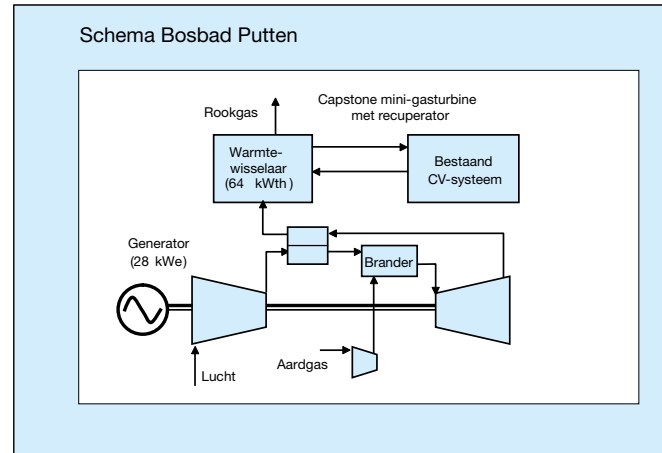
De inpassing van de WKK-installatie kende een aantal implicaties. Voor de realisatie van een gasaansluiting van 1 bar moest er bijvoorbeeld een pijp van 250 meter aangelegd worden en was een aanpassing van het reduceerstation van Nuon noodzakelijk.



Binnenbad van Bosbad Putten Bron: Bosbad Putten

Daarnaast bleek er na de opstart een defect in de meegeleverde rookgaskoeler op te treden. Uiteindelijk werd er een nieuwe rookgaskoeler ontworpen en geïnstalleerd. Ook werd de interne gas-compressor in het begin diverse keren vervangen totdat er een geschikt exemplaar gevonden was. Deze moeizame start staat in contrast met de huidige prestaties van de installatie. Anno 2008 is de betrouwbaarheid erg hoog en is de onderhoudsbehoefte gering. In tegenstelling tot een gasmotor heeft de turbine geen oliesmering en koelvloeistof nodig. De gasturbine is op dit moment één dag per jaar uit bedrijf om af te koelen, zodat er onderhoud mogelijk is.

Het demonstratieproject duurde anderhalf jaar. Daarna werd de installatie verkocht aan het Bosbad Putten en inmiddels heeft de gasturbine al meer dan 45.000 uren continu probleemloos gedraaid.



Figuur 1 Principeschema microgasturbine Bosbad Putten



Volkert van Walstijn, beheerder van de gasturbine bij het Bosbad: 'We hebben er geen omkijken naar'

Kerneigenschappen:	
Leverancier gasturbine:	Capstone
Deelnemers in test:	GasTerra Nuon
Model:	Capstone C30
<hr/>	
Opgesteld vermogen:	1.100 kW
Warmtevraag:	450 kW
Elektrisch vermogen:	28 kW
Thermisch vermogen:	64 kW

Tabel 1 Eigenschappen energieinstallatie

4.3 Project WKC Emmtec

Op een groot industrieterrein in Emmen (Emmtec Industry & Business Park) verzorgt Emmtec Services de levering van bijna elke denkbare utility aan de op het terrein gevestigde bedrijven. Naast stoom op diverse drukniveaus en elektriciteit levert zij onder andere ook perslucht, stikstof, proceswater, CV-water, drinkwater en gekoeld water en koude. Ook exploiteert Emmtec Services op haar terrein een eigen elektriciteitsnet, een afvalwaterzuivering en een biologische sulfaat-verwijderingsinstallatie. Het aardgas wordt centraal door Emmtec ingekocht en voor het grootste deel gebruikt voor de opwekking van stoom en elektriciteit. Het resterende deel van het gas wordt doorgeleverd naar de bedrijven op het bedrijventerrein. De bedrijven op het terrein richten zich met name op de productie van hoogwaardige materialen voor de chemische en verwerkende industrie. Voorbeeldproducten zijn supersterke vezels (aramide), hoogwaardige kunststoffen, gelatine en biodiesel.

Voor de levering van stoom en elektriciteit heeft Emmtec de beschikking over twee warmtekrachtcentrales met elk een elektrisch vermogen van ca. 25 MW. Beide installaties zijn gebaseerd op een frame-5 gasturbine van GE met stoominjectie voor NO_x-reductie en een bijgestookte afgassenketel. De installaties leveren stoom aan een gezamenlijk systeem waarin nog twee stoomturbines zijn opgenomen. Eén van beide ketels levert stoom van 30 bar en heet water, de andere levert stoom op een druk van 30 en 4 bar.

De gezamenlijke thermische capaciteit van de WKK-installaties bedraagt circa 200 ton stoom per uur bij een druk van 30 bar. De stoomturbines (met een gezamenlijk maximaal vermogen van 10 MWe) worden ingezet om de niet direct aan klanten geleverde stoom van 30 bar naar 4 bar te expanderen.

De aard van de industriële activiteiten op het bedrijventerrein vraagt om een zeer betrouwbare en continue levering van stoom en elektriciteit. Een hapering in de levering kan tot langdurige storingen en stilstand bij de afnemers leiden. Emmtec stelt dan ook alles in het werk om een zo continu mogelijke productie te garanderen. De afgelopen acht jaar heeft Emmtec Services een beschikbaarheid van 100% van de utilities voor haar afnemers kunnen realiseren.



Overzicht van het terrein in Emmen Bron: Emmtec Services

De eerste warmtekrachtcentrale (WKC) werd in 1980 geplaatst met als doel een efficiëntere opwekking van energie te bewerkstelligen. De basiscapaciteit van de stoom uit deze WKC bedroeg 55 ton per uur. Door middel van bijstookbranders in de afgassenketel werd het mogelijk een totale capaciteit van 100 ton stoom per uur te garanderen. Eind jaren negentig werd de stoomvraag door de uitbreiding van een van de bedrijven op het terrein met nieuwe productielijnen, een stuk groter. Daardoor steeg de stoomvraag van de afnemers tot boven de capaciteit van de bestaande WKK-installatie. Emmtec heeft toen een afweging gemaakt tussen de verschillende mogelijkheden voor de invulling van deze extra stoomvraag.

Het bedrijf maakte daarom een vergelijking tussen de verschillende opties voor extra stoomproductie, zoals tussen een nieuwe stoomketel en verschillende varianten van een gasturbine met

afgassenketel. In eerste instantie bleek de rentabiliteit van een nieuwe gasturbine in de toenmalige energiemarkt te laag voor een daadwerkelijke investering te zijn. De extra opbrengsten door een hoger rendement wogen niet op tegen de extra investeringskosten. In tweede instantie werd er ook naar eenzelfde type gasturbine als de reeds opgestelde gasturbine gekeken, zij het in 'gere refurbishde' staat. Dat wil zeggen dat de gasturbine tot vrijwel nieuwstaat hersteld was. De investeringskosten voor een dergelijke installatie lagen fors lager, waardoor de rentabiliteit aanzienlijk beter uitviel.

De realisatie van de nieuwe WKC in die jaren kan bijzonder genoemd worden. Rond 2002 was de liberalisering van de energiemarkt net afgerond en was de sparkspread niet goed, waardoor de rentabiliteit van WKK onder grote druk stond. Een aantal WKK-installaties werd in die tijd uit bedrijf genomen, daar waar Emmtec



Gasturbine aan de hijskraan Bron: Emmtec Services

juist in WKK investeerde. De lagere kostprijs die ontstond door gebruik te maken van een gere refurbishde gasturbine, is een zeer positieve factor geweest. Daarnaast waren er ook andere argumenten om eenzelfde gasturbine aan te schaffen: de bewezen betrouwbaarheid van de eerste turbine was erg hoog en het personeel was reeds bekend met de installatie. Daardoor was er geen extra training voor de nieuwe installatie nodig.

Bij de start van het project bleek dat er op het geplande terrein een grote eikenboom stond, die plaats zou moeten maken voor de nieuwe WKC. Dit leidde tot grote interne discussies tussen voor- en tegenstanders van de kap van de boom. Uiteindelijk bleek het



Henk Leentjes, manager Utilities & Afvalwaterzuivering Emmtec: 'Klanten zijn leidend voor Emmtec en daar stemmen we alles op af'

mogelijk om de opstelling van de WKC dusdanig aan te passen dat er voldoende ruimte voor onderhoud rond de installatie bleef en er genoeg overzicht over het terrein vanuit de centrale meetwacht was. De schoorsteen van de WKC liep bij wijze van spreken nog net niet door de kruin van de boom en de eik bleef gespaard. Het behoeft dus geen betoog dat (een deel van) de door de warmtekrachtcentrale opgewekte elektriciteit in dit Emmense geval een groen karakter heeft.

Kerngegevens:	
2 GE Frame 5 gasturbines	Ca. 50 MW totaal
2 Afgassenketel met bijstookbrander	200 ton per uur totaal
2 Stoomturbines	Ca. 10 MW totaal
Stoomlevering op 30 bar en 4 bar	
Heetwaterproductie	
Een eigen net voor elektriciteit	

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie



Warmtekrachtcentrale met op de voorgrond de eikenboom Bron: Emmtec Services

4.4 Project Micro-WKK

Bij Hans Overdiep in Groningen werd er in 2007 een micro-WKK-installatie geplaatst. Vooralnog een bijzondere installatie, die deel uitmaakt van een eerste veldtest van acht stuks van een nieuw type Stirlingmotor. Het toestel wordt in de woning voor ruimteverwarming en voor de verwarming van tapwater gebruikt en functioneert tot nu toe probleemloos. Op korte termijn zal de stichting Slim met Gas nog honderd van deze toestellen in woningen plaatsen.

In dit projectvoorbeeld is een micro-WKK-toestel van Remeha gebruikt, waarin een vrije zuiger Stirlingmotor van Microgen Engine Corporation toegepast wordt. De micro-WKK-installatie heeft een elektrisch vermogen van 1 kWe, een warmtevermogen van 5 kWth en draait op aardgas. Om in de piekvraag te kunnen voorzien is een hulpbrander van 20 kWth bijgeplaatst. De plaatsing van een micro-WKK-installatie, in plaats van een HR-ketel,

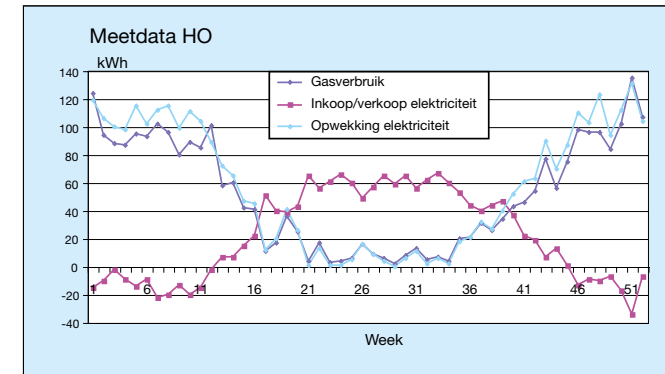


Martha en Hans Overdiep Bron: Hans Overdiep

vereiste geen bouwkundige aanpassingen of aanpassingen van het verwarmings- of elektrische systeem.

Het totale rendement van het toestel is 107% (op onderwaarde), waardoor de energie in aardgas maximaal wordt benut. De ketel voldoet aan de eisen die in het Gaskeur HRe-label gesteld worden en daarom mag deze installatie ook een HRe-ketel worden genoemd. Als er vraag naar ruimteverwarming is, start de micro-WKK-installatie op. Het toestel kan dan zowel de vraag naar ruimteverwarming als naar tapwaterverwarming invullen. Als er alleen een vraag naar tapwaterverwarming is, wordt deze door de hulpbrander ingevuld om zo een groot aantal starts van de Stirlingmotor te voorkomen.

Als de installatie op een bepaald moment meer elektriciteit produceert dan er binnen de woning wordt verbruikt, wordt de elektriciteit aan het net geleverd. Door een terugdraaiende meter wordt deze elektriciteit met de afgenomen elektriciteit verrekend. Er vindt dus saldering plaats, wat betekent dat het teruglevertarief gelijk is aan de inkoopprijs, voor zover er over een jaar niet meer elektriciteit wordt teruggeleverd dan er afgenomen wordt. In figuur 1 is te zien hoe de micro-WKK het afnamepatroon van gas en elektriciteit beïnvloedt. Het jaarlijkse gasverbruik voor ruimteverwarming en warm tapwater met de micro-WKK-installatie bedraagt 2.729 m³.



Figuur 1 Afnamepatroon van gas en elektriciteit met de micro-WKK-installatie



Hiermee wordt gelijktijdig 3.013 kWh elektriciteit geproduceerd, waardoor de inkoop van elektriciteit tot 1.151 kWh is teruggebracht. Duidelijk is dat er van november tot half maart meer elektriciteit wordt geproduceerd dan er in de woning verbruikt wordt; er wordt dus teruggeleverd aan het net. In de zomermaanden is de behoefte aan verwarming laag en worden er weinig draai-

Kerneigenschappen:	
Technologie:	Vrije zuiger Stirlingmotor
Leverancier motor:	Microgen Engine Corp.
Leverancier micro-WKK-installatie:	Remeha
Investerings:	Onderdeel van testtraject
Totaalrendement:	107% (onderwaarde)
Thermisch vermogen:	5 kWth
Elektrisch vermogen:	1 kWe

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie

De micro-WKK-installatie wordt uitgelezen Bron: Gasterra



uren met de HRe-ketel gemaakt; de elektriciteit wordt dan ook voornamelijk uit het net ingekocht. Hans en Martha Overdiep zijn tevreden met de HRe-ketel: 'Het verschil met een HR-ketel zit niet in comfort of gemak, maar in de E van elektriciteit: de elektriciteitsproductie is duidelijk zichtbaar op de kamerthermostaat en natuurlijk ook in de lagere energierekening!'

4.5 Project WKC De Omval

Het gebied tussen de Amstel, de Weespertrekvaart, het Amstelstation en de Mr. Treublaan staat bekend als 'de Omval'. De rivier de Amstel maakt er een scherpe bocht. Bij een bepaalde wind moesten schepen hier hun zeilen omzetten, het zogenaamde 'omvallen' en daaraan ontleent de Omval haar naam. Het is een uniek punt in de stad, dat meer dan eens voor schilders model heeft gestaan. De namen van drie beroemde Hollandse meesters zijn dan ook vereeuwigd in de kantoor-torens Mondriaan, Breitner en Rembrandt. Daarnaast bevinden zich op de Omval de Hogeschool van Amsterdam en een aantal kantoren en woningen.



De drie torens van de Omval Bron: Nuon

Tijdens de projectontwikkeling van de Omval in de jaren negentig is ervoor gekozen om de energievoorziening centraal te organiseren en van warmte en koude uit een warmtekrachtcentrale (WKC) gebruik te maken. In totaal voorziet de centrale in de warmte, koude én noodstroombehoefte van kantoren met een vloeroppervlakte van 130.000 m², 400 woningen en een aantal winkels. Inmiddels draait deze warmtekrachtcentrale al ruim 13 jaar naar tevredenheid van haar gebruikers. Nuon Business Energy Solutions is verantwoordelijk voor de exploitatie en distributie.

WKC De Omval is opgebouwd uit een viertal gasmotoren met een gezamenlijk vermogen van 2.634 kWe. De geproduceerde elektriciteit wordt aan het openbare net geleverd. Het thermisch vermogen van de gasmotoren wordt op het warmtenet voor ruimteverwarming en voor warm tapwater ingezet. Daarnaast wordt de warmte in de zomer ook in een absorptiekoelmachine gebruikt voor de opwekking van koude van 12 tot 7 °C, aangevuld door centrifugaalcompressoren. In de winter kan er bij een buiten-temperatuur die lager dan 8 °C is, deels gebruik worden gemaakt van vrije koeling via de luchtkoelers voor aanvoer van koude, daarbij aangevuld door de compressoren. Deze koude wordt bijvoorbeeld ingezet voor de koeling van kantoorruimtes met ICT-apparatuur en airconditioning (interne warmtelast).



De motoren van de WKC Bron: Nuon

De WKC volgt voor de aansturing van de WKK-installaties primair de warmtevraag van haar omgeving. De piekvraag in de winter is 7 MWth, wat betekent dat de warmteproductie van de WKK-installatie (4 MWth) door een of meer ketels wordt aangevuld. Deze vraag varieert per dag en per uur. Buiten kantooruren is de warmtevraag lager dan tijdens kantooruren, zodat er meer warmte wordt gegenereerd dan verbruikt. Door de bijgeplaatste buffer, met een inhoud van 450 m³, is Nuon in staat kortstondige schommelingen in de vraag op te vangen en de productie op dag-basis volgens haar eigen leveringsverplichtingen en inzetstrategie te optimaliseren. Bij een afnemende warmtevraag worden achtereenvolgens de ketels en de WKK-installaties één voor één

uitgeschakeld. Daarnaast wordt er door het jaar heen aan de koudevraag van de Omval voldaan door een combinatie van de absorptiekoelmachine, vrije koeling en de elektrisch aangedreven koelcompressoren.

WKC De Omval levert noodstroom aan vier locaties. Bij uitval van het openbare net schakelen de gebouwen over naar een afzonderlijke 10 kV-voedingskabel afkomstig van de WKC. Deze zal de gebouwen op preferente groepen van elektriciteit voorzien, waardoor de elektriciteitsvoorziening (deels) in stand wordt gehouden. De WKK-motoren zijn dusdanig uitgevoerd dat zij deze noodstroom kunnen leveren.

De energiecentrale wordt dagelijks (online) bewaakt en bij eventuele afwijkingen of storingen kan er snel worden ingegrepen. Nuon Business Energy Solutions heeft klanttevredenheid hoog in het vaandel staan, wat tot uitdrukking komt in het recent vernieuwde onderhoudsconcept waarbij storingen snel en veilig kunnen worden opgelost. De gebruikers zijn erg tevreden met deze organisatie en zijn bovendien ook nog eens voordelig met hun energiekosten uit. Daarnaast is het milieu gebaat bij WKC De Omval. Met een jaarlijkse productie van 10 miljoen kWh wordt er ruim een miljoen kubieke meter aardgas uitgespaard, terwijl de productie van CO₂ met 2.000 ton wordt verminderd.

Omdat WKC De Omval in een gebied geplaatst is waar veel mensen werken, studeren en wonen, is er ook veel aandacht besteed aan de ruimtelijke inpassing van de centrale. Met behulp van een architect is de vormgeving van het gebouw op de omgeving afgestemd en past de centrale vlekkeloos in het straatbeeld.

Kerneigenschappen:	
Motoren:	2 * TBG 620 v8
	2 * TBG 620 v12
Leverancier motor:	Deutz
Leverancier AKM:	Carrier
Overige KM:	Carrier / York
Warmteopslagtank:	450.000 liter
Netto elektrisch vermogen:	2.646 kWe (totaal)
Thermisch vermogen WKK:	3.826 kWth
Totaal thermisch vermogen	
Warmwater (90 °C):	13 MWth
Koudevermogen AKM:	340 kW
Koudevermogen totaal:	5 MW

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie



De inpassing van de WKC in het gebied

4.6 Project Energiecentrale UMC Utrecht

Het UMC Utrecht heeft zo'n 10.000 werknemers in dienst. Naast patiëntenzorg vindt er medisch onderzoek plaats en wordt er onderwijs aan studenten van de Universiteit Utrecht gegeven. De functie van een ziekenhuis brengt met zich mee dat er hoge eisen aan de energievoorziening worden gesteld. Continuïteit in de toevoer van warmte, koude en elektriciteit is essentieel. Eén van de uitgangspunten bij de keuze van een WKK-installatie in Utrecht was dan ook dat deze in eilandbedrijf moet kunnen draaien.

Het UMC Utrecht beschikt over verschillende netten: een koude-net, een stoomnet en een CV-net. Drie Wärtsilä-gasmotoren van elk 2,15 MWe zorgen voor de elektriciteitsproductie (afbeelding). De motorwarmte gaat naar het CV-net, terwijl de rookgassen door een gemeenschappelijke afgassenketel gaan, die zowel het stoomnet als (indirect) het CV-net voedt. Het CV-net heeft afhankelijk van het seizoen een andere ingangstemperatuur ('s zomers 70 °C en 's winters 90 °C). De retourtemperatuur bedraagt doorgaans 45 °C.

Het koudenet wordt door een koudeopslagsysteem, twee absorptiekoelmachines (één van 600 kW gevoed door stoom en één van 1.500 kW gevoed door CV-water) en vier centrifugaalcompressoren (elk 2.500 kW) gevoed. Het koude water dat 's zomers wordt opgepompt, heeft aan het begin van het seizoen een temperatuur van 7 à 8 °C.

Het stoomnet dient onder andere voor de bevochtiging, de sterilisatie en 's zomers ook voor de absorptiekoelmachines, en wordt gevoed door de afgassenketel en door drie stoomketels, waarvan er twee met dual fuel branders zijn uitgerust (aardgas/huisbrandolie). Ook bij uitval van het gasnet kan het UMC Utrecht in zijn eigen warmtebehoefte voorzien.



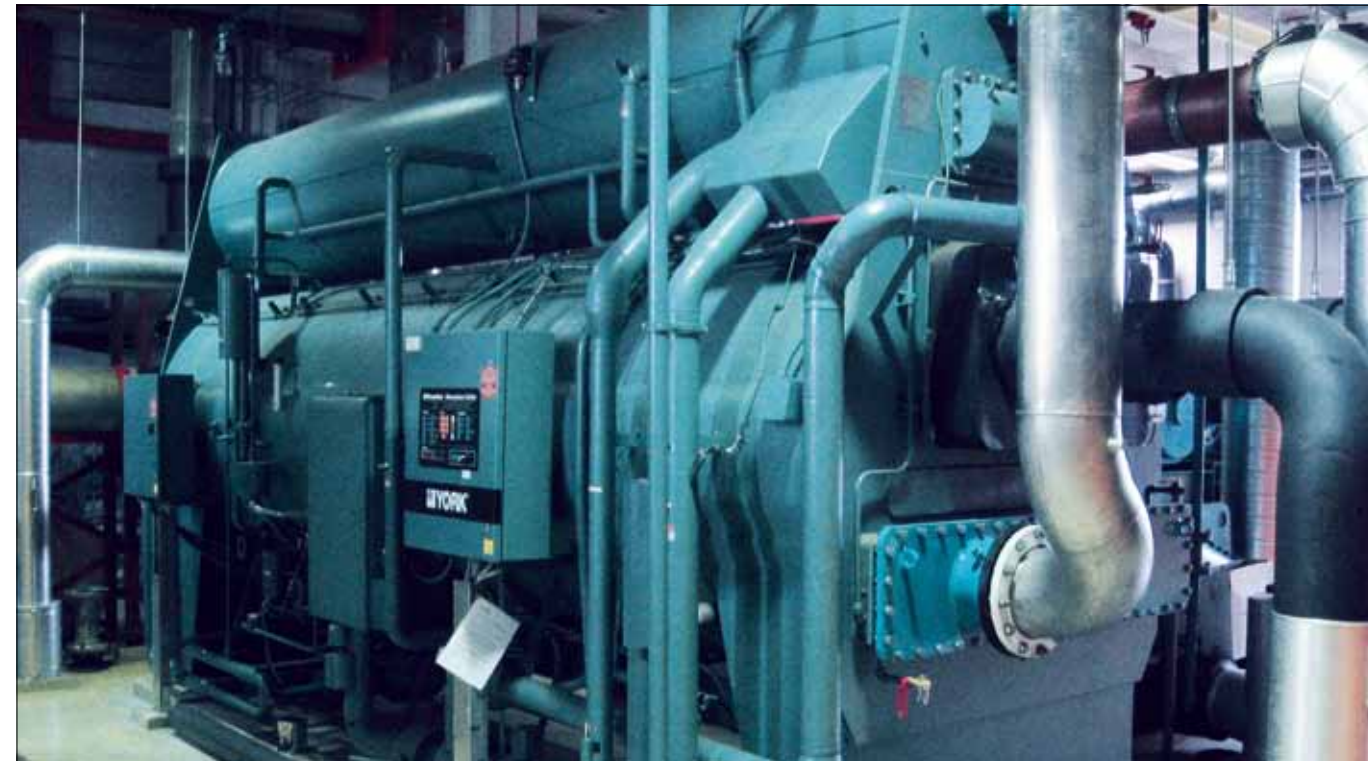
Een van de gasmotoren 2,15 MWe in het UMC Utrecht



De afgassenketel (maximaal 20 ton/h)

De motoren draaien tijdens plateau-uren op vollast omdat een eventueel overschot aan stroom tegen het plateautarief verkocht kan worden. Tijdens de daluren worden de motoren zodanig geregeld dat er altijd een klein deel elektriciteit wordt ingekocht. Bij een storing aan het WKK-systeem dient het landelijke net als back-up.

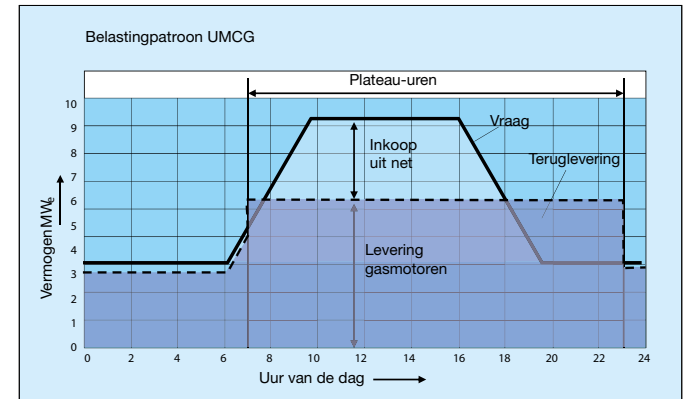
Bij uitval van het landelijke net schakelt het systeem op eilandbedrijf over zonder dat er uitval van de essentiële ziekenhuisfaciliteiten optreedt. Het besturingssysteem berekent namelijk op elk moment het vanuit het net geleverde vermogen. In combinatie met het aantal ingeschakelde WKK-eenheden wordt daarmee vastgesteld of er bij uitval van het net overbelasting zal optreden. Op basis hiervan wordt bij eilandbedrijf direct een vooraf berekend aantal gebruikers met een lage prioriteit afgeschakeld. Tijdens het



Absorptiekoelmachine 1,5 MW

eilandbedrijf worden er vervolgens automatisch gebruikers af- en bijgeschakeld, op basis van een maximale belasting van de gasmotoren tussen de 90 en 95%. In 2006 werd de installatie twaalf keer (en met succes) automatisch in eilandbedrijf ingeschakeld.

Alle units hebben een autonome regeling. Zo leidt een storing die in een enkele unit optreedt, niet tot een storing elders. Door directe gasinspuiting kunnen de Wärtsilä-gasmotoren snel op belastingsveranderingen reageren. Binnen een halve seconde kan het geleverde vermogen van een gasmotor verdubbeld worden (van bijvoorbeeld 40 naar 80%). In het geval van uitval of storingen van het gasnet wordt er overgeschakeld op de dieselmotor van 3 MWe en twee stoomketels (11 MWth elk) die ook op gasolie kunnen werken.



Figuur 1 24-uurs belastingkromme

Kerngegevens:	
3 Wärtsilä-gasmotoren:	6,5 MW (totaal)
1 afgassenketel + economiser:	3,0 MW
1 dieselmotor back-up:	3,0 MW
2 stoomketels dual fuel:	22 MW
1 stoomketel alleen aardgas:	5,5 MW
Koudeopslagsysteem:	2,7 MW
2 absorptiekoelmachines:	2,1 MW
4 centrifugaal compressoren:	10 MW
Kerngegevens energievraag:	
Koudenet van 6/16 o:	16 MW
Stoomnet 7 bar:	Maximaal 20 ton/h
CV-net	15 MW
Elektriciteit piekvraag:	9 MW

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie



Hans Vlodrop: 'Onze hoge bedrijfszekerheid is, naast de keuze van snel reagerende motoren, mede te danken aan ons gemotiveerde onderhoudspersoneel'

4.7 Project Stadsverwarming Amersfoort-Vathorst

In de nieuwe Vinex-wijk Amersfoort Vathorst heeft Eneco een netwerk voor stadsverwarming aangelegd. In 2002 is deze wijk begonnen met de bouw van circa 11.000 woningen, waarvan er ongeveer 2.500 op stadsverwarming zijn aangesloten. In het oorspronkelijke plan was een houtgestookte WKK-installatie voor de verwarming van de woningen en het warme tapwater opgenomen. Gezien de benodigde ruimte voor houtopslag en de nabijheid van woningen werd er toch gekozen voor de bouw van een aardgasgestookte WKK-installatie, die mogelijk later met groen gas (op aardgaskwaliteit) kan worden gevoed. Begin 2007 werd de installatie volledig in bedrijf genomen. De installatie is gebouwd in de 'oksel' van de kruising tussen het spoor Amersfoort-Zwolle en de A1.

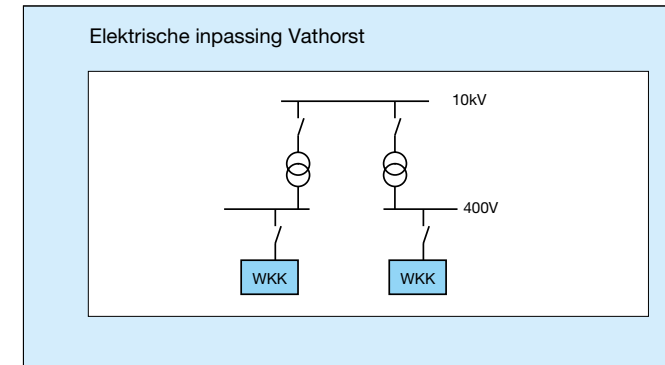


Uitzicht over de nieuwe wijk Vathorst

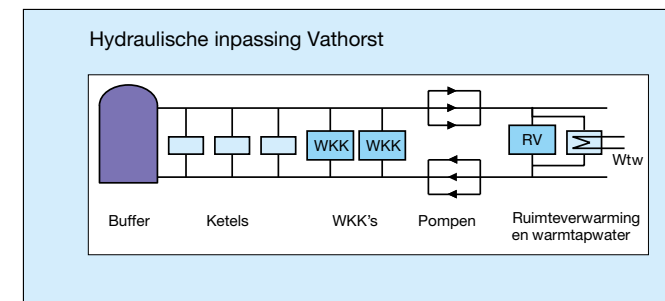
De energiecentrale beschikt over drie heetwaterketels met een vermogen van ieder 6.000 kWth en twee gasmotoren met een thermisch vermogen van ieder 1.680 kWth. Het elektrisch en thermisch rendement liggen beide rond de 40%. Voor de buffering van warmte is naast het gebouw een opslagvat van 250 m³ geplaatst. De systemen zijn zodanig gedimensioneerd dat er ook tijdens het onderhoud aan een van de gasmotoren, één ander systeem kan uitvallen zonder dat de levering in gevaar komt (n-1 principe).

De inpassing van de centrale in het elektriciteits- en warmtenet is als volgt: de generatoren van de WKK-installaties leveren elektriciteit op een spanningsniveau van 400 Volt. Deze laagspanning heeft onder andere als voordeel dat er voor het onderhoud van de motoren geen speciale veiligheidsmaatregelen vereist zijn. Daarnaast kunnen de pompen en ventilatoren in de energiecentrale rechtsreeks worden gevoed. De teruglevering aan het net gaat via (step-up) transformatoren op 10 kV-niveau (figuur 1).

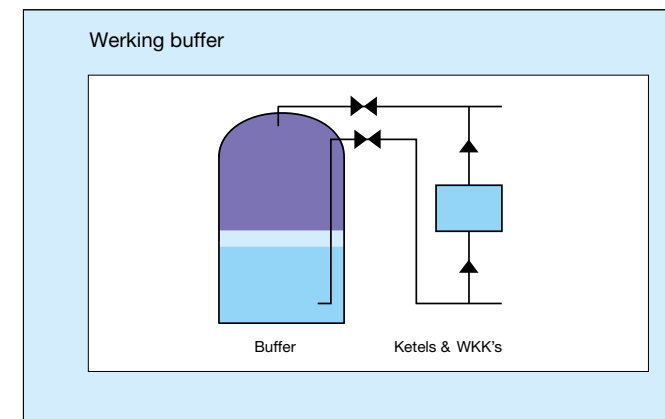
Het verwarmingssysteem van de woningen is hydraulisch rechtstreeks gekoppeld aan het warmtenet. Dit heeft als voordeel dat er geen warmtewisselaars voor de verwarming nodig zijn. Iedere woning beschikt over een eigen warmtewisselaar om tapwater



Figuur 1 Inpassing in het elektriciteitsnet



Figuur 2 Hydraulische inpassing



Figuur 3 Werking van de warmtebuffer

op te warmen. Om de druk in de woningen niet te hoog te laten oplopen heeft de centrale naast aanvoerpompen ook retourpompen. De retourtemperatuur vanuit het net is rond de 55 °C, waardoor het mogelijk is om de gasmotoren parallel aan de CV-ketels en het buffervat in te passen.

Het water naar de huizen wordt op een temperatuur gebracht van minimaal 80 °C – dit in verband met de opwarming van tapwater naar minimaal 60 °C, wat voor het doden van legionellabacteriën noodzakelijk is. De warmtebuffer wordt op een zodanige wijze vanuit de bovenzijde gevoed en geleegd dat de stroomsnelheid minimaal is. Dit is voor een goede gelaagdheid essentieel (figuur 2).

De gasmotoren draaien in principe alleen overdag tijdens de plateau-uren. Naast de directe levering van warmte wordt ook de buffer gevuld. 's Winters wordt de buffer geheel gevuld; 's zomers niet helemaal om onnodige warmteverliezen te voorkomen en om de mogelijkheid te hebben om bij een piekvraag aan elektriciteit in te kunnen springen. Het koude deel van de buffer zorgt dan voor de koeling van de gasmotoren zodat er geen noodkoeler nodig is (figuur 3).

Er zijn veel maatregelen genomen om geluidsoverlast van de WKK-installatie, die aan de rand van een woonwijk staat, te voorkomen. Zo zijn er in alle gebouwopeningen (schoorstenen en luchttoe- en afvoeren) dempers geplaatst. Ook is de apparatuur binnen de centrale, zoals de luchtinlaten en rookgasuitlaten van de ketels, akoestisch gedempt.

De energiecentrale kan geheel op afstand worden bestuurd. In normale situaties komt er eens per week een monteur voor visuele inspectie langs. Daarnaast kijkt Eneco ook vanuit het hoofdkantoor of de centrale naar behoren functioneert. Het monitoring-systeem beschikt over een groot aantal sensoren, waardoor er snel op afwijkingen geanticipeerd kan worden. Zo wordt de geluidsdruk per cilinder bewaakt, terwijl vochtsensoren op de grond voorkomen dat lekkages onopgemerkt blijven.



René Buwalda van Eneco: 'Een goede monitoring is essentieel voor de leveringszekerheid'



Geluidsdempers bij de inlaat van de ketels

Kerneigenschappen:	
Leverancier gasmotoren:	Jenbacher
Leverancier CV-ketels:	Viessmann
Opgesteld elektrisch vermogen:	2 * 1.680 kW _e
Opgesteld thermisch vermogen:	3 * 6.000 kW _{th}
Capaciteit buffervat:	250 m ³
Elektrisch rendement gemiddeld:	40%
Thermisch rendement gemiddeld:	40%

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie

4.8 Project WKK Gebr. de Groot Kwekerijen

Bij de Gebroeders De Groot Kwekerijen in de Harmelerwaard worden in een kascomplex van 15 hectare, verdeeld over drie aparte afdelingen, trostomaten gekweekt. Het bedrijf is in 2003 opgericht, heeft een zestigtal medewerkers in dienst en werd in 2005 verder uitgebreid. Jaarlijks worden er circa 9,5 miljoen kilo trostomaten geteeld.

Oorspronkelijk werden de kassen van de Gebroeders De Groot met aardgasketels verwarmd. Door de stijgende aardgasprijs werd het aantrekkelijk om alternatieven op basis van een gasmotor-WKK te gebruiken. Sinds 2006 zijn er drie Jenbacher J616 GS motoren geplaatst, op elke afdeling één. De WKK-installaties produceren warmte voor de kassen en elektriciteit voor levering aan het openbare net. Als het thermisch vermogen van de motoren onvoldoende is voor de warmtebehoefte in de kas, kan er altijd met de ketel worden bijgestookt.

In de winter worden de kassen met de opgewekte warmte op temperatuur gehouden. In de zomer worden de motoren gebruikt om CO₂ te doseren in de kas waarbij de daarbij vrijkomende warmte in een warmtebuffer wordt opgeslagen. Deze buffer wordt gebruikt om de kassen gedurende de nachturen op temperatuur te houden en om ze in de vroege ochtend te 'ontvochtigen'.

De motoren worden op basis van de elektriciteitsprijs en voor CO₂-productie aangestuurd, waardoor ze vaak overdag draaien, terwijl de warmtebehoefte in de kas juist 's nachts optreedt. De WKK-installatie wordt daarom met een warmtebuffer gecombineerd, zodat verschillen in warmteproductie en -behoefte gedurende zo'n 24 uur overbrugd kunnen worden. In principe wordt de warmte uit de WKK-installatie altijd eerst aan de buffer geleverd. Deze



Trostomaten, met boven de teelt en daaronder de buizen van het verwarmingssysteem

geeft vervolgens met een buizensysteem warmte aan de kas. Om de rookgassen uit de WKK voor CO₂-bemesting van de gewassen geschikt te maken, wordt het rookgas van de gasmotor gereinigd met een Codinox-installatie van de firma Hanwel. Deze bestaat uit een selectieve katalytische reductie met ureum en een oxidatiekatalysator. Voordat het rookgas de kas ingaat, verwijdert de installatie schadelijke componenten zoals NO_x, H₂S en etheen.

De trostomatenkweek wordt niet belicht en de elektriciteitsbehoefte van het bedrijf is laag. Om de economische waarde van de geproduceerde elektriciteit optimaal te benutten, heeft De Groot samen met vijf andere tuinbouwbedrijven geïnvesteerd in een eigen elektriciteitsnet van de Tuinbouwcombinatie Hamelerwaard BV. Binnen dit verband hebben de tuinders samen een eigen netwerk laten aanleggen en collectief de WKK-installaties gekocht. In totaal staan er zeven WKK-installaties opgesteld, die een gezamenlijk vermogen leveren van 13 MWe.



Marcel de Groot: 'Een WKK-installatie biedt een goed rendement en een aanzienlijke kostenbesparing met weinig inspanning; als zij eenmaal draait'

Het eigen netwerk is via een aparte kabel van 7,5 kilometer op het landelijke net aangesloten. Door de constructie met een eigen netwerk kan de geproduceerde elektriciteit ook door collega-tuinders binnen het cluster gebruikt worden. Het overschot wordt aan het openbare net geleverd.

Door een combinatie van plateau-uren (07:00 - 23:00 uur) tijdens weekdagen en dure uren in het weekend (08.00 - 20.00 uur) draaien de motoren bij De Groot circa 4.600 uur per jaar. De elektriciteitsopbrengsten zijn hierdoor voor een langere termijn vastgelegd. Daarnaast is er een apart bureau ingeschakeld dat de opbrengst van de motoren op de APX- en onbalansmarkt optimaliseert. De installatie van de motoren bij De Groot verliep niet zonder slag of stoot. Zo moest een van de motoren kort na installatie weer terug naar de fabriek omdat zij 'in elkaar gedraaid' was. Ook zat er een breuk in één van de kabels tussen het lokale tuindersnet en het openbare net, maar deze kon gelukkig relatief eenvoudig worden hersteld.



De Jenbacher JMS 616 GS

Marcel de Groot, een van de eigenaren van de kwekerij, geeft aan dat het zonder de WKK-installaties moeilijk geworden was om concurrerend tegen de huidige tomatenprijzen te blijven werken. Het lijkt er dan ook op dat hij twee bedrijven runt: een tomatenkwekerij en een elektriciteitscentrale. Deze laatste levert – met relatief weinig inspanning – een halvering van de stookkosten op en hierdoor hoeven de prijzen van de trostomaten niet omhoog.

Kerneigenschappen:	
Leverancier:	GE Jenbacher
Onderhoud:	GE Jenbacher
Model:	JMS 616 GS (3x)
Elektrisch vermogen:	2,4 MW per motor
Thermisch vermogen:	2,4 MW per motor
Warmtebuffer:	1.000 m ³ per kascomplex van 5 ha
Warm water:	Beschikbaar tussen 90 en 30 °C
Rookgasreiniger:	Codinox

Tabel 1 Gegevens energieinstallatie



Warmtebuffer met 1.000 m³ water

Bijlage 1

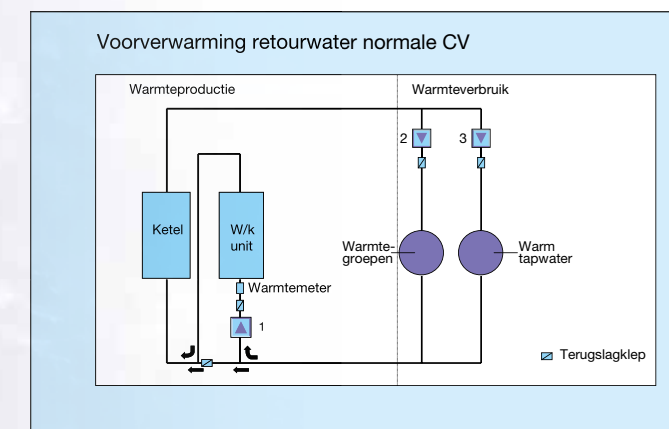
Hydraulische en stoomzijdige inpassing van WKK

De inpassing van een WKK-installatie in een verwarmings- of stoomsysteem is van cruciaal belang voor het goed laten functioneren van de installatie. In deze bijlage zijn regelmatig voorkomende varianten voor de hydraulische inpassing van WKK in een aantal verschillende CV-systemen uitgewerkt. De inpassing van een WKK-installatie in stoomsystemen verschilt van de hydraulische inpassing en is in deze bijlage apart uitgewerkt.

Voorverwarming retourwater van een normale CV door de WKK-installatie

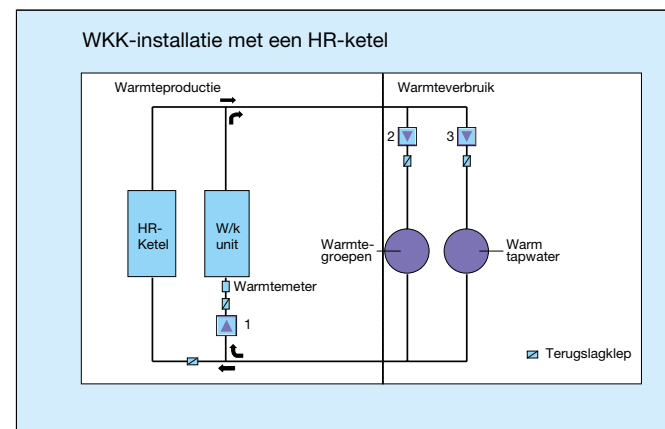
Figuur 1 laat de eenvoudigste inpassing zien van een WKK-installatie in een verwarmingsinstallatie met één normale ketel (geen HR-ketel). De WKK-installatie wordt gevoed met het (koudste) retourwater en komt alleen in bedrijf als er voldoende warmte nodig is, de retourtemperatuur voldoende laag is en de elektrische stroom in het net ingevoerd kan worden.

Als de vraag naar warmte klein is, komt alleen de CV-ketel in bedrijf en staat pomp 1 stil. De CV-ketel schakelt aan en uit, of regelt alleen in het onderste regelbereik. Als de warmtevraag voldoende groot is, treedt pomp 1 in werking en komt de WKK-installatie als voorverwarming in bedrijf. Het circulerende water wordt zonodig door de CV-ketel naverwarmd. Het heeft de voor-

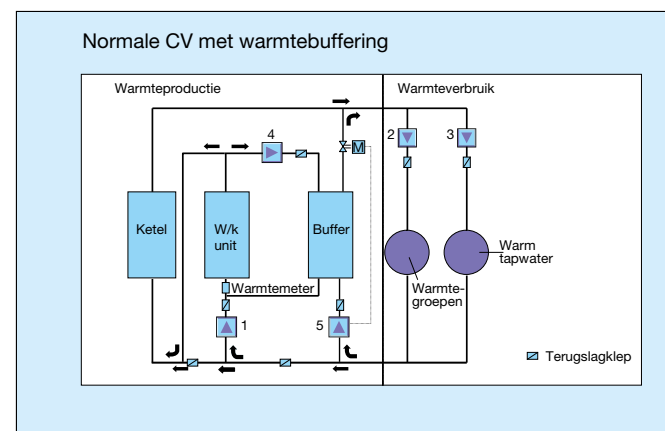


Figuur 1 Voorverwarming retourwater van een normale CV door de WKK-installatie

keur om het opgenomen thermische vermogen van het circuit te meten, zodat het inschakelmoment kan worden berekend. Hiervoor zijn een flowmeter en twee temperatuursensoren nodig. Terugslagkleppen verhinderen dan dat er een thermische stroming optreedt die tegen de verwarmingscirculatie-richting in gaat. De WKK-installatie heeft doorgaans een regelbereik van tussen de 30 en 100% van de maximale belasting. Afhankelijk van de opbouw van de kosten en de rendementscurve kan de ondergrens worden verhoogd. De onderhoudskosten worden namelijk



Figuur 2 WKK-installatie met een HR-ketel



Figuur 3 Voorverwarming met een WKK-installatie warmtebuffering

per draaiuur berekend en naarmate het vermogen lager is, loopt het elektrisch rendement iets terug.

WKK-installatie met een HR-ketel

Als er een HR-ketel aanwezig is, is voorverwarming van het retourwater niet zinvol. In de HR-ketel vindt dan namelijk geen condensatie plaats, waardoor het rendement lager is dan gewenst. Daarom wordt de WKK-installatie parallel met de HR-ketel geschakeld (figuur 2). Als de warmtevraag klein is, komt alleen de HR-ketel in bedrijf en staat pomp 1 stil. De HR-ketel schakelt in en uit of regelt alleen in het onderste regelbereik. Zodra de warmtevraag voldoende groot is, schakelt het systeem over op de WKK-installatie en komt pomp 1 in bedrijf. Bij een nog grotere warmtevraag schakelt ook de HR-ketel in.

WKK-installatie met warmtebuffer

De toepassing van een warmtebuffer biedt de mogelijkheid het economisch rendement van een WKK-installatie te verhogen door:

- De draaiuren zoveel mogelijk tijdens de plateau-uren te concentreren (met een grotere besparing of een hoger teruglevertarief).
- De WKK-installatie zoveel mogelijk op vollast te laten draaien (met een hoger economisch en technisch rendement).
- Ook tijdens een piek in de elektriciteitsvraag te kunnen draaien, zonder dat er op dat moment vraag naar warmte is.

Het schema in figuur 3 komt qua principe overeen met het schema in figuur 1. Met de toegevoegde warmtebuffer kan warmte worden opgeslagen. Tijdens de uren dat er een warmteoverschot is, kan er warmte in de buffer worden opgeslagen door inschakeling van pomp 4. Pomp 1 schakelt dan in om in de (beperkte) warmte te voorzien. Op de momenten dat er een gering stroomverbruik is en/of tijdens daluren kan die warmte weer gebruikt worden door middel van het starten van de bijbehorende pomp (5), het openen van de klep boven de buffer en door de buffer leeg te laten lopen. Als er een grote warmtevraag optreedt of als de buffer leeg is, wordt de CV-ketel ingeschakeld.

WKK-installatie met HR-ketel en buffer

Bij de toepassing van een HR-ketel wordt de inpassing van de WKK-installatie weer parallel uitgevoerd, net zoals in het schema in figuur 4. In geval van een elektriciteitsvraag zonder warmte-

vraag kan de WKK-installatie worden ingezet. Pomp 4 en de WKK-installatie zijn dan in bedrijf en de buffer wordt geladen. Wanneer er geen elektriciteit meer nodig is of als de buffer vol is, schakelt de WKK-installatie af. In het geval van warmtevraag wordt er in dezelfde volgorde gewerkt: de buffer wordt ontladen, de warmte uit de WKK-installatie wordt gebruikt (wanneer er ook een vraag naar elektriciteit is) en de HR-ketel schakelt bij als de verwarmingscapaciteit van de buffer of van de WKK-installatie te klein is of wanneer er geen elektriciteit nodig is. De besturing vindt voornamelijk plaats door het in- en uitschakelen van de pompen.

Indirecte inpassing van een WKK-installatie met warmtebuffer en een normale CV-ketel

In deze opstelling (figuur 5) vult de WKK-installatie de warmtebuffer continue zolang er elektriciteit gevraagd wordt en de buffer nog ruimte voor warmteopslag over heeft. Is er warmte nodig dan wordt automatisch de buffer aangesproken. De verwarmingsketel komt alleen in bedrijf als de vereiste aanvoertemperatuur niet meer door de buffer gehandhaafd kan worden. Voordelen van deze variant zijn een eenvoudige opzet, een simpele regeling en een hoge warmte dekking uit de WKK-installatie.

Indirecte inpassing van een WKK-installatie met warmtebuffer en een HR-ketel

In figuur 6 (blz. 136) wordt de HR-ketel parallel geschakeld om optimaal van de voordelen van HR gebruik te maken. De WKK-installatie staat zijn warmte via de buffer af op die momenten dat er 'klanten' voor de elektriciteit zijn.

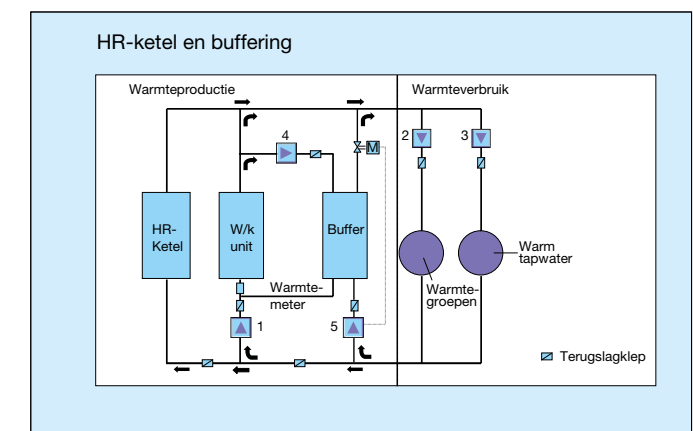
Praktijkvoorbeeld van de inbouw van een WKK-installatie in een bestaande verwarmingsinstallatie

Uitgangspunten:

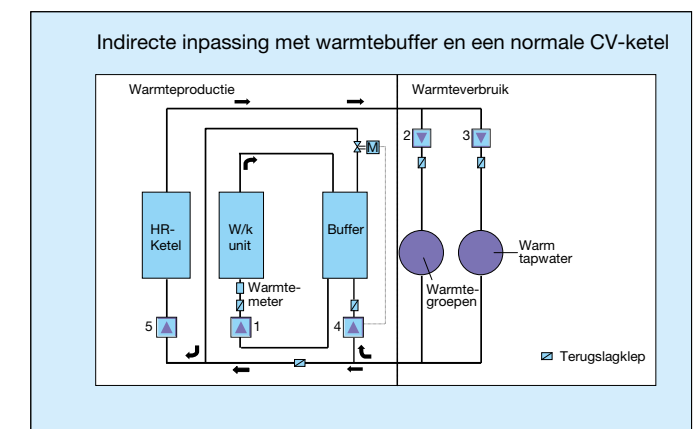
- In een bestaande verwarmingsinstallatie met twee verwarmingsketels moet een WKK-installatie worden geplaatst.
- De toegepaste temperaturen in de leidingen mogen niet veel worden veranderd en zullen voor het overgrote deel door de bestaande CV-ketels worden bepaald.
- De ingreep op de bestaande hydraulica en de zogenaamde regeling en besturing moet gering zijn.
- De WKK-installatie gaat de basiswarmtevraag leveren en zal afgestemd worden op de warmtevraag.

- De mogelijkheid bestaat om met de WKK-installatie de pieklast in de elektriciteitsvraag te dekken.

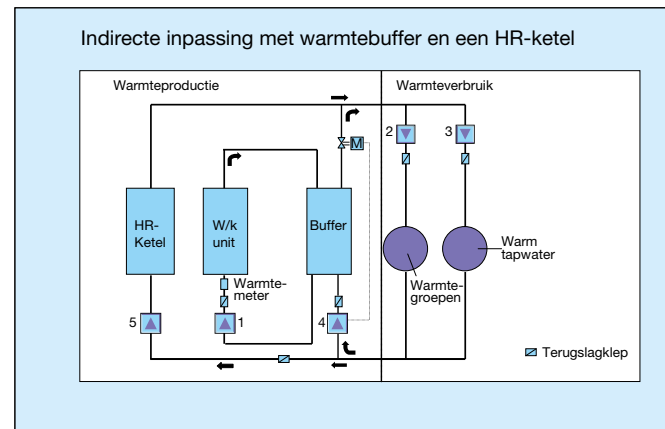
In het ketelhuis staan twee normale CV-ketels, twee warmtebuffers, één WKK-eenheid, twee warmteafnemers, een expansie-inrichting met automatische vulinrichting en appendages opgeateld. De WKK-installatie en de buffer vormen samen een interne circulatie-eenheid. De temperatuur van het retourwater bedraagt maximaal 70 °C. In figuur 7 is dit schematisch weergegeven.



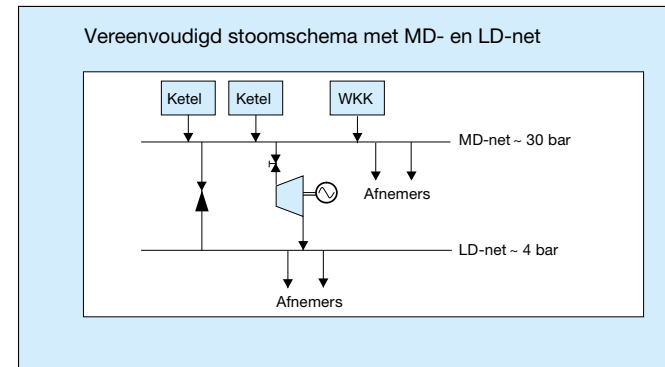
Figuur 4 WKK-installatie samen met een HR-ketel en buffering



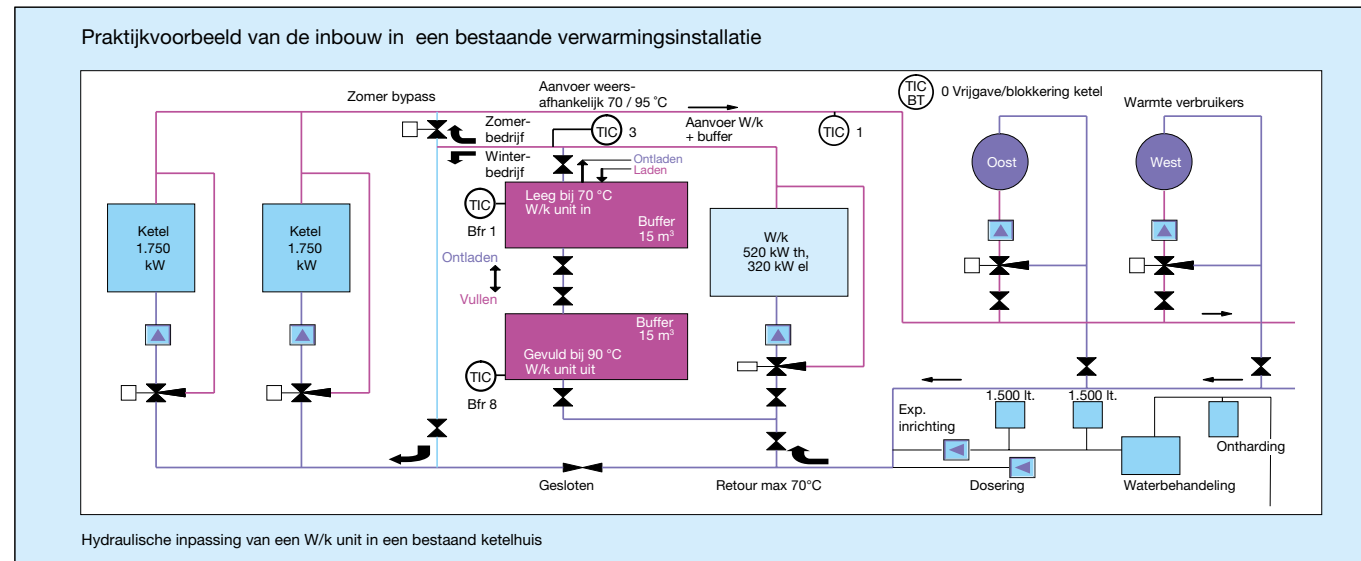
Figuur 5 Indirecte inpassing van een WKK-installatie met warmtebuffer en een normale CV-ketel



Figuur 6 Indirecte inpassing van een WKK-installatie met warmtebuffer en een HR-ketel



Figuur 8 Vereenvoudigd stoomschema met MD- en LD-net



Figuur 7 Praktijkvoorbeeld van de inbouw van een WKK-installatie in een bestaande verwarmingsinstallatie

Zomersituatie

In de zomersituatie is de warmtecapaciteit van de WKK-installatie voldoende om de vraag te dekken en zijn de ketels hydraulisch buitenspel gezet. De WKK-installatie draait een paar uur per dag tijdens de plateau-uren om de warmtebuffer gedeeltelijk te vullen. De buffer moet enige ruimte houden om de WKK-installatie ook tijdens pieken in de elektriciteitsvraag aan te kunnen spreken. De WKK-installatie is voorzien van een mengregeling waardoor de aanvoertemperatuur op het setpoint (volgens een stooklijn) kan worden geregeld.

Wintersituatie

In de winter verzorgt de WKK-installatie de voorverwarming van het CV-systeem en zorgen de ketels voor de naverwarming. Tijdens plateau-uren wordt de WKK-installatie rechtstreeks ingezet, tijdens de daluren indirect via de warmtebuffers.

Stoomzijdige inpassing van WKK

Het gebruik van WKK in een bestaand stoomnet is in zekere zin eenvoudiger dan een hydraulische inpassing. De WKK-installatie wordt namelijk altijd parallel op het gewenste drukniveau aangesloten waarop eventueel ook andere ketels aangesloten zijn. Wel zijn er diverse aspecten waarmee in het ontwerp en in de regeling rekening gehouden moet worden om ervoor te zorgen dat de installatie goed en veilig functioneert.

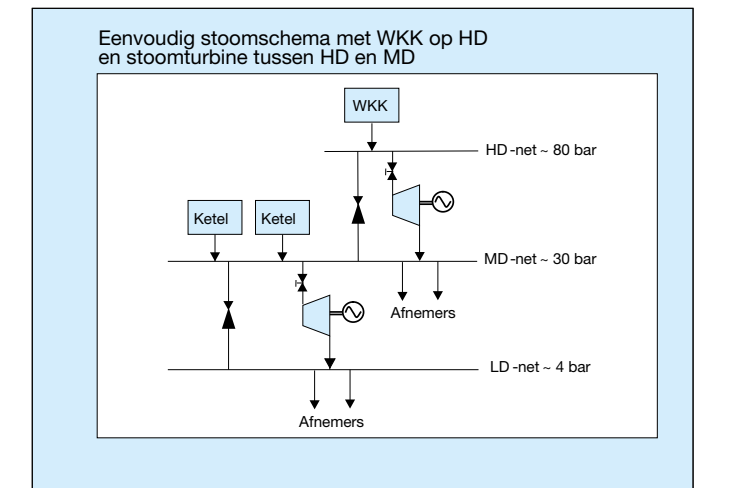
Veel grote industriële locaties hebben zowel een lagedrukstoomnet (LD-stoomnet) als een middendrukstoomnet (MD-stoomnet). Er bestaat geen harde definitie van deze stoomdrukken, maar lagedrukstoom heeft doorgaans een druk tussen 2 en 10 bar en middendrukstoom een druk tussen 10 tot 30 bar. Veelal wordt de stoom door ketels op middendruk geproduceerd, waarmee de benodigde LD-stoom dan via een stoomturbine vanuit MD-stoom gemaakt wordt. Deze stoomturbine genereert vervolgens elektriciteit, maar ook kan er een ketelvoedingswaterpomp mee worden aangedreven.

Om voldoende betrouwbaarheid c.q. redundantie in het systeem op te nemen, worden de ketels veelal tweevoudig met 100% of drievoudig met 50% van het vermogen uitgevoerd en wordt er naast een stoomturbine vaak een bypass-reduceer opgenomen. Het schema ziet er dan globaal uit zoals in figuur 8. Het ontwerp van een WKK-installatie kan uiteraard afgesteld worden op de

druk van het bestaande MD-stoomnet. De installatie wordt dan parallel aan de ketels geschakeld. In feite ontstaat er door het bijplaatsen van een gasturbine met afgassenketel, in combinatie met de bestaande stoomturbine, een geïntegreerde STEG-installatie op basis van een tegendrukturbine. Vanuit exergetisch c.q. energetisch oogpunt is het veelal beter om de stoomdruk van de WKK-installatie op een hogere druk uit te leggen (> 40 bar) en de stoom door een stoomturbine op de gewenste einddruk op MD- of LD-niveau te brengen. Het schema ziet er dan uit zoals in figuur 9. Deze inpassing is ook mogelijk met een condenserende stoomturbine, waarbij de aftapdruk afgesteld wordt op de druk van het MD- of LD-stoomnet. Het is bij de inpassing belangrijk om een check op de capaciteit van de diverse stoomnetten uit te voeren.

Als de WKK-installatie in een groei van de stoomvraag voorziet, moet het stoomnet qua leidingdiameters op deze toename zijn afgestemd. Indien de installatie bestaande ketels verdringt, is dit geen knelpunt. Ook is de overkoepelende regeling van de WKK-installatie en de ketels van belang. Meestal wordt de stoomproductie op basis van de stoomdruk met een cascaderegeling geregeld.

De WKK-installatie moet dan in de basislast voorzien en dus vooraan in de cascade staan. De stoomdruk van een 4 bar-net varieert bijvoorbeeld tussen 3,5 en 4,5 bar. De WKK-installatie levert



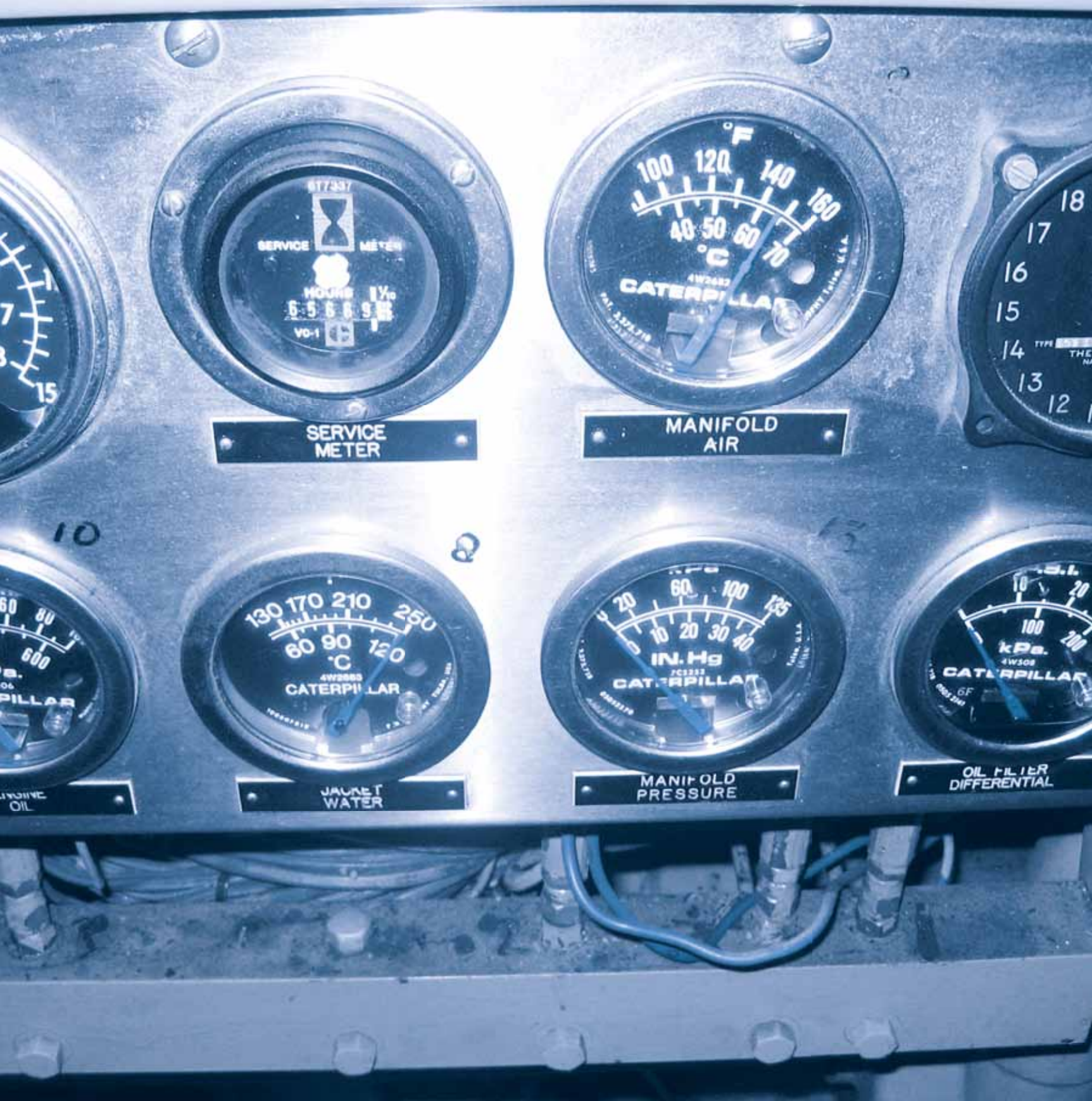
Figuur 9 Eenvoudig stoomschema met WKK op HD-net en stoomturbine tussen HD- en MD-net

de stoom als eerste. Neemt de stoomvraag toe en zakt de druk onder een bepaalde waarde, bijvoorbeeld 4,3 bar, dan wordt de eerste ketel ingeschakeld. Zakt de druk verder, bijvoorbeeld onder de 4,1 bar, dan komt de tweede ketel erbij, etc.

Een extra aandachtspunt is een belasting die onder de minimumlast van de WKK-installatie ligt. In dat geval zal een ketel de productie alsnog over moeten nemen. De praktijk leert echter dat de basislast in de industrie vrij hoog en constant is, zodat dit alleen gebeurt tijdens bijzondere situaties als een onderhoudsstop of een opstartcyclus. Ook aan de ketelvoedingswaterzijde moet het WKK-systeem ingepast worden. De stoom in de processen geeft warmte af en condenseert en komt geheel of gedeeltelijk als condensaat retour. Dit condensaat wordt vervolgens met vers (gedemineraliseerd) water aangevuld, geconditioneerd en naar de ontgasser gevoerd. In de ontgasser worden de opgeloste gassen – zoals het schadelijke zuurstof – verwijderd, waarna de ketels door middel van de ketelvoedingswaterpompen worden gevuld.

De inpassing van een nieuwe WKK-installatie is het makkelijkst als deze van een eigen ontgasser en van eigen ketelvoedingswaterpompen wordt voorzien. Als de WKK-installatie echter een bestaande ketel vervangt, volstaat meestal de capaciteit van de bestaande ontgasser. De ketelvoedingswaterpompen moeten dan door de afblaasveiligheden op de ketel bij de afblaasdruk (meestal 125% van de normale druk) op het maximale stoomdebiet zijn ingesteld. Deze ketelvoedingswaterpompen kunnen daarom zelden worden gedeeld. Als er sprake is van een uitbreiding, moet dus ook de capaciteit van de condensaatank, de condensaatpompen, de demin-waterinstallatie, de conditionering en de ontgasser voor de nieuwe WKK-installatie worden uitgebreid. ■





Bijlage 2

De groottebepaling van een WKK-installatie

Warmtekrachtinstallaties worden bij gebruikers qua grootte naar de werkelijke warmtebehoefte uitgelegd. Deze warmtebehoefte verschilt per gebruiker. Een fabriek waar staalconstructies worden gelast heeft een heel andere warmtebehoefte dan een kantoorgebouw. Er is een aantal criteria dat de grootte van een WKK-installatie bepaalt, waaronder de werkelijke warmtebehoefte.

De werkelijke warmtebehoefte

De werkelijke warmtebehoefte is per definitie die thermische capaciteit, uitgedrukt in kW-thermisch, die nodig is om een gebouw of proces bij ontwerpcondities op de gewenste temperatuur te houden. Dergelijke condities kunnen bij gebouwen bijvoorbeeld een buitentemperatuur van -10°C en 8 m/sec windsnelheid zijn. Bij een proces is dat vaak de gewenste temperatuur van het proces ten opzichte van zijn omgeving. Ook wordt de warmtebehoefte wel uitgedrukt in kWhth per jaar, dat wil zeggen het warmteverbruik per jaar.

De thermische capaciteit en/of het jaarlijks verbruik kunnen op twee verschillende manieren worden bepaald:

1. Bij bestaande gebouwen met behulp van historische jaarverbruiksgegevens.

2. Bij nieuwe gebouwen met behulp van de bepaling van het warmteverlies van de buitenschil van het gebouw. Dit warmteverlies moet vervolgens met de voor dit soort gebouwen geldende bedrijfstijd worden vermenigvuldigd.

1. Bestaande gebouwen

Bij bestaande gebouwen is het gasverbruik normaliter over een aantal jaren bekend. De gebruiker ziet deze informatie op zijn jaarlijkse afrekening van het energieverbruik. Vervolgens kan het gemiddelde jaarverbruik worden gehanteerd, gecorrigeerd voor het aantal graaddagen dat er ieder jaar geweest is. Graaddagen vormen een indicator die aangeeft hoe koud het geweest is en worden gemeten en opgegeven door het KNMI in De Bilt. Als de gemiddelde temperatuur van een dag 1°C lager dan 18°C is geweest, is er sprake van een graaddag. Hoe hoger het aantal

graaddagen hoe kouder het dat jaar dus geweest is. Ook is het belangrijk dat de gebruiker informatie over uitgevoerde energiebesparende maatregelen heeft. Hiermee kunnen afwijkingen in het jaarlijkse verbruikspatroon verklaard en gewaardeerd worden.

Stap 1

Voordat de grootte van de WKK-installatie bepaald wordt, moet eerst worden onderzocht welke haalbare energiebesparingsmaatregelen er nog genomen kunnen worden. Pas dan is er een goed beeld van het energieverbruik en van de rol die de WKK-installatie hierin kan spelen. Worden er pas energiebesparende maatregelen genomen nadat de WKK-installatie geplaatst is, dan is er een grote kans dat het aantal draaiuren van de installatie negatief wordt beïnvloed. Dit kan tot een slechtere bedrijfstijd (zie hieronder) leiden omdat de WKK-installatie dan te groot is gedimensioneerd.

Stap 2

Door het gemiddelde, op graaddagen gecorrigeerde, jaarverbruik in Nm³/jaar te delen door het opgestelde thermische vermogen, ontstaat een getal dat 'bedrijfstijd' heet. Voor het overgrote deel van de bestaande verwarmingsinstallaties is dat bedrijfstijdgetal vaak veel te klein. Om uiteenlopende redenen is er dan vaak veel te veel thermisch verwarmingsvermogen opgesteld (meestal is dit het ketelvermogen). Deze redenen kunnen een hoge bedrijfszekerheid of een korte aanwarmtijd van het proces of gebouw zijn of de wens om een reserve ingebouwd te hebben. In de praktijk is het thermisch opgestelde vermogen daarom vaak twee tot drie keer te groot.

Uit diverse metingen bij verbruikers en uit historische verbruiksgegevens is gebleken dat betrouwbare bedrijfstijdgetallen voor kantoorgebouwen, bedrijfsgebouwen, scholen en overheidsinstellingen, tussen de 1.000 en 1.250 uur liggen. Voor zwembaden, kerken, sportgebouwen en dergelijke ligt de bedrijfstijd lager, namelijk tussen de 400 en 800 uur. De toepassing van een WKK-installatie is mede daarom in deze categorieën, met uitzondering van binnenzwembaden, vaak geen haalbare kaart.

Stap 3

Door het jaarverbruik te delen door een betrouwbare bedrijfstijd, ontstaat er een thermisch vermogen dat richting geeft aan de ther-

mische capaciteit die er werkelijk nodig is om een proces of gebouw onder de eerder genoemde ontwerpcondities te verkrijgen.

Stap 4

De grootte van het thermisch vermogen van een WKK-installatie mag maximaal 20 tot 25% van dat thermische vermogen zijn. Deze laatste bewerking heeft te maken met het feit dat, wil er sprake zijn van een bedrijfszekere en rendabele toepassing, de WKK-installatie een groot deel van de jaarlijks benodigde warmte moet gaan leveren. Dit kan alleen worden bereikt als deze installatie langdurig in bedrijf is.

Een te grote WKK-installatie moet echter afhankelijk van de warmtevraagregeling vele keren stoppen en starten, waardoor de kans op storingen en verliezen in de warmteopwekking te groot is. Een te klein ontworpen WKK-installatie zal veel hinder in de bedrijfsvoering ondervinden, omdat de bestaande ketels met hun relatief grote verwarmingsvermogen te snel door de temperatuursregeling worden ingeschakeld (het gebouw moet immers binnen een bepaalde tijd zijn aangewarmd) en daardoor een groot deel van de draaiuren van de WKK in beslag nemen.

2. Nieuwbouw

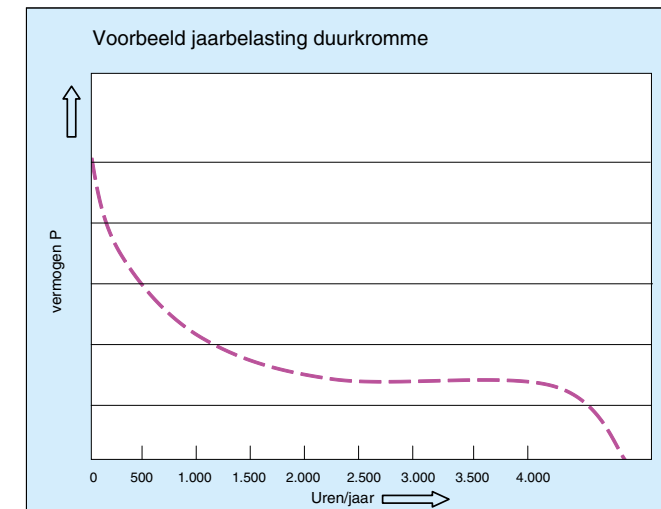
Bij nieuwbouw heeft een gebruiker niet de beschikking over jaarverbruiksgegevens. Het jaarverbruik moet hier bij benadering worden bepaald. Energieverbruiksbesparende maatregelen zijn reeds in de nieuwbouw opgenomen.

Stap 1

Het warmteverlies van een gebouw wordt bepaald door het warmteverlies van de buitenschil van een gebouw te nemen en hiervan de grootte te bepalen. Deze waarde kan verkregen worden uit de transmissieberekening die de technische installateur voor verwarming en ventilatie ter beschikking heeft.

Stap 2

Door de verkregen waarde te vermenigvuldigen met de te verwachten bedrijfstijd, voor kantoren bijvoorbeeld met 1.250 uur, ontstaat een te verwachten jaarverbruik. Komt dit jaarverbruik overeen met dat van vergelijkbare bestaande kantoorgebouwen, dan kan het schilverlies als uitgangspunt worden gebruikt. Wijkt het gevonden jaarverbruik te veel af, dan is het raadzaam om de



Figuur 1 Jaarbelasting duerkromme

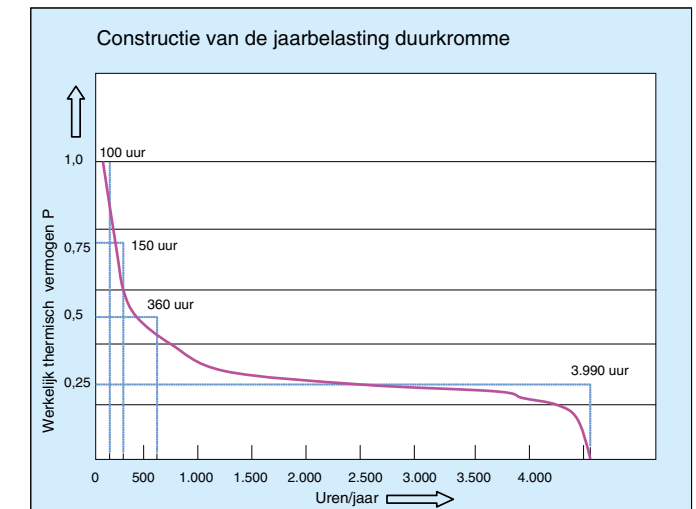
jaarverbruiken van de gebouwen waarmee het beoogde gebouw vergeleken kan worden, als uitgangspunt te nemen.

Andere criteria voor de grootte van een WKK-installatie

Voor de bepaling van de grootte van een WKK-installatie is de thermische groottebepaling het belangrijkste, want hiermee wordt ook het aantal draaiuren, het aantal WKK-eenheden en de inpassing in de centrale verwarmingsinstallatie bepaald, ongeacht de grootte van de WKK-installatie. De voornoemde bepaling geldt voor alle groottes. Een en ander wordt verduidelijkt aan de hand van de jaarbelasting duerkromme van het warmteverbruik bij een verbruiker. Een voorbeeld van een jaarbelasting duerkromme is gegeven in figuur 1.

De jaarbelasting duerkromme geeft het aantal uren weer waarin er een bepaalde warmtecapaciteit wordt gevraagd en kan aan de hand van een registratie van alle benodigde thermische capaciteiten per uur over een geheel jaar gemaakt worden.

Dit is een tijdrovende zaak. Vaak wordt hier de jaarbelasting duerkromme van een soortgelijk bestaand gebouw voor gebruikt, om daaruit de kromme voor de verbruiker met inachtneming van



Figuur 2 Constructie jaarbelasting duerkromme

het te verwachten jaarverbruik af te leiden. De kromme kan met behulp van de volgende verdeling gemaakt worden:

Maximaal benodigd thermisch vermogen = P	
100 uur vol vermogen per jaar	= 100P
150 uur 0,75 vermogen per jaar	= 113P
360 uur 0,5 vermogen per jaar	= 180P
3.990 uur 0,25 vermogen per jaar	= 998P

De getallen 100, 150, 360 en 3.990 zijn ervaringsgetallen die uit diverse metingen gedestilleerd zijn. In totaal wordt ervan uitgegaan dat de verwarmingsinstallatie 4.600 uur in bedrijf is. Het totale jaarverbruik voor de verwarming is hier 1.390P. P is dan gelijk aan het jaarverbruik (in kWh) gedeeld door 1.390.

Het vermogen P dat hier wordt bedoeld, is het werkelijk benodigde vermogen dat nodig is om aan de warmtebehoefte bij ontwerpcondities te kunnen voldoen (dus niet het opgestelde vermogen, dat in bijna alle gevallen veel te groot is).

Indien het vermogen P op de verticale as wordt uitgezet als hoogste punt van de kromme op tijdstip nul en de tijd op de horizontale as – hier 4.600 uur – ontstaat de jaarbelasting duerkromme door

een getrokken lijn door het midden van de bovenste horizontale lijn van het desbetreffende blok 100 * 1P, 150 * 0,75P, 360 * 0,5P, 3990 * 0,25P te tekenen.

In deze kromme kan dan de warmtecapaciteit van een of meer gekozen WKK-installaties worden geplaatst door op de verticale as het thermische vermogen van de gekozen installatie uit te zetten en vervolgens zover een horizontale lijn te trekken, dat deze de getrokken kromme snijdt. Met deze methode is duidelijk te zien dat hoe groter het thermisch vermogen van de WKK-installatie is, hoe minder het aantal vollast uren per jaar wordt.

Voor de technische – en ook financiële – haalbaarheid is het van belang dat de WKK-installatie zoveel mogelijk draaiuren maakt. In veel gevallen kan hierbij de toepassing van een warmtebuffer zinvol zijn. Door het plaatsen van een warmtebuffer gaat de WKK-installatie meer draaiuren maken en hoeven de bestaande verwarmingsketels minder vaak in bedrijf te komen, wat een gunstige uitwerking op de exploitatie van de WKK-installatie heeft.

In de bijlage 'Hydraulische inpassing van WKK-installaties in de verwarmingsinstallatie' (bijlage 1) is bij diverse voorbeelden in de schema's de plaats van de warmtebuffer weergegeven.

De inpassing van een WKK-installatie in een energiehuishouding op basis van de juiste uitgangssituatie (doorgaans de warmtehuishouding) is vanwege de optimale inzet en benutting van de vrijkomende warmte uit de installatie van groot belang. Wordt deze inpassing niet met grote zorg verricht, dan mislukt de toepassing van WKK.

Aandachtspunten hierbij zijn vooral de hoeveelheid circulerend verwarmingswater, de temperatuur van het verwarmingswater en de plaats van de hydraulische aansluiting op het verwarmingsstelsel. Om ervoor te zorgen dat de WKK-installatie bedrijfszeker haar warmte aan de verwarmingsinstallatie kan afgeven, dient de hydraulische aansluiting daar te worden gemaakt waar de watertemperatuur het laagst is. Dat is doorgaans in de retourleiding naar de verwarmingsketels of door middel van een aansluiting op de buffer.

Rekenvoorbeeld: Bepaling van de grootte van een WKK-installatie

Gasverbruik over de afgelopen vijf jaar: 248.000 Nm³/jaar gemiddeld en gecorrigeerd op graaddagen. Thermische capaciteit: in het ketelhuis staan 2 * 1.700 kWth gasgestookte ketels opgesteld. Deze ketels zijn ieder uitgevoerd met een hoog-laagregeling (100%, 50%). Het stookrendement van beide ketels bedraagt 0,85 (op bovenwaarde). 1 Nm³ aardgas van Groningen-kwaliteit heeft een calorische bovenwaarde van 35,17 kJ/Nm³.

Stap 1

- Bereken eerst de huidige bedrijfstijd van de bestaande verwarmingsinstallatie.
- De bedrijfstijd bedraagt hier:
 $248.000 / (2 * 1.700 / (0,85 * 35,17 / 3,6)) = 605$ uur.

Deze waarde is voor een vollast bedrijfstijd te laag en dus is het opgestelde thermisch vermogen te groot. De ervaring leert dat een vollast bedrijfstijd tussen de 1.000 en 1.250 uur een betere waarde is.

Stap 2

Er wordt hier voor een waarde van 1.175 uur gekozen. De benodigde ketelcapaciteit (K) zou dan $248.000 / (2 * K / (0,85 * 35,17 / 3,6)) = 1.175$ uur, op 876 kW thermisch per stuk uitkomen.

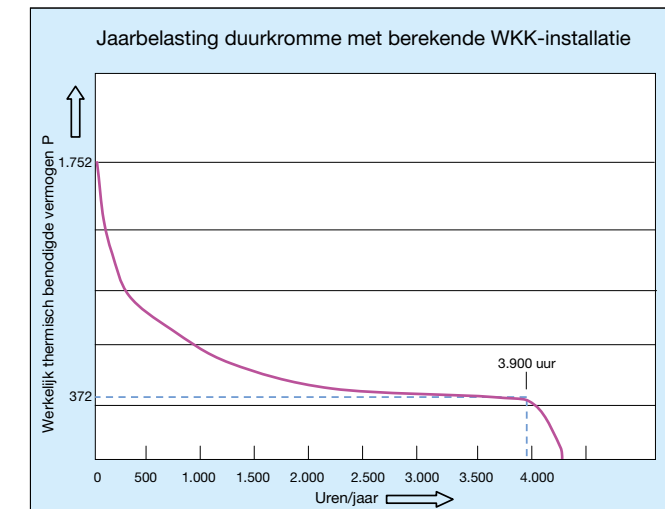
Stap 3

Een te kiezen WKK-installatie mag van dit overgebleven thermisch vermogen van 2 * 876 kWth, maximaal 20 tot 25% van deze capaciteit bedragen en dus mag het warmtevermogen tussen minimaal $0,20 * 2 * 876 = 350$ kWth warmtekrachtvermogen en maximaal 438 kWth vermogen liggen. Dit komt weer overeen met een keuze voor een WKK-installatie die tussen 237 kWe en 337 kWe ligt.

Stap 4

Uit een lijst van beschikbare WKK-installaties wordt bijvoorbeeld een MAN E 2842 E312 eenheid geselecteerd, die 237 kWe en 372 kWth produceert. Het totaalrendement, elektra plus warmte, bedraagt 80% (op bovenwaarde).

De geconstrueerde jaarbelasting duerkromme, waarvan nu het maximumvermogen P bekend is, 1.752 kWth, toont het volgende beeld (figuur 3).



Figuur 3 Jaarbelasting duerkromme met berekende WKK-installatie

Uit de kromme kan nu het aantal verwachte draaiuren worden afgelezen; dit bedraagt 3.900 uur, wat een acceptabele waarde is aangezien er meestal rond de 4.000 vollast uren een rendabele toepassing bereikt kan worden. ■

Bijlage 3

WKK en belangenbehartiging

De belangenbehartiging voor WKK ligt in Nederland in handen van de Vereniging Cogen Nederland. Cogen Nederland vertegenwoordigt leveranciers van WKK-installaties en WKK-exploitanten. WKK genereert in Nederland ongeveer 50% van de opgewekte elektriciteit.

Als representatieve organisatie richt Cogen Nederland zich op een aantal belangrijke onderwerpen, waaronder marktomstandigheden, marktstructuren, regelgeving en subsidieregelingen voor WKK in Nederland. Het WKK-Platform dat Cogen Nederland voorzigt, is het orgaan dat overleg voert met overheden zoals het Ministerie van Economische Zaken, het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu en het Ministerie van Financiën. Ook wordt er veel met adviesorganisaties als de SER, AER en met partijen als TenneT en DTe overlegd.

Op Europees niveau worden WKK-exploitanten door Cogen Europe vertegenwoordigd. Cogen Europe richt zich volledig op de regelgeving van de Europese Commissie in Brussel. Cogen Nederland is ontstaan uit het Projectbureau Warmtekrachtkoppeling (PW/K) dat in de jaren negentig veel aan promotie en sti-

mulering voor WKK gedaan heeft. In 1998, toen de liberalisering van de energiemarkten op handen was, werd PW/K gesplitst in Cogen Nederland (voor de belangenbehartiging) en in Cogen Projects b.v., een onafhankelijk adviesbureau waarin de medewerkers die allerlei adviesdiensten verrichtten, werden ondergebracht. Stijn Schlatmann is de huidige directeur van Cogen Projects. Cogen Projects is nog steeds actief met het geven van advies op het gebied van energiebesparing en decentrale energieopwekking. ■

Literatuurlijst

Bloemen, H., *Federatie Aandrijven & Automatiseren*, Zoetermeer: PDM, 2008.

Stijn Schlatmann, *Nieuwe ontwikkelingen voor WKK-systemen in de glas-tuinbouw*, Driebergen: Cogen Projects, 2003.

Jan Grift, *TVVL cursus*, Driebergen: Cogen Projects, 2007.

M. van Gastel, PeterSteenbergen. R.J. van Hasselt, *Co-generation in the Netherlands DTE*, Driebergen: Cogen Projects, 2001.

Duinkerken, N.D., *Het Ketelhuis: productie en gebruik van stoom in de praktijk*. Dieren: Adviesbureau SAM BV, 2006.

A. J. Appleby, F. R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook. Seventh Edition*, Morgantown, West Virginia, VS: EG&G Technical Services Inc., 2004.

William E. Liss, *Natural Gas Power Systems*, Liss: GRI, 1999.

Noort, J., *Duurzame samenwerking door betere contractvorming*, Driebergen: Cogen Projects, 2007.

Register

Aardgasreserves 8, 13

Absorptiekoelmachine 23, 44, 45, 120, 121, 123 - 25

Afblaasveiligheden 138

AFC 43, 44

Afgassenketel 12, 34 - 40, 48, 71 - 75, 81, 109 - 111, 115 - 117, 123 - 125, 137

Afloopfase 92, 94, 95

APX 19, 68 - 70, 94, 130

Base load 36

Bedrijfstijd 22, 30, 47, 50, 64, 74, 141, 142, 144

BEES 79, 80, 81, 83

Beheerfase 93 - 95

Beheervormen 90

Belangenbehartiging 147

Belastingduurcurve 46, 47, 92

Besluit Voorzieningen en Installaties 78, 80

Bevoegd gezag 79, 80, 81, 88

Biogas 13, 20, 99, 102

Biomassa 16, 81

Black start 55

Brandstof 11 - 16, 18, 29, 30, 36, 37, 65, 79, 80, 83, 84, 87, 99 - 102

Brandstofcel 13, 16, 42, 43, 97, 100, 101

Brandstofmix 16

By-pass 40, 41

Carnot 15, 42

Centrales 12, 20, 23, 64, 107

CO₂ 11 - 24, 29, 46, 49 - 51, 54, 62, 78, 82 - 85, 96, 99, 105 - 107, 122, 129, 130

Codinox 130, 131

Cogen 7, 9, 106, 147, 148

Cogen Nederland 7, 106, 147

Cogen Projects 9, 147, 148

Commodityprijs 60

Condensaattank 138

Contractfase 93, 95

Contractvormen 90, 91

Conversietechnieken 29, 30

Cross-border 86

CV-ketel 96, 101, 105, 113, 127, 128, 133 - 135

CV-systemen 12

Deellast 37 - 39, 50, 59, 73

Demin-waterinstallatie 138

DTe 63, 64, 66, 67, 147

Due diligence 84

Duurkromme 143 - 145

Economische analyse 28, 54, 56

EIA 72, 74

Elektriciteitscentrale 12 - 17, 20, 24, 84, 101, 104, 105, 131

Elektriciteitsprijs 19, 62, 71, 129
 Emissieautoriteit 82
 Emissiereductie 11, 13, 24, 96, 107
 Energiebelasting 62 - 64, 68, 74, 75
 Energiecontracten 68
 Energieverbruiksprofiel 29, 46
 EOS 72
 Exploitatieberekening 54, 56 - 58
 Fiscale voordelen 72
 Forward-prijzen 62, 63
 Fossiele brandstof 6, 8, 11, 13, 16, 24
 GasTerra 152
 Gasvoorraad 152
 Gaswarmtepomp 9
 Gebouwde omgeving 12, 18, 20, 21, 27, 53, 99, 106, 107
 Gebruiksaspecten 29, 53, 109
 Geluidsdempers 128
 Geluidseisen 76, 78, 80, 81
 Glastuinbouw 21 - 23, 27, 46, 51, 54, 78, 85, 99, 109
 Graaddagen 141, 142, 144
 Groenfinanciering 72, 73
 Groen gas 99, 107, 126
 Groningenveld 8
 Groottebepaling 141, 143
 Haalbaarheid 44, 47, 48, 56, 57, 58, 79, 109, 144
 Haalbaarheidsberekeningen 73
 Hogetemperatuurwarmte 15, 16
 Hoogwaardige warmte 101
 HR-ketel 12, 50, 96 - 99, 105, 107, 118, 119, 133 - 136
 HRe-ketel 13, 106, 107, 109, 118, 119
 Hybride systeem 44, 45
 Hydraulisch 29, 50, 52, 113, 126, 127, 133, 137, 144
 Indirecte inpassing 135, 136
 Industrie 12, 19 - 23, 27, 34 - 38, 40, 46, 54, 68, 83, 101, 109, 115, 138
 Inlaattemperatuur 34, 38, 39
 IPPC 79
 IRR-methode 73
 Joint ventures 20, 65, 85
 Kernenergie 12
 Ketelvoedingswaterpompen 35, 137, 138
 Koelen 34, 42, 114
 Koeling 13, 30, 33, 34, 44, 46, 110, 111, 120, 121, 127

Koelwater 16, 33, 34, 44
 Kolen 6, 8, 11, 12, 15, 18, 21, 64
 Kortetermijnmarkt 68
 Koudluchtbedrijf 41
 KPI's 91
 Lagedrukstoom 20, 31, 34, 137
 Langetermijnmarkt 68
 LD-stoomnet 137
 Leasing 85
 Legionellabacteriën 127
 Leveringszekerheid 128
 LNG 49
 Luchtovermaat 34, 37
 LUVVO 35
 MCFC 43 - 45
 MD-stoomnet 137
 Mechanical complete 86, 87
 MEP 74, 75
 MER 77 - 79, 88
 Micro-WKK 12, 13, 21 - 23, 27, 28, 30, 96 - 107, 109, 118, 119
 Middendrukstoom 137
 Milieu-effecten 24
 Monitoringsysteem 91, 127
 MV-partij 70
 Nationaal Allocatieplan 82
 NCW-methode 73
 NEa 82
 Netwerktarieven 56, 63, 64, 67
 NIBM 81
 Nieuwbouw 13, 19, 23, 79, 82, 103, 142
 Noodkoeler 49, 127
 Noodstroom 34, 52, 55, 109, 121
 Noodstroombedrijf 30, 54
 NO_x 11, 15, 18, 19, 24, 31, 38, 50, 80, 81, 83, 84, 115, 130
 Omzetter 29
 Onbalansmarkt 68, 130
 Onderhoudsbehoefte 89, 96, 103, 114
 Onderhoudsintervallen 65, 89, 90
 ORC 40 - 43, 93, 98, 101, 102
 Outsourcing 65, 91, 92, 95
 PAFC 43, 44, 100
 Parallele inpassing 51

PEFC 43, 44
 Piekvraag 29, 47, 118, 121, 125, 127
 Planning 28, 54, 86, 93
 Platform Nieuw Gas 106
 Prime mover 65
 PV 19, 70, 71
 Realisatiefase 93
 Recupererende 39
 Referentiesituatie 19, 56 - 58, 72
 Regelgeving 28, 67, 78, 80, 81, 85, 147
 Regelstrategie 50, 51, 103
 Rekenvoorbeeld 59, 70, 74, 75, 144
 Rentabiliteit 21, 28, 47, 54, 56 - 59, 73, 84, 85, 116
 Rookgascondensor 34, 35, 53, 111
 Rookgassen 18, 30, 31, 34 - 40, 42, 49, 50, 53, 101, 111, 113, 123, 130
 Ruimteverwarming 16, 46, 96, 101, 103, 104, 107, 118, 120
 Selectiefase 92, 93
 Seriele inpassing 50, 52
 Slochteren 11
 Smart Power Foundation 23, 105, 106
 SO₂ 11
 SOFC 30, 43 - 45, 100
 Sparksread 19, 21, 71, 72, 85, 116
 SPF 106
 SPOT 59, 73
 Stadsverwarming 18, 20 - 23, 35, 40, 126
 STEG 12, 13, 20, 30, 38 - 41, 58, 65, 73, 74, 101, 107, 109, 137
 Stichting Energie Prestatiekeur 107
 Stichting Slim met Gas 106, 118
 Stirlingmotor 13, 30, 98, 99, 109, 118, 119
 Stirling-technologie 23, 97
 Stookolie 18
 Stoomzijdig 133, 137
 Subsidie 28, 49, 58, 59, 72, 73, 84, 86, 112
 Systeemdiententarium 63
 Tafelkoeler 33, 34, 42
 Tegendrukstoomturbine 35
 TenneT 20, 63, 68, 71, 147
 Thermisch 30 - 32, 34, 38, 40, 47, 64, 71, 74, 75, 80, 83, 84, 90, 97,
 112, 114, 115, 119, 120, 122, 126, 128, 129, 131, 134, 141 - 144
 Toezichthouder 64, 66
 Transitie 6, 9

Trias energetica 16, 17
 Trigeneration 30, 44
 Tubular stack 43
 Turnkey 66
 Tweedruksketel 40, 41
 UPS 55
 Utiliteitsbouw 21, 22
 Vergassing 13
 Vergisting 13
 Vergunningen 28, 66, 78, 79, 86
 virtuele centrale 105
 Virtuele centrale 104, 105
 Volland 50, 59, 87, 113, 124, 134, 144, 145
 Voorverwarming 38, 111, 133, 134, 137
 Voorzieningszekerheid 91
 Warmtebehoefte 30, 46, 47, 70, 98, 123, 129, 141, 143
 Warmtebuffer 33, 47, 48, 50, 74, 104, 127, 129, 131, 134 - 137, 144
 Warmtelozing 19
 Warmtepiekvraag 47
 Warmtepomp 13, 16, 48, 110
 Warmteverliezen 48, 127
 Werkgroep Decentrale Gastoeepassingen 106
 Werkprogramma Schoon en Zuinig 23, 24
 Wet luchtkwaliteit 81
 Windenergie 13, 104
 Wintersituatie 137
 WKK-ontwerp 44
 WKK-potentieel 21 - 23
 Zomersituatie 137
 Zonne-energie 13, 107

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

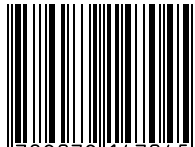
De wereld van aardgas is een initiatief van GasTerra, Nederlands grootste handelsbedrijf in aardgas en derde grootste leverancier in de Europese Unie. Onder deze aanduiding verschijnt een serie boeken over de betekenis, de toepassingen en de toekomst van aardgas. Gasterra wil hiermee - in deze tijd van complexe discussies over het klimaat, CO₂-effecten, energiegebruik, energievoorraden en technische mogelijkheden - eenieder die werkzaam is in de energiesector of die erin geïnteresseerd is op de hoogte houden van de feiten over en de stand van zaken van aardgas.

Warmte en Kracht

Warmte en kracht is de tweede uitgave in de reeks De wereld van aardgas, na de verschijning van Aardgas als transitiebrandstof. In dit boek worden het proces van warmtekrachtkoppeling, de techniek, de apparatuur en de economische factoren breeduit behandeld. De toepassing van warmtekrachtkoppeling past in deze tijd, waarin de doelmatige en doelgerichte inzet van energie om een veelheid van redenen gewenst is. Vervolgguitgaven staan op stapel, waaronder een boek over de geschiedenis en toekomst van aardgas in Nederland.

Kennis is vermogen. Een vermogen dat GasTerra graag wil delen.

ISBN 978-90-79147-04-5



9 789079 147045 >