

TNO-rapport
TNO-MEP – R 95/393

Analyse energiestudies

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie

Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Telefoon 055 - 549 34 93
Fax 055 - 541 98 37

auteur:
P.J. Collet

datum:
15 januari 1996

opdrachtnummer:
26596

opdrachtgever:
EnergieNed
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van de opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

trefwoorden:
energiebesparing
evaluatiemethodiek
kosten
milieueffect
stadsverwarming
warmte/krachtkoppeling
warmtepompen

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie stelt zich ten
doel een veilige en duurzame industriële productie en
een verantwoord energiegebruik te bevorderen door
het uitvoeren van contract research op de gebieden
milieu-, energie- en procestechnologie.

Nederlandse organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek.

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, zoals
gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage

Samenvatting

Er zijn recentelijk diverse studies uitgevoerd die tot doel hadden inzicht te geven in de energieconversie-technieken die voor de toekomst als (meest) perspectiefvol zijn aan te merken. Dit inzicht zou met name dienen ter ondersteuning van het beleid op het gebied van energie-onderzoek en ontwikkeling.

Het blijkt moeilijk te zijn om aan deze doelstelling te voldoen. Dit is vooral te wijten aan de vele invloedsfactoren die bij het maken van een keuze een rol spelen. Deze veelheid hangt samen met de verscheidenheid in warmte-afnemers, de diversiteit in (totale) energieconversieketens, de spreiding in mogelijke bedrijfs- en kostengegevens en de verschillende randvoorwaarden en vergelijkingsparameters die kunnen worden gehanteerd bij het maken van een keuze.

In dit rapport zijn een aantal energiestudies geanalyseerd met het doel deze problematiek nader te illustreren. Dit geschiedt aan de hand van het leveren van commentaar op de volgende voorbeelden van specifieke keuzestellingen:

- de methode van toerekening van primair energieverbruik, emissies en kosten aan elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling;
- het energetisch en economisch optimale temperatuursregime voor stadsverwarming;
- de elektrische warmtepompboiler in vergelijking met de HR-ketel;
- stadsverwarming in vergelijking met een elektrische warmtepompboiler in iedere woning.

In ieder van deze gevallen blijkt dat een (drastische) verandering in het vergelijkingsbeeld ontstaat door wijziging van wat vooraf als representatief of optimaal was beschouwd. Dit onderstreept de behoefte aan een evaluatiemethodiek waarmee rekening kan worden gehouden met dit inherent aanwezige probleem en dat toch de mogelijkheid biedt voor het maken van eenduidige keuzen tussen specifieke uitvoeringen van verschillende energieconversie-technieken.

Inhoud

	blz.
1 Inleiding	4
2 Nadere beschouwing van de evaluatieproblematiek	5
3 Opzet van de analyse	9
4 Toerekening van kosten, primair energieverbruik en emissies aan elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling	11
5 Stadsverwarming met lage-temperatuur ruimteverwarmingsystemen in woningen	16
6 Elektrische warmtepompboiler in vergelijking met HR-ketel	19
7 Stadsverwarming in vergelijking met elektrische warmtepompen bij eindverbruikers	23
8 Conclusies en aanbevelingen	29
9 Literatuur	31
Verantwoording	32
Bijlage Vergelijkingen tussen energetische en exergetische allocatie van brandstofverbruik aan elektriciteits- en warmte-opwekking bij warmte/kracht koppeling	

1 Inleiding

Er zijn recentelijk diverse studies uitgevoerd die tot doel hadden inzicht te geven in de energieconversie-technieken die voor de toekomst als (meest) perspectiefvol zijn aan te merken. Dit inzicht zou met name dienen ter ondersteuning van het beleid op het gebied van energie-onderzoek en ontwikkeling.

Het blijkt moeilijk te zijn om aan deze doelstelling te voldoen. Dit is vooral te wijten aan de vele invloedsfactoren die bij het maken van een keuze een rol spelen. Deze veelheid heeft met name de volgende oorzaken.

- De verscheidenheid in energie-afnemers; bij warmtevoorziening in de gebouwde omgeving wordt dit bijvoorbeeld bepaald door de variatie in typen woningen en gebouwen en de karakteristieken van het bebouwingsgebied.
- Een zeer grote verscheidenheid in mogelijke uitvoeringen van de totale energie-conversieketen, mede bepaald door de variëteit in energie-conversieprocessen en soort energie-distributiemedium (met name elektriciteit, gas of warmte).
- De spreiding in mogelijke behoefte-, bedrijfs- en kostenkarakteristieken; zowel in onderlinge relatie als in relatie tot toekomstige techniekontwikkelingen en verwachte marktpotentieel.
- Verschillende randvoorwaarden en diverse vergelijkingsparameters voor het beoordelen van de economische, energetische en milieutechnische mérites in een onderlinge relatie; van belang is bijvoorbeeld of de vergelijking wordt gebaseerd op macro-economische of bedrijfs-economische randvoorwaarden.

Een geaccepteerd uitgangsbeginsel voor het beoordelen van perspectiefvolle technieken is dat hiermee (primaire) energiebesparingen en milieuverbeteringen zijn te realiseren. De kosten in relatie tot het besparings/verbeteringspotentieel bepalen het relatieve belang (de "ranking") van de beschouwde opties. Met name dit laatste blijkt als gevolg van het grote aantal variabelen (en de hierover bestaande onzekerheden) een groot probleem te vormen.

Dit rapport betreft de resultaten van een analyse van enkele recente energiestudies. Doelstelling is om door toetsing en onderlinge vergelijking van evaluatiegegevens en vergelijkingsmethoden (en het aangeven van de hierbij optredende inconsistenties) de bovenstaande problematiek zichtbaar te maken. Dit heeft tevens het oogmerk een bijdrage te leveren tot het ontwikkelen van een verbeterde structuur waarbinnen energiestudies in het algemeen en het selekteren van perspectiefvolle energieconversie-technologieën in het bijzonder zou kunnen plaatsvinden. Benadrukt wordt dat deze analyse zeker niet uitputtend is. Niet alle relevante studies zijn in beschouwing genomen en ook het hierop geleverde commentaar is beperkt tot enkele specifieke aspecten van de energiestudies.

2 Nadere beschouwing van de evaluatieproblematiek

Voorafgaand aan een becommentariering van specifieke aspecten van de betreffende energiestudies wordt in dit hoofdstuk meer in het algemeen ingegaan op de oorzaken van de evaluatieproblematiek.

Zoals eerder gesteld betreft dit vooral de veelheid van invloedsfactoren. Onderstaand overzicht is beperkt tot factoren die een rol spelen bij de beoordeling van technieken voor warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

- **Verscheidenheid in warmte-gebruikers**

Een hoofdonderscheid valt te maken tussen nieuwbouw, renovatie en bestaande bouw (de laatste als functie van bouwjaar).

Woningen zijn behalve in een- en meergezinswoningen verder te onderscheiden naar woningtype (bijvoorbeeld rijtjes- of vrijstaande woningen), het warmtebesparingsniveau (isolatiegraad, warmteterugwinning uit ventilatielucht) en de warmteoverdrachtsapparatuur binnen de woning (radiatoren-, vloer- of luchtverwarming).

Utiliteitsgebouwen zijn behalve naar de gebruiksfunctie (kantoren, ziekenhuizen, bejaardenoorden, winkels, etc.) en gebouw-grootte (met name het vloeroppervlak) eveneens te onderscheiden naar warmtebesparingsniveau en klimatiseringsbehoefte (met name de relatie met een eventuele koelbehoefte).

De glastuinbouwsector vertegenwoordigt een aparte categorie van eindverbruikers met een ruimteverwarmingsbehoefte.

Naast bovenstaand onderscheid in individuele typen eindverbruikers valt een verdere differentiatie te maken naar de karakteristieken van het bebouwingsgebied. Dit betreft met name de bebouwingsdichtheid en de verhoudingspercentages van de verschillende typen woningen en gebouwen.

- **Diversiteit in energieketens**

Deze diversiteit wordt in dit verband aangegeven door primair uit te gaan van een onderscheid in energiedragers die voor verwarmingsdoeleinden worden gedistribueerd naar woningen en gebouwen. Dit betreft met name aardgas, elektriciteit en warmte.

In het geval van aardgas als (primaire) energiedrager vindt warmte-opwekking plaats bij de eindverbruiker. Naast gasgestookte ketels betreft dit kleinschalige warmtepompen en (micro-)warmte/kracht installaties. Warmtepompen zijn te onderscheiden in gasgestookte absorptiewarmtepompen en via een kracht-opwekkingsproces (gasmotor, brandstofcel, stirlingmotor) aangedreven compressie-warmtepompen. Als lokale warmtebron fungeren ventilatielucht, bodemwarmte of grondwater en als centrale (gedistribueerde) warmtebron (ook) oppervlaktewater of afvalwarmte van diverse herkomst. Warmte/kracht installaties zijn naar krachtopwekkingsproces te onderscheiden in eerdergenoemde typen en thermionische of fotonvoltaïsche verwarmingsketels. Ook in het geval van elektriciteit als (secundaire) energiedrager vindt warmte-opwekking plaats bij de eindverbruiker. Naast elektrische weerstandsverwarming betreft dit met name de elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp. Varianten in energieketens worden behalve door de eerdergenoemde verschillen in typen (compressie)warmtepomp ook bepaald door verschillende mogelijkheden voor zowel centrale als decentrale elektriciteitsopwekking.

In het geval van warmte als (secundaire) energiedrager vindt warmteproductie plaats op centraal niveau. Bij grootschalige stadsverwarming kan dit afkomstig zijn van een elektriciteitscentrale in warmte/kracht bedrijf of afvalwarmte zijn van vuilverbranding of een industrieel proces. Bij kleinschaliger warmtedistributie (afnemend tot wijk- of blokverwarming) betreft dit warmte/kracht- of warmtepomp-installaties die in sterkere mate zijn afgestemd op warmteproductie. Naast de eerdergenoemde typen voor kleinere vermogens betreft dit met name de STEG-warmte/krachtinstallatie voor vermogens van meerdere tientallen megawatts.

De diversiteit in energieketens wordt nog aanzienlijk groter wanneer bovendien rekening wordt gehouden met de inzet van duurzame energiebronnen (zonne-energie, windenergie, aardwarmte), korte- en langetermijn thermische opslag en mogelijkheden voor combinaties van processen (bijvoorbeeld warmte/kracht koppeling in combinatie met warmtepompen). Tenslotte zijn de energieketens nog te differentiëren naar de aard van de woningapparatuur (bijvoorbeeld radiatoren- of vloerverwarming).

Volledigheidshalve wordt nog opgemerkt dat het bovenstaande overzicht niet uitputtend is. Voor een meer uitgebreid overzicht wordt verwezen naar onder andere [van Wees *et al*, 1994, hoofdstuk. 3].

- Spreiding in (mogelijke) behoefte-, bedrijfs- en kostengegevens

Dit betreft gegevens die karakteriserend zijn voor de onderscheiden warmtegebruikers en ieder van de onderdelen van de diverse energieketens.

Tot op zekere hoogte zal altijd sprake zijn van een spreiding in de gegevenswaarden die als representatief zijn te beschouwen. Om diverse redenen kan de mate van deze spreiding echter sterk verschillen.

Dit is vooral afhankelijk van de marktrijpheid van de beschouwde technieken. Dit varieert van een zeer algemene toepassing in de praktijk (gasgestookte ketels, aardgas- en elektriciteits-distributie) tot technieken die in feite nog in een vroege onderzoek- of ontwikkelingsfase verkeren. Hier tussen bevinden zich de technieken waarvan de technische haalbaarheid is aangetoond maar waarvoor nog vergaande kostenverminderingen dienen te worden aangetoond.

Het potentieel voor kostenredukties wordt vooral bij nog niet marktrijpe technieken gebaseerd op een marktverwachting die in feite sterk afhankelijk is van een nog te bewijzen succes ten opzichte van concurrerende opties. Mede als gevolg van subjectieve interpretaties ontstaat een grote spreiding in de gegevenswaarden die als representatief zijn te beschouwen.

Echter ook bij technieken die al in de praktijk zijn toegepast bestaat onzekerheid over niet te voorziene ontwikkelingen die in toekomst zouden kunnen plaatsvinden.

- Verschillende randvoorwaarden en vergelijkingsparameters

Het verschil tussen macro-economische en bedrijfs-economische randvoorwaarden komt met name tot uiting in de energietarieven waarmee wordt gerekend. Op basis van macro-economische randvoorwaarden wordt het verschil tussen groot- en klein-verbruikerstarieven bepaald door werkelijk te maken extra kosten (onder andere de additionele distributiekosten). Bij bedrijfseconomische randvoorwaarden wordt gerekend met bestaande tariefstructuren die niet hetzelfde verschil hoeven te vertonen.

Deze veelheid van invloedsfactoren maakt het moeilijk om in meer specifieke zin de meest perspectiefvolle technieken te onderscheiden.

In studies die zijn uitgevoerd in het kader van het SYRENE-programma is dit vooral een gevolg van het grote aantal berekeningsgevallen. Hierbij is onderscheid gemaakt in een achttal representatieve warmte-afnamegebieden met hoge en lage warmtebehoefte voor de jaren 1993, 2010 en 2030. De energieketens zijn onderscheiden naar gas, elektriciteit en warmte als energiedragers met verschillende hierop afgestemde energieconversieprocessen. Het resultaat is een groot aantal vergelijkingsuitkomsten die moeilijk in een totaal verband zijn te overzien. Mede daarom hebben de conclusies een vrij algemeen karakter, zoals de constatering dat zowel warmte als elektriciteit als secundaire energiedragers voor de toekomstige

warmtevoorziening van belang zijn. Het maken van een selectie tussen meer specifieke opties blijft in feite achterwege.

De KEMA-studies hebben in dit opzicht een meer recht toe recht aan karakter. Door minder uitvoeringsvarianten in beschouwing te nemen lijkt het maken van een selectie eenduidiger. Hier rijst echter de vraag of de gekozen uitvoeringsvarianten de meest optimale zijn.

Meer in het algemeen kan worden gesteld dat ondanks de veelheid van informatie die wordt gegenereerd, dit in feite nog verre van voldoende is. Door veranderingen in bijvoorbeeld randvoorwaarden, vergelijkingsparameters of (geprognostiseerde) kosten- en bedrijfsgegevens kan een essentieel ander beeld ontstaan. In [Collet, 1994] wordt dit geïllustreerd door het voorbeeld van een kostenvergelijking tussen stadsverwarming en HR-ketels. Op basis van bedrijfs-economische randvoorwaarden is er een kosten**voordeel** voor stadsverwarming. Op basis van macro-economische randvoorwaarden is er een bijna even groot kosten**nadeel**. Deze verschillen worden verder bepaald door een totaal aan kostenposten dat bijna 20 maal zo groot is als ieder van de kostenverschillen die het netto voor- of nadeel bepalen. Hierbij gaat het om kostenposten die niet voor beide opties identiek zijn en dus niet om deze reden tegen elkaar wegvallen. Dit betekent dat de vergelijkingsuitkomsten gevoelig zijn voor zelfs kleine veranderingen in gegevenswaarden, vooral indien de effecten elkaar cumulatief versterken.

3 Opzet van de analyse

Doelstelling van de analyse is de evaluatieproblematiek te illustreren door aan te geven hoe op basis van (soortgelijke) veranderingen van het vergelijkingsraamwerk en uitgangsggegevens de studieresultaten in een sterk verschillend daglicht komen te staan.

De analyse is beperkt tot slechts enkele studies die zijn aangegeven in de literatuurlijst. Hierbij gaat het met name om studies uit het eerder aangegeven SYRENE-programma en enkele KEMA-studies.

Ter bevordering van de inzichtelijkheid wordt het te geven commentaar gericht op specifieke evaluatie-aspekten. Ter beperking van de omvang van de analyse betreft dit slechts de volgende aspecten.

- **De wijze van toerekening van kosten, primair energieverbruik en emissies aan elektriciteitsopwekking bij warmte/kracht koppeling (hoofdstuk 4).**

Deze toerekeningswijze is van essentieel belang voor het vergelijken van warmte/kracht processen met processen die uitsluitend dienen voor warmte-opwekking.

- **Stadsverwarming met lage-temperatuur ruimteverwarmingssystemen in woningen (hoofdstuk 5).**

Een laag temperatuurniveau van de afgegeven warmte is van belang voor zowel de energetische en economische optimalisatie van stadsverwarming als voor de vergelijking met andere lage-temperatuur warmte-opwekkingsprocessen (met name warmtepompen).

- **Elektrische warmtepompboiler in vergelijking met HR-ketel (hoofdstuk 6).**

Dit betreft een specifieke uitvoering van een elektrische warmtepomp voor een (nieuwbouw) eengezinswoning. Toepassing hiervan zou vooral aantrekkelijk moeten zijn bij "electric only" energievoorziening van woningen met een zodanig lage warmtebehoefte dat de aanleg van een gasdistributienet niet meer economisch is.

- **Stadsverwarming in vergelijking met elektrische warmtepompboiler in woningen.**

Hierbij wordt uitgegaan van toepassing van stadsverwarming in bebouwingsgebieden met gunstige voorwaarden voor de aanleg van een warmtedistributienet (o.a. een hoge bebouwingsdichtheid) en toepassing van de elektrische warmtepompboiler wanneer dit niet het geval is.

Bij de behandeling van ieder van deze aspecten wordt de volgende presentatiewijze aangehouden.

- Een inleidende beschouwing die als referentie dient voor het te leveren commentaar.
- Algemeen commentaar betrokken op gemeenschappelijke aspecten van meerdere studies.
- Commentaar per studie.

4 Toerekening van kosten, primair energieverbruik en emissies aan elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling

Inleidende beschouwing

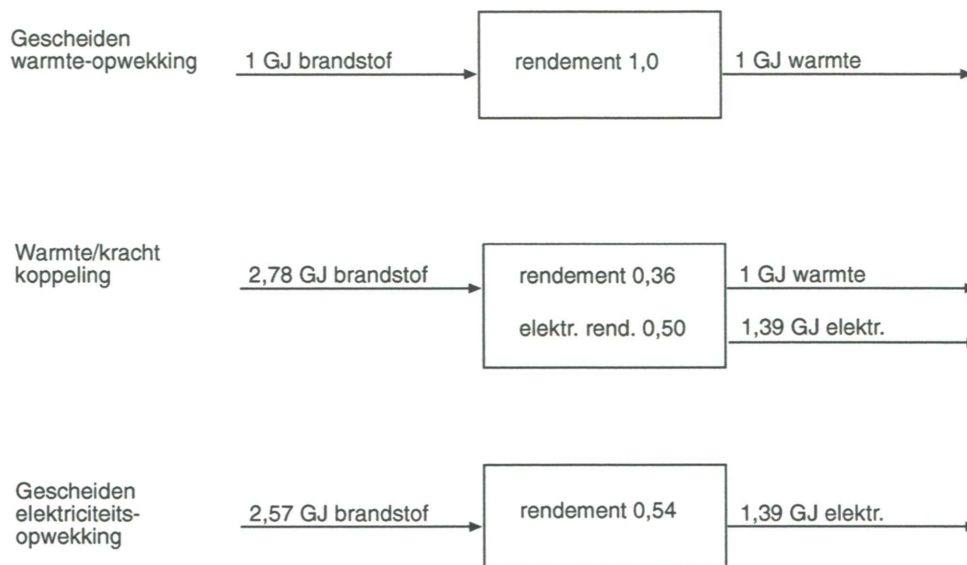
De toerekening van kosten, primair energieverbruik en emissies aan elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling is van belang voor de bepaling van de betreffende waarden die zijn toe te rekenen aan warmte-opwekking. Dit laatste is van belang voor het vergelijken van warmte/kracht koppeling met processen die uitsluitend dienen voor warmte-opwekking.

Voor wat betreft de toerekening aan elektriciteitsproductie valt een hoofdonderscheid te maken tussen toerekening vanuit een macro-economisch en "groene weide" perspectief en toerekening in een bedrijfs-economische en "bestaande productiepark" situatie.

In studies met een langetermijn perspectief is overwegend gekozen voor de macro-economische en "groene weide" benadering. In de interpretatie hiervan zijn er echter nog belangrijke verschillen te constateren.

Als referentie voor het te leveren commentaar is onderstaand één van deze interpretaties weergegeven. Gesteld wordt dat dit fundamenteel de beste zienswijze vertegenwoordigt voor het beoordelen van de mérites van warmte/kracht koppeling.

- Het elektrisch vermogen van de warmte/kracht installatie wordt beschouwd als onderdeel van het nationale productiepark dat in de plaats komt van uitbreiding/vervanging van centraal elektrisch vermogen. Voor een gasgestookte warmte/kracht installatie betreft de vermeden uitbreiding/vervanging een equivalent vermogensaandeel van een gasgestookte STEG-elektriciteitscentrale (overeenkomstig de stand van de techniek ten tijde van de bouw van de warmte/kracht installatie).
- Op basis van het bovenstaande worden de aan warmteproductie toe te rekenen waarden van kosten, primair energieverbruik en emissies bepaald als verschillen tussen de betreffende waarden voor de warmte/kracht installatie en die voor de vermeden STEG-elektriciteitscentrale. Als voorbeeld is dit in figuur 4.1 gedemonstreerd voor het primair energieverbruik. Naast de bepaling van het aan warmte-opwekking toe te rekenen brandstofverbruik betreft dit ook de bepaling van de (procentuele) primaire energiebesparing ten opzichte van warmteproductie door middel van een ketelinstallatie.



Brandstofverbruik voor warmte-opwekking bij warmte/kracht koppeling:

$$2,78 - 2,57 = 0,21 \text{ GJ}_{br}/\text{GJ}_w$$

Brandstofbesparing ten opzichte van gescheiden warmte-opwekking:

$$(1 - 0,21) * 100\% = 79\%$$

Figuur 4.1 Voorbeeldberekening van de (energetische) toerekening van het brandstofverbruik aan warmte-opwekking bij warmte/kracht koppeling.

- In de bovenstaande bepalingswijze is echter nog geen rekening gehouden met het effect van ongelijktijdigheid in de elektriciteits- en warmtebehoefte. Vanuit de visie van elektriciteitsvoorziening betreft dit een principiële beperking van warmte/kracht koppeling in vergelijking met de vermeden STEG-elektriciteitscentrale.

Het nadelige effect van deze beperking komt op twee manieren tot uiting. Ten eerste doordat zonder warmteterugwinning het elektrisch rendement van de warmte/kracht installatie (in het algemeen) lager is dan van de vermeden STEG-elektriciteitscentrale. Dit impliceert een toename van het (landelijk) primair energieverbruik voor elektriciteitsopwekking buiten het stookseizoen (relatief nadeliger naarmate het elektrisch rendement van de warmte/kracht installatie lager en de bedrijfstijd met warmteterugwinning korter is). Ten tweede zal continu bedrijf van de warmte/kracht installatie gedurende het stookseizoen kunnen leiden tot vermindering van de bedrijfstijd van basislast (kolen-gestookte) elektriciteitscentrales. Behalve een vermindering van de kostenvoordelen van warmte/kracht koppeling kan dit ook in conflict komen met het streven naar brandstofdiversificatie.

Commentaar per studie

M.E. Ossebaard, M.T. van Wees, A.J.M. van Wijk,
Duurzame warmtevoorziening; systeemstudie van technologische opties voor de
warmte-infrastructuur,
Universiteit Utrecht, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving, Utrecht, 1994a

Op grond van een vergelijking van relatieve primaire energiebesparingen wordt gesteld dat met elektrische warmtepompen een (aanzienlijk) grotere energiebesparing wordt bereikt dan met warmte/kracht koppeling.

Commentaar: De primaire energiebesparingen zijn in absolute zin gelijkwaardig of zelfs hoger voor warmte/krachtkoppeling.

De constatering (op bl. 50) is gebaseerd op een vergelijking van relatieve besparingen die voor warmte/kracht koppeling zijn gerelateerd aan de combinatie van gescheiden elektriciteit- en warmte-opwekking en voor elektrische warmtepompen aan alleen gescheiden warmte-opwekking.

Uit een getalsvoorbeeld op bl. 2 van bijlage 5 blijkt de relatieve primaire energiebesparing 18% te bedragen voor STEG-WKK tegenover 73% voor de elektrische warmtepomp met een COP = 6.

De waarde van 18% is echter gerelateerd aan een totaal primair energieverbruik van 3,7 GJ brandstof (per GJ warmte) voor gescheiden opwekking van zowel elektriciteit als warmte. De waarde van 73% is daarentegen gerelateerd aan 1 GJ brandstof voor alleen gescheiden warmte-opwekking (met een HR-ketel). Gerelateerd aan dit laatste verbruik is de primaire energiebesparing voor beide opties nagenoeg gelijk (70% voor STEG-WKK tegenover 73% voor de elektrische warmtepomp).

Het zal duidelijk zijn dat wanneer de COP van de elektrische warmtepomp wordt verlaagd van 6 naar bijvoorbeeld 3, de warmte/kracht optie duidelijk in het voordeel zal zijn. Dit in tegenstelling tot de indruk die wordt gewekt door figuur 7.2 van het rapport.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat gevolgtrekkingen die zijn gebaseerd op de keus van de relatieve primaire energiebesparing als vergelijkingsparameter een veel te pessimistisch beeld geeft van de toekomstperspectieven van warmte/kracht koppeling in vergelijking met elektrische warmtepompen.

In tegenstelling tot de primaire energiebesparingen zijn de waarden van de CO₂-emissies bij warmte/kracht koppeling wél betrokken op alleen warmte-opwekking. De verschillen in CO₂-emissies voor warmte/kracht processen met sterk uiteenlopende elektrische rendementen blijken echter relatief klein te zijn (fig. 7.8).

Commentaar: *De CO₂-emissies zijn berekend op basis van een exergetische allocatie aan elektriciteits- en warmte-opwekking. Op basis van een energetische allocatie overeenkomstig het gestelde in de inleidende beschouwing zijn de verschillen veel groter. De warmte/kracht opties met relatief laag elektrisch rendement (gasmotor, polymere brandstofcel) zijn te optimistisch en die met relatief hoog elektrisch rendement (STEG) zijn te pessimistisch voorgesteld.*

In de bijlage van dit rapport zijn voor twee voorbeelden van warmte/kracht koppeling vergelijkingen gemaakt tussen energetische en exergetische allocatie. Dit betreft gasmotor-WKK met een elektrisch rendement van 36% en STEG-WKK met een elektrisch rendement van 52%. Weliswaar betreft dit de berekening van brandstofverbruiken, maar omdat in alle gevallen wordt uitgegaan van aardgas als brandstof zijn de uitkomsten ook representatief voor de CO₂-emissies.

Op basis van energetische allocatie is de toerekening van het brandstofverbruik aan elektriciteitsopwekking conform het veronderstelde rendement van 54% voor gescheiden elektriciteitsopwekking. Het brandstofverbruik voor warmte-opwekking is dan 0,67 GJ_{br}/GJ_w voor gasmotor-WKK en 0,10 GJ_{br}/GJ_w voor STEG-WKK.

Op basis van exergetische allocatie is in het geval van gasmotor-WKK het brandstofverbruik voor warmte-opwekking slechts 0,44 GJ_{br}/GJ_w. De vermindering (t.o.v. 0,67 GJ_{br}/GJ_w) is te verklaren door een hogere toerekening van brandstofverbruik aan elektriciteitsopwekking. Dit komt overeen met een rendement van 46% voor gescheiden elektriciteitsopwekking tegenover 54% in het geval van energetische allocatie. Voor STEG-WKK is het effect omgekeerd. Het brandstofverbruik voor warmte-opwekking is nu hoger (0,30 GJ_{br}/GJ_w i.p.v. 0,1 GJ_{br}/GJ_w) en het brandstofverbruik voor elektriciteitsopwekking lager (overeenkomend met een opwekkingsrendement van 58% i.p.v. 54%).

Gesteld wordt dat voor een vergelijking van verschillende vormen van warmte-opwekking de toerekening op basis van energetische allocatie het meest zinvol is. Dit impliceert een forse verandering ten opzichte van het vergelijkingsbeeld dat naar voren komt in figuur 7.8.

Ook de toerekening van kosten aan elektriciteit en warmte geschiedt op basis van exergetische allocatie (blz. 54). Dit wordt door de auteurs echter al discutabel genoemd. Met name bij lokale WKK (op basis van polymere brandstofcellen) met een lage bedrijfstijd resulteert dit in een zodanig hoge elektriciteitsprijs dat besloten is de totale investeringskosten van de warmte/kracht installatie toe te rekenen aan warmteproductie.

Commentaar: *Een kostenverrekeningsmethode die uitgaat van het gestelde in de inleidende beschouwing is minder discutabel. De elektriciteitsprijs wordt dan in principe bepaald door de kosten van gescheiden opwekking en niet door de kosten van warmte/kracht koppeling.*

Bij volledige toerekening van de investeringen aan warmte-opwekking zijn de systeemkosten voor WKK steeds hoger dan voor ieder van de andere opties (bl. 55 t/m 58, vergelijk systeem IB met overige opties voor de jaren 2010 en 2030). Op basis van een dergelijke toerekening is een warmte/kracht optie nagenoeg kansloos.

5 Stadsverwarming met lage-temperatuur ruimteverwarmingsystemen in woningen

Inleidende beschouwing

Toepassing van lage-temperatuur ruimteverwarming in (nieuwbouw) woningen aangesloten op stadsverwarming biedt de mogelijkheid, om in vergelijking met ruimteverwarming d.m.v. 90/70 radiatoren, de primaire energiebesparingen te verhogen. Deze mogelijkheid doet zich bijvoorbeeld voor bij stadsverwarming met warmte-opwekking door middel van STEG-warmte/kracht koppeling, waarbij een verlaging van de stoomcondensatietemperatuur leidt tot een vermindering van "gederfde" elektriciteitsproduktie.

Voorbeelden van lage-temperatuur ruimteverwarmingsystemen zijn met name de volgende:

- radiatoren met vergroot oppervlak;
- vloerverwarming;
- luchtverwarming.

Toepassing van dergelijke alternatieven impliceert in het algemeen een toename van de benodigde investeringen. Bovendien dient rekening te worden gehouden met de volgende bijkomende aspecten.

- Het comfort. Vloerverwarming reageert traag op veranderingen in de warmte-behoefte (bijvoorbeeld bij plotselinge zoninstraling of bij opwarming vanuit een koude situatie). Luchtverwarming kan aanleiding geven tot tochtverschijnselen en geurhinder (bij recirculatie). Vergroting van radiator-oppervlak kan om esthetische redenen bezwaarlijk zijn (geen probleem als de temperatuurs-verlaging matig is en sprake is van een woning met een lage warmtebehoefte).
- De omvang van de warmtebehoefte. Het reduceren of vermijden van nacht-verlaging (bij "thermisch trage" systemen zoals vloerverwarming) leidt tot enige verhoging van de warmtebehoefte. Luchtverwarming is gemakkelijk te combineren met warmteterugwinning uit ventilatielucht, wat resulteert in een verlaging van de warmtebehoefte ten opzichte van vloerverwarmings- of radiatorsystemen zonder warmteterugwinning.
- Verlaging van het temperatuurniveau van de warmtelevering leidt tot kosten-verhoging van de warmtapwatertoestellen en (bij een aanvoertemperatuur beneden 65 à 70 °C) tot de noodzaak voor elektrische bijverwarming. Het op dit niveau handhaven van de aanvoertemperatuur om elektrische bijverwarming voor tapwateropwarming te vermijden impliceert een vermindering van de energetische voordelen van lage-temperatuur ruimteverwarming.

Commentaar per studie

W.P.C. Mans, L.M. Deuss, W van der Veen,
Lage temperatuur ruimteverwarming (rapport met bijlagen),
KEMA, Arnhem, maart 1995

Er wordt geconcludeerd dat een economisch optimaal temperatuursregime voor vergrote radiatoren ligt bij 65/45 °C.

Commentaar: Deze conclusie kan niet worden gerechtvaardigd op grond van de berekeningsuitkomsten. Een temperatuursregime met hogere temperaturen en een groter verschil tussen aanvoer- en retour-temperaturen (bijvoorbeeld 90/50) zal tegen een weinig hoger primair energieverbruik belangrijk lager in kosten kunnen zijn (dit is echter niet onderzocht).

De berekeningsuitkomsten geven aan dat het primaire energieverbruik voor stadsverwarming met radiatorenverwarming ligt op 521 m³/a voor 90/70 radiatoren tegenover 371 m³/a voor 65/45 radiatoren. Deze verlaging van 150 m³/a is echter voor het grootste deel te wijten aan het overgaan van een indirect systeem (met warmteproductie-temperaturen 125/75) naar een direct systeem (warmteproductie-temperaturen 67/44). Voor een direct systeem met 90/70 radiatoren zouden de warmteproductie-temperaturen op 92/69 kunnen liggen en zal de energiewinst door vergroting van de radiatoren aanzienlijk lager uitvallen.

Verder vertegenwoordigen deze temperaturen ontwerp-waarden bij maximale warmtelevering. Wanneer de vergelijking wordt betrokken op de meestal lagere jaargemiddelde temperaturen, dan zijn de temperatuurverschillen en daarmee samenhangend de energiewinst nog kleiner. Voor 90/70 radiatoren geldt namelijk een stooklijn met afnemende temperaturen terwijl deze voor 65/45 radiatoren continu op het ontwerp-niveau wordt gehouden (t.b.v. tapwateropwarming). Mogelijk blijft van de energiewinst van 65/45 ten opzichte van 90/70 radiatoren dan nog slechts enkele tientallen m³ per jaar over.

Ten aanzien van kosten valt iets soortgelijks op te merken. Uit de berekeningsuitkomsten blijkt dat de kosten voor 90/70 en 65/45 systemen min of meer gelijk zijn. Dit is echter voornamelijk het gevolg van het wegvallen van meerkosten van radiatoren tegen de minderkosten van een direct ten opzichte van een indirect systeem. Wanneer 90/70 en 65/45 systemen beiden als direct systeem zijn uitgevoerd, dan zullen de kosten van het 90/70 systeem duidelijk lager zijn.

Het bovenstaande doet overigens de vraag rijzen waarom een direct systeem met ontwerp warmteproductie-temperaturen van 92/49 niet is geëvalueerd. Als gevolg van een verdubbeling van het temperatuursverschil zullen de kosten van transport- en distributieleidingen aanmerkelijk kleiner zijn. Het kostenvoordeel ten opzichte van een 65/45 systeem wordt daardoor significant hoger terwijl het toch al kleine verschil in primair energieverbruik in principe nog verder wordt verlaagd.

Er wordt geconcludeerd dat luchtverwarming in het nadeel is ten opzichte van vergrote radiatoren, maar dat dit te wijten is aan de keuze van een referentie woning die minder geschikt is voor de toepassing van luchtverwarming.

Commentaar: *Ook bij keuze van een meer geschikte referentie woning blijft het primair energieverbruik voor luchtverwarming hoger dan voor radiatorenverwarming. Wanneer wordt afgezien van warmteterugwinning uit ventilatielucht kan radiatorenverwarming in economisch opzicht zelfs sterk in het voordeel zijn ten opzichte van luchtverwarming (zonder dat het primair energieverbruik noemenswaard hoger wordt).*

Dat stadsverwarming met (vergrote) radiatoren energetisch in het voordeel is ten opzichte van stadsverwarming met luchtverwarming blijkt met name het gevolg te zijn van het (extra) elektriciteitsverbruik van de ventilatoren. In het rapport wordt echter gesteld dat het extra elektriciteitsverbruik excessief is als gevolg van de keuze van een referentiewoning die niet optimaal is voor de toepassing van luchtverwarming. Dit resulteert ook in hogere kosten voor luchtverwarming ten opzichte van radiatoren.

Dit wekt de suggestie dat met een betere keuze van referentie-woning luchtverwarming wel gunstiger zou kunnen zijn dan radiatorenverwarming. Voor wat betreft energieverbruik is dit echter niet het geval. Omdat er weinig verschil is in warmte-afname betekent ook een relatief kleinere omvang van het extra elektriciteitsverbruik dat luchtverwarming in het nadeel blijft.

Belangrijker is echter dat bij toepassing van radiatorenverwarming de toepassing van een (gebalanceerd) ventilatiesysteem niet noodzakelijk is. Weglating hiervan betekent dat ook van warmteterugwinning uit ventilatielucht moet worden afgezien. De vraag kan worden gesteld of dit voor wat betreft het primair energieverbruik veel verschil maakt. Omdat bij stadsverwarming met STEG-warmte/krachtkoppeling het primair energieverbruik per GJ warmte enkele malen lager is dan bij gasgestookte ketels, is ook de energiewinst van warmteterugwinning aanzienlijk kleiner. Rekening houdend met het extra elektriciteitsverbruik van de wtw-installatie zou de energiewinst zelfs geheel kunnen verdwijnen.

Weglaten van warmteterugwinning zal daarom een marginaal effect hebben op het primair energieverbruik. Hier staat tegenover dat de kosten fors kunnen dalen wanneer wordt afgezien van ventilatiekanalen met wtw-apparaat. De kosten hiervan zijn begroot op circa f 6.000, wat op zich al meer is dan de totale investering voor warmte transport en distributie (blz. 23 van het rapport). Ook wanneer dit bedrag lager zou uitvallen (bij een betere keuze van de referentiewoning) is het onwaarschijnlijk dat stadsverwarming met luchtverwarming energetisch of economisch beter kan uitvallen dan stadsverwarming met radiatorenverwarming.

6 Elektrische warmtepompboiler in vergelijking met HR-ketel

Inleidende beschouwing

Gebruikmaking van de elektrische warmtepompboiler voor ruimteverwarming en warmtapwatervoorziening biedt de mogelijkheid voor significante primaire energiebesparingen in vergelijking met warmteopwekking door middel van HR-ketels. Tussenschakeling van elektriciteit als secundaire energiedrager maakt de energieconversieketen echter complexer.

De beschouwde warmtepompboiler maakt gebruik van afgewerkte ventilatielucht als warmtebron. De warmtepompboiler vormt hierbij een integraal onderdeel van een luchtverwarmingsstelsel met warmterugwinning uit afgewerkte ventilatielucht.

Belangrijkste toekomstperspectief voor de warmtepompboiler is de toepassing in het kader van een "electric only" distributiesysteem. Hierbij wordt gedacht aan nieuwbouw woningen met een ruimteverwarmingsbehoefte die door een energiebesparende bouw zo sterk is afgenomen dat de aanleg van een gasdistributienet niet langer economisch verantwoord zou zijn.

Tegenover het voordeel van een vermeden gasnet staat echter de noodzaak voor het verzwaren van het elektriciteitsdistributiesysteem en een uitbreiding van het landelijk elektrisch productievermogen. Dit laatste wordt getemperd door het optreden van gelijktijdigheidseffecten, maar aan de andere kant kan geen voordeel worden getrokken uit afschakelbaarheid van het elektrisch vermogen (zoals wanneer de warmtelevering kan worden overgenomen door een gasgestookte ketel of een warmtebufferinstallatie).

Behalve voor de warmtepomp met elektrische bijverwarming gelden bovenstaande overwegingen ook voor het verbruik ten behoeve van elektrisch koken. Hoe zwaar dit moet wegen is echter mede afhankelijk van de penetratie van elektrisch koken in woningen met een gasaansluiting (ook hier zal men gebruik willen maken van magnetrons).

Commentaar per studie

W.P.C. Mans, W van der Veen,
Lage temperatuur ruimteverwarming (rapport met bijlagen),
KEMA, Arnhem, maart 1995

Er wordt geconcludeerd dat de warmtepompboiler in vergelijking met de HR-ketel 30% primaire energie bespaart bij vergelijkbare kosten.

Commentaar: Er zijn redenen om te vermoeden dat de primaire energiebesparingen lager en de kosten relatief ongunstiger zullen zijn

- De 30% primaire energiebesparing is berekend op basis van levering van slechts 5% van de totale warmtebehoefte door de elektrische bijverwarming. Gesteld is dat dit aandeel is ontleend aan de resultaten van simulatieberekeningen.

Om een aantal redenen wordt aangeraden deze berekeningen nader te verifiëren. In de eerste plaats omdat kan worden afgevraagd of na te zijn afgekoeld door de warmteterugwin-unit, de ventilatielucht nog voldoende warmte bevat om via de warmtepomp in 95% van de totale warmtebehoefte te voorzien. Indien dit zou lukken, dan is dit mogelijk te wijten aan een te hoog veronderstelde ventilatieluchtstroom. Bij de berekening van de benodigde (mechanische) ventilatiestroom ($480 \text{ m}^3/\text{h}$) is geen rekening gehouden met de door infiltratie optredende luchtverversing (ruim $200 \text{ m}^3/\text{h}$). Dit leidt tevens tot een ruimteverwarmingsbehoefte ($22,4 \text{ GJ/a}$) die weliswaar representatief is voor de huidige nieuwbouw, maar nogal hoog is voor een woning met een hoge isolatieindex ($It=16$) en warmteterugwinning uit ventilatielucht. Overigens wordt op bl.95 van de bijlage een mechanische ventilatiestroom van slechts $350 \text{ m}^3/\text{h}$ aangegeven.

In de tweede plaats lijken de aangegeven elektrische vermogens voor bijverwarming aan de lage kant. Wanneer wordt gerekend met de lage luchtstroom van $350 \text{ m}^3/\text{h}$ dan zal bij een maximale luchttemperatuur van 70°C (bl.95 van de bijlage) en een maximale opwarmingsstemperatuur door de warmtepomp van 45°C (bl.41), het benodigd bijverwarmingsvermogen $2,9 \text{ kWe}$ zijn. Het aangegeven vermogen is echter lager, $0,44 \text{ kWe}$ op bl.95 van de bijlage en $1,25 \text{ kWe}$ op bl. 74 van de bijlage.

- De kosten voor elektriciteitsvoorziening lijken te laag en voor gasvoorziening te hoog.

Op bl. 75 van de bijlage is voor de warmtepompboiler met een vermogen van 1 kWe gerekend met extra opwekcapaciteit van $0,5 \text{ kWe}$ waarvoor de kosten zijn gesteld op $0,5 * 200 \text{ f/kWe/a} = 100 \text{ f/a}$ (het bedrag van 200 f/kWe/a is afgeleid van een RBT van 258 f/kWe). Is hierbij rekening gehouden met de

extra opwekcapaciteit voor bijverwarming? Dit kan een belangrijke extra kostenpost vertegenwoordigen, zeker als zou worden uitgegaan van een bijverwarmingsvermogen van 2,9 kWe.

Op bl. 17 van het hoofdrapport worden de kosten van gastransport naar de woning gesteld op 260 f/a. Dit bedrag bestaat voor de helft uit kapitaalslasten en voor de overige helft uit de kosten van onderhoud, meteropname, overhead, etc.. Dit laatste in rekening brengen is echter in strijd met de economische uitgangspunten zoals aangegeven op bl. 5 van de bijlage.

Het daarom in mindering brengen van een bedrag van 130 f/a op de kosten van gasvoorziening betekent dat de jaarkosten voor de HR-ketel dalen van 1583 f/a naar 1433 f/a. Dit betekent dat in vergelijking met de warmtepompboiler niet meer sprake is van meerkosten van 11 f/a maar van minderkosten van 119 f/a. Aan de andere kant moet worden gesteld dat de kosten van elektriciteitsvoorziening zijn afgeleid van een RBT waarin ook onderhouds- en overheadkosten zijn verdisconteerd. Hier staat echter weer tegenover dat rekening moet worden gehouden met een mogelijk aanzienlijk hogere opwekcapaciteit voor het systeem met warmtepompboiler. De einduitkomst blijft daarom onzeker maar zou per saldo in het voordeel kunnen zijn van de HR-ketel.

M.E. Ossebaard, M.T. van Wees, A.J.M. van Wijk,
Duurzame warmtevoorziening; systeemstudie van technologische opties voor de
warmte-infrastructuur (Syrene-studie),
Universiteit Utrecht, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving, Utrecht, 1994a

Ook in deze studie steekt de warmtepompboiler (zeer) gunstig af tegenover de HR-ketel. Voor nieuwbouw woningen loopt de primaire energiebesparing op van 42% in 1993 tot 60% in 2030. Voor wat betreft de kosten per woning is sprake van een kostennadeel van 200 f/a in 1993 en een kostenvoordeel van 65 à 95 f/a in 2030.

Commentaar: *Wederom lijkt deze uitkomst te optimistisch voor de warmtepompboiler.*

- Ten aanzien van de *primaire energiebesparingen* geldt in nog sterkere mate hetgeen is gesteld voor de vorige studie. Dit betreft met name het onderschatten van het aandeel van bijverwarming in de totale warmtelevering.

Ook in dit verband dient te worden afgevraagd of tijdens het stookseizoen de afgewerkte ventilatielucht in voldoende mate als warmtebron kan fungeren. Op bl. 3 van bijlage 2 wordt aangegeven dat voor 2030 de ruimteverwarmingsbehoefte voor nieuwbouw woningen is gesteld op 10 GJ/a bij hoge en 5 GJ/a bij lage warmtevraag [Geuzendam en Giljamse, 1994]. Dit suggereert relatief

weinig restwarmte in de afgewerkte ventilatielucht. Op het eerste gezicht lijkt dit mee te kunnen vallen. Er wordt namelijk gesteld dat bij de lage vraag van 5 GJ/a geen rekening is gehouden met warmteterugwinning uit de ventilatielucht omdat dit zou concurreren met toepassing van de warmtepomp. Dit is echter in tegenspraak met het gestelde in de aangegeven referentie, namelijk dat de waarde van 5 GJ/a wel gebaseerd is op de toepassing van warmteterugwinning.

Overigens zijn de waarden van 10 GJ/a en 5 GJ/a wel erg veel lager dan de 22,4 GJ/a die in de voorgaande studie is berekend voor een woning met een hoge isolatiegraad en met toepassing van warmteterugwinning uit de ventilatielucht.

Het bovenstaande impliceert de noodzaak voor de bepaling van tijdafhankelijke warmtebalansen voor de woning.

- Ten aanzien van de *kosten* wordt begonnen met te constateren dat de kostenvergelijking nog sterker in het voordeel van de warmtepompboiler zou uitvallen wanneer niet de totale maar slechts de meerkosten van elektriciteitsdistributie in rekening worden gebracht (meerkosten ten opzichte van elektriciteitsdistributie bij gasverwarming). Dit scheelt een bedrag dat kan oplopen tot 200 f/a (figuren 7.5, systeem 2) en zou resulteren in min of meer dezelfde kosten in 1993 en een kostenvoordeel van 250 à 300 f/a in 2030.

Hier staat echter tegenover dat de uitkomst weer verslechtert indien rekening wordt gehouden met de uitbreiding van het landelijk elektrisch productievermogen ten gevolge van elektrische bijverwarming en elektrische koken. Verhoging van dit vermogen met 1 kWe impliceert een kostenverhoging van 100 à 200 f/a.

Verder lijkt de voor 2030 veronderstelde investering voor de warmtepompboiler aan de lage kant. Op blz. 2 van bijlage 4 is hiervoor een bedrag opgegeven dat even hoog is als voor de HR-ketel (f 4000). Dit ondanks een aanzienlijk grotere complexiteit van de apparatuur (geïsoleerd opslagvat van 200 liter, warmtepompcompressor, extra warmtewisselaars incl. een heatpipe, etc.). Iedere verhoging van de investeringen voor de warmtepompboiler met f 1000 impliceert een verhoging van de jaarlijkse kosten met bijna 100 f/a.

7 Stadsverwarming in vergelijking met elektrische warmtepompen bij eindverbruikers

Inleidende beschouwing

Stadsverwarming heeft als belangrijk voordeel dat door de grootschaligheid van de warmteproductie de primaire energiebesparingen relatief hoog en de warmteproductiekosten relatief laag zijn. Meestal betreft dit warmteproductie op basis van warmte/kracht koppeling. De grootschaligheid maakt het systeem echter ook flexibel ten aanzien van de benutting van duurzame energiebronnen en de afvalwarmte van vuilverbranding of industriële processen.

Tegenover deze voordelen voor wat betreft de warmteproductie staat als belangrijk nadeel de relatief hoge kosten van warmtedistributie. Deze kosten zijn mede afhankelijk van de kenmerken van het warmte-afname gebied. Voor bestaande bouw zijn de kosten hoger dan voor nieuwbouw en per gebied nemen de kosten toe naarmate het aandeel eengezinswoningen hoger en de bebouwingsdichtheid lager is. Verlaging van de warmtebehoefte per afnemer leidt tot enige verlaging van de distributiekosten (kleinere leidingdiameters) maar tot een verhoging van de distributiekosten per eenheid geleverde warmte.

Toepassing van **elektrische warmtepompen** bij ieder van de eindverbruikers wordt perspectiefvol geacht onder omstandigheden waarbij de kosten van warmtedistributie te hoog zouden zijn. Dit betreft gebieden met lagere bebouwingsdichtheden en een (door energiebesparingsmaatregelen) sterk gedaalde warmtevraag. Hierbij wordt dan vooral gedacht aan toepassing in het kader van een "electric only" energievoorziening.

In dit geval bestaan de distributiekosten voor warmtevoorziening uitsluitend uit de **meer**kosten van elektriciteitsdistributie (meerkosten ten opzichte van de situatie zonder elektrische warmtepompen). Hiernaast zal echter ook rekening moeten worden gehouden met een uitbreiding van het landelijk elektrisch productievermogen. De omvang van dit vermogen wordt mede bepaald door het vermogen voor de elektrische weerstandsverwarming die benodigd is voor pieklastverwarming gedurende de koudste dagen van het jaar. Weliswaar kan door middel van warmteopslag dit elektriciteitsverbruik worden verschoven naar de daluren van de elektriciteitsbehoefte, maar dit impliceert extra kosten voor de opslagapparatuur die het betreffende kostenvoordeel weer (deels) teniet doet.

De uitkomsten van een vergelijking tussen de beide opties zal vooral afhankelijk zijn van de karakteristieken van het bebouwingsgebied. Naarmate deze ongunstiger zijn voor de kosten van warmtedistributie (in vergelijking met de meerkosten van elektriciteitsvoorziening), des te kleiner is de kans dat deze voldoende worden gecompenseerd door de voordelen van grootschalige warmteproductie.

Bij het maken van deze vergelijking dient verder nog het volgende in overweging te worden genomen.

- Bij stadsverwarming zullen brandstofverbruik en kosten per GJ (additionele) warmteproductie in het algemeen lager zijn dan bij warmte-opwekking door middel van (kleine) elektrische warmtepompen. Besparingsmaatregelen zoals woningisolatie of warmterugwinning uit ventilatielucht zijn dan minder aantrekkelijk waardoor de optimale omvang van de warmtevraag bij stadsverwarming lager kan zijn dan bij elektrische warmtepompen.
- Stadsverwarming wordt al op enige schaal in de praktijk toegepast terwijl dit niet of nauwelijks geldt voor warmtepompen die uitsluitend dienen voor warmte-opwekking. Kosten en bedrijfsgegevens hebben daardoor in het laatste geval een meer theoretisch karakter.
- Het marktpotentieel voor stadsverwarming met warmte/kracht koppeling zal op landelijk niveau worden beperkt door een zekere limiet die moet worden gesteld aan elektrisch vermogen uit warmte/kracht. Toepassing van elektrische warmtepompen verschuift deze limiet naar boven, wat op zich een extra stimulans vormt voor de toepassing van warmtepompen. Dit hoeft echter niet (alleen) te gelden voor kleine elektrische warmtepompen bij eindverbruikers. Ook grotere elektrische warmtepompen voor collectieve warmtevoorziening komen hiervoor in aanmerking.

Algemeen commentaar op de vergelijking tussen beide systemen

Uit vrijwel alle beschouwde studies blijkt dat stadsverwarming met grootschalige warmte/kracht koppeling qua kosten en CO₂-emissies in het voordeel is ten opzichte van een elektrische warmtepompboiler in iedere woning. Wel wordt gesteld dat bij lagere bebouwings- en/of warmtedichtheid van het voorzieningsgebied dit voordeel minder wordt en dat bij bepaalde (niet nader gespecificeerde) grenswaarden de warmtepompboiler de voorkeur zal verdienen boven stadsverwarming.

Commentaar: *De grenswaarden liggen bij lagere bebouwings- en/of warmtedichtheden dan zou kunnen worden afgeleid uit de vergelijkingsresultaten. Met name de kosten van warmtedistributie zouden in de naaste toekomst belangrijk lager kunnen zijn. Voor (kleine) elektrische warmtepompen bij eindverbruikers zouden de (meer)kosten van elektriciteitsvoorziening daarentegen hoger kunnen zijn. Verder kan voor het beschouwde type warmtepompboiler (met ventilatielucht als warmtebron) de noodzakelijke aanwezigheid van een luchtkanalensysteem als een belangrijk kostennadeel worden beschouwd.*

In het volgende wordt het bovengestelde puntsgewijs becommentarieerd.

- *Ten aanzien van de constatering dat stadsverwarming (meestal) in het voordeel is ten opzichte van de elektrische warmtepompboiler*

Dit blijkt met name uit de resultaten van de volgende twee studies.

In [Mans *et al*, 1994, blz. 50-52] zijn voor de gunstigste variant van stadsverwarming (systeem 2) het primaire energieverbruik en de CO₂ emissies 60% lager dan voor de elektrische warmtepompboiler (systeem 14). Ook de kosten zijn lager, f 1484 per jaar voor stadsverwarming tegenover f 1572 voor de elektrische warmtepompboiler.

Ook in [Ossebaard *et al*, 1994b, blz. 56] blijken voor woningen in de nieuwbouwsector de kosten voor stadsverwarming (systeem 3) steeds lager te zijn dan voor elektrische warmtepompboilers (systeem 2). Ook de CO₂- en NO_x-emissies zijn lager (blz. 69-70), ook al is de gekozen vergelijkingsmaatstaf relatief ongunstig voor stadsverwarming (zie hoofdstuk 4). Alleen de primaire energiebesparing lijkt ongunstiger, maar dit is een gevolg van de keuze van een vergelijkingsmaatstaf die een sterk vertekend beeld geeft (aangegeven in hoofdstuk 4).

Volledigheidshalve wordt nog vermeld dat het gestelde niet zonder meer blijkt uit [Boels *et al*, 1994, blz. 50]. Deze studie betreft vrijwel uitsluitend de kosten van warmtevoorziening en de gekozen "all electric" variant betreft elektrische weerstandsverwarming in plaats van de elektrische warmtepomp. In het kader van primaire energiebesparing en emissiereductie is deze optie bij voorbaat als niet-perspektiefvol te beschouwen.

- *Ten aanzien van de potentiële verlaging van de warmtedistributiekosten*

In vrijwel alle studies zijn de kosten van warmtedistributie, voor zowel nu als in de toekomst, meerdere malen zo hoog als de kosten van elektriciteits- of gasdistributie. Dit suggereert een kostenreductiepotentieel voor warmtedistributie die behalve groter vooral ook eerder zou kunnen plaatsvinden dan aangegeven in de betreffende studies

Reden om de kosten van warmtedistributie te vergelijken met de kosten van gas- of elektriciteitsdistributie is omdat tot op zekere hoogte sprake is van gelijksoortige kosten. In alle gevallen moet voor leidingaanleg een sleuf worden gegraven die voor wat betreft tracé-lengte voor warmtedistributieleidingen eerder kleiner dan groter is (bij aanleg van kruipruimteleidingen). De meerkosten van het warmtedistributienet zijn dan met name te wijten aan hogere materiaal- en montagekosten (als gevolg van dubbele geïsoleerde leidingen en voorzieningen voor thermische uitzetting) en mogelijk de noodzaak voor bredere sleuven en eventuele grondverbetering.

Dit suggereert de mogelijkheid voor een aanzienlijke reductie van de warmte-distributiekosten door toepassing van leidingen die gemakkelijker gelegd kunnen worden. Dat deze mogelijkheid bestaat wordt onder andere aangegeven in [Mans et al, 1994, blz. 77 van de bijlage]. Hierin worden voor secundaire warmtedistributieleidingen in stalen uitvoering kosten opgevoerd van 250 f/m waarvan 175 f/m legkosten. In een kunststof uitvoering dalen de legkosten tot 80 f/m maar nemen de materiaalkosten toe tot 130 f/m (netto voordeel dus slechts 40 f/m). Vooral deze materiaalkosten zullen echter in principe sterk omlaag moeten kunnen wanneer de leidingdiameters aanzienlijk worden verkleind. Een vermindering van 40 à 50% is mogelijk wanneer het verschil in aanvoer- en retour-temperaturen wordt verdubbeld (bijvoorbeeld een 90/50 i.p.v. een 90/70 systeem) en wordt uitgegaan van een warmte-aansluitvermogen dat vergelijkbaar is met het maximale warmtevermogen van de elektrische warmtepompboiler.

Het bovenstaande vertegenwoordigt een enigszins gesimplificeerde redenering die is opgezet om de noodzaak te onderstrepen voor een meer gedetailleerde evaluatie wanneer het gaat om het inschatten van het potentieel voor verlaging van de warmtedistributiekosten. In bijna alle studies wordt voor de kosten van secundaire warmtedistributie bij nieuwbouw een bedrag opgevoerd van f 3000 per woning. In één van de studies [Ossebaard et al, 1994b, blz. 52-56] wordt voor nieuwbouw gerekend met een kostenreductiepotentieel van 20% in 2010 (circa 30% wanneer ook het effect van een lager aansluitvermogen in rekening wordt gebracht) en 40% respectievelijk circa 50% in 2030. Hiertegenover kan worden gesteld dat op basis van bovenstaande redenering een reductie van meer dan 50% al voor de naaste toekomst te motiveren is.

Volledigheidshalve moet worden opgemerkt dat de totale warmtedistributiekosten naast het secundaire leidingnet ook ander elementen omvat. Dit betreft onder andere de transportleiding naar het voorzieningsgebied, de hulpketelstations, het primaire distributienet, de onderstations, en de warmtemeters en regelinstallaties bij de eindverbruikers. Ook voor deze andere elementen zijn belangrijke kostenverminderingen mogelijk [Ossebaard et al, 1994a, blz. 41-47] maar er is geen directe relatie gelegd tussen gekwantificeerde verwachtingen en bovengenoemde kostenreductiepercentages als functie van de tijd. Dit onderstreept nogmaals de noodzaak voor een verdergaande en meer gedetailleerde evaluatie.

- *Ten aanzien van de kosten van elektriciteitsvoorziening ten behoeve van warmte-opwekking*

Zoals gesteld in de inleidende beschouwing betreft dit de meerkosten ten opzichte van de situatie zonder elektrische warmte-opwekking. Hierbij gaat het om de kosten van een eventuele verzwaring van het distributienet en de kosten van extra benodigd elektrisch opwekkingsvermogen.

Voor wat betreft de kosten voor **verzwaring** van het **distributienet** bestaat duidelijk verschil tussen de SYRENE-studies en de KEMA-studies. In de SYRENE-studies zijn de meerkosten relatief laag. Per kW additioneel elektrisch vermogen is de meerinvestering slechts f 30 per woning [Boels *et al*, 1994b, blz. 102]. In [Mans *et al*, 1994, blz. 75 van de bijlage] wordt een veel hoger bedrag in rekening gebracht. Voor een warmtepompboiler met een vermogen van 1 kW_e wordt de meerinvestering op f 600 gesteld.

Volledigheidshalve wordt opgemerkt dat hoewel in de Syrene-studies in principe met relatief lage meerkosten wordt gerekend, dit niet consistent is met de systeemvergelijkingen in de studie [Ossebaard *et al*, 1994b, blz. 56-57]. Hierbij zijn de totale in plaats van slechts de meerkosten van elektriciteitsdistributie in rekening gebracht (zie hoofdstuk 6 van dit rapport).

Ten aanzien van de kosten voor **extra elektrisch opwekkingsvermogen** is er ook een duidelijk verschil, zowel tussen de SYRENE studies onderling als met de KEMA studies.

In de SYRENE-studie [Boels *et al*, 1994b] worden deze vermogenskosten niet per kW vermogen maar à raison van 5 ct per kWh elektriciteitshoeveelheid in rekening gebracht (blz. 54). Dit heeft tot gevolg dat zelfs bij elektrische weerstandsverwarming met een elektrisch vermogen van 8 kW_e per woning (blz. 56) de investeringskosten nog meevallen. Zoals eerder gesteld komt in deze studie de elektrische warmtepompboiler verder niet aan de orde.

In de SYRENE-studie [Ossebaard *et al*, 1994b] is wel gerekend met vermogenskosten maar zijn de meerkosten per woning toch nog relatief laag (blz. 56). Zeer waarschijnlijk is dit voornamelijk te danken aan een relatief laag elektrisch vermogen voor de warmtepompboiler, vermoedelijk door niet of nauwelijks rekening te houden met additionele elektrische weerstandsverwarming onder pieklastcondities.

In het KEMA-rapport [Mans *et al*, 1994, blz. 74 en 75 van de bijlage] wordt gerekend met een vermogensvergoeding van f 200 per kW elektrisch vermogen per jaar. In feite wordt hier afgeweken van een macro-economische benadering door deze waarde af te leiden van het RBT (dat naast investeringskosten ook onderhouds- en overige kosten omvat). Het netto contant maken van f 200 over

een projectduur van 25 jaren resulteert in een bedrag van f 2800. Dat het effect in de kostenvergelijkingen nog meevalt is te danken aan het in rekening brengen van slechts een $0,5 \text{ kW}_e$ extra opwekcapaciteit voor een warmtepomp-boiler met een elektrisch vermogen van 1 kW . Ook in dit geval schijnt niet of nauwelijks rekening te worden gehouden met additioneel elektrische weerstandsverwarming onder pieklastcondities. Er wordt ook geen melding gemaakt van warmte-opslagcapaciteit om dit elektriciteitsverbruik te verschuiven naar de daluren.

Het bovenstaande samenvattend wordt gesteld dat hoewel in sommige studies bepaalde kostenelementen hoog zijn ingeschat, er een tendens bestaat tot onderschatting van de meerkosten van elektriciteitsvoorziening voor warmtepomp-boilers bij eindverbruikers.

- *Ten aanzien van het kostennadeel van de beschouwde warmtepompboiler als gevolg van de noodzakelijke aanwezigheid van een luchtkanalenstelsel*

Omdat de beschouwde elektrische warmtepompboiler gebruik maakt van ventilatielucht als warmtebron is de combinatie met een luchtverwarmingssysteem onontbeerlijk.

In [Mans et al, 1994] wordt deze optie vergeleken met stadsverwarming met radiatoren en ventilatiekanalen ten behoeve van directe warmteterugwinning uit ventilatielucht. Zoals reeds gesteld in hoofdstuk 5 zou het weglaten van dit kanalsysteem met warmteterugwinapparaat de investeringen fors verminderen (f 6000 per woning) zonder dat de primaire energiebesparingen hierdoor wezenlijk verminderen (zie inleidende beschouwing). Het reeds geconstateerde kostenvoordeel voor stadsverwarming zou hierdoor sterk toenemen.

In [Ossebaard et al, 1994b, blz. 3] zijn bij het maken van de kostenvergelijkingen de kosten van woninginstallaties (behoudens die van warmtemeters en conversie-apparatuur) buiten beschouwing gelaten. Ook hier kan dus worden opgemerkt dat het kostenvoordeel van stadsverwarming sterk kan toenemen als dit wel gebeurt.

8 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

De resultaten van de uitgevoerde analyse illustreren zowel de complexiteit als de problematiek van het selecteren van (de meest) perspectiefvolle technieken voor warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

Deze resultaten betreffen de becommentariering van enkele voorbeelden van keuzestellingen die bij een dergelijk selectieproces aan de orde komen. Onderstaand zijn deze keuzestellingen en de hieruit getrokken conclusies puntsgewijs weergegeven.

- *Ten aanzien van de toerekening van primair energieverbruik, emissies en kosten aan elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling.*

De verschillende toerekeningsmethoden die zijn gehanteerd kunnen een sterk verschillend beeld geven van de mérites van warmte/kracht processen in vergelijking met processen die uitsluitend dienen voor warmte-opwekking. Primaire energiebesparingen lijken aanzienlijk lager wanneer deze worden gerelateerd aan gescheiden opwekking van zowel elektriciteit als warmte (in plaats van alléén aan warmte-opwekking). Verder wordt geconstateerd dat bij het hanteren van een exergetische allocatiemethode de waarden die aan elektriciteitsopwekking worden toegerekend afwijken van de waarden die gelden voor gescheiden elektriciteitsopwekking. Toepassing van deze allocatiemethode wordt daarom afgeraden.

- *Ten aanzien van het energetisch en economisch optimale temperatuursregime voor stadsverwarming.*

In één van de studies wordt geconcludeerd dat het energetisch en economisch optimale temperatuursregime ligt bij 65/45 °C. Er kan echter aannemelijk worden gemaakt dat door wijziging in de systeemuitvoering het optimum op een hoger niveau kan komen te liggen. Dit betreft een systeem op basis van de toepassing van radiatorenverwarming en zonder warmteterugwinning uit ventilatielucht. Dit laatste met name ter vermijding van de hieraan verbonden kosten voor een luchtkanalensysteem.

- *Ten aanzien van de elektrische warmtepompboilers in vergelijking met de HR-ketel.*

Dit betreft elektrische warmtepompboilers met ventilatielucht als warmtebron. Toepassing in het kader van een "all electric" energievoorziening van woningen wordt minder aantrekkelijk wanneer (in sterkere mate) rekening wordt gehouden met de additioneel noodzakelijke elektrische weerstandsverwarming onder pieklastcondities.

- *Ten aanzien van stadsverwarming in vergelijking met een elektrische warmtepompboiler in iedere woning.*

Algemeen wordt gesteld dat stadsverwarming te prefereren is bij hoge en de elektrische warmtepompboiler bij lage bebouwings- en of warmte-dichtheden. De grenswaarde ligt echter bij lagere bebouwingsdichtheden dan zou kunnen worden afgeleid uit de resultaten van de meeste studies. Dit is met name toe te schrijven aan de volgende factoren:

- * een groter kostenreduktiepotentieel voor warmtedistributie;
- * relatief hogere (meer-)kosten voor elektriciteitsvoorziening;
- * toepassing van stadsverwarming zonder warmteterugwinning uit ventilatielucht (dus ook zonder luchtkanalensysteem).

In ieder van deze gevallen blijkt dat een (drastische) verandering in het vergelijkingsbeeld ontstaat door wijziging van wat vooraf als representatief of optimaal was beschouwd. Dit onderstreept de behoefte aan een evaluatiemethodiek waarmee rekening kan worden gehouden met dit inherent aanwezige probleem en dat toch de mogelijkheid biedt voor het maken van eenduidige keuzen tussen specifieke uitvoeringen van verschillende energieconversie-technieken.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om in het kader van de ontwikkeling van een dergelijke evaluatiemethodiek de volgende acties te ondernemen.

- Uitvoering van een vervolganalyse betrokken op meerdere energiestudies (en rekenmodellen) en gericht op additionele keuzestellingen. Meer in het algemeen wordt aanbevolen om in vervolg op iedere belangrijke energiestudie een diepgaande contra-expertise te laten uitvoeren.
- Het definiëren van een kader waarbinnen de tot standkoming van een algemeen bruikbare evaluatiemethodiek zou kunnen plaatsvinden. Een belangrijke stap in dit proces is het verkrijgen van consensus over de structuur van een dergelijk methodiek.

9 Literatuur

- L.B.B.M. Boels *et al.*,
Syrenestudie Infrastructuur Brandstoffen: Distributie van energiedragers,
Centrum voor Energiebesparing en schone technologie, Delft, 1994.
- H. Bresser, W. van der Veen,
Vergelijking van centrale verwarming met stadsverwarming en kleinschalige
warmtekoppeling,
Ministerie VROM (KEMA-studie), publikatie Lucht 94, juli 1991.
- P.J. Collet,
Perspectiefvolle technieken voor warmte-opwekking ten behoeve van ruimte-
verwarming. Hoe kunnen deze worden geïdentificeerd?
TNO-IMET, Apeldoorn, 1995.
- C. Geuzendam, W. Giljamse,
Assessment of energy efficient technologies for end use in the residential and
the commercial sectors (Syrene-studie),
IVAM Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 1994.
- W.P.C. Mans, L.M. Deuss, W van der Veen,
Lage temperatuur ruimteverwarming,
KEMA, Arnhem, maart 1995
- M.E. Ossebaard, M.T. van Wees, A.J.M. van Wijk,
Duurzame warmtevoorziening; systeemstudie van technologische opties voor
de warmte-infrastructuur,
Universiteit Utrecht (Syrene-studie), Vakgroep Natuurwetenschap en Samen-
leving, Utrecht, 1994a.
- M.E. Ossebaard, M.T. van Wees, A.J.M. van Wijk,
Warmtedistributie; technologieverkenning en gebiedsafhankelijke distributie-
kosten,
Universiteit Utrecht (Syrene-studie), Vakgroep Natuurwetenschap en Samen-
leving, Utrecht, 1994b.
- F.J. Rooijers, G.C. Bergsma, L.B.M.M. Boels, J. Verlinden,
Grootschalige warmtelevering in de bestaande bouw,
Centrum voor Energiebesparing en schone technologie, Delft, 1994.
- M.T. van Wees, M. van Brummelen, A.J.M. van Wijk,
Technologieverkenning warmte- en koudeproductie; conversie en opslag,
Universiteit Utrecht (Syrene-studie), Vakgroep Natuurwetenschap en
Samenleving, Utrecht, 1994.

Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

EnergieNed
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

Namen en functies van de medewerkers:

P.J. Collet Projectleider

Namen en instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

N.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

1 september 1995 - 15 januari 1996

Ondertekening:



P.J. Collet
Projectleider

Goedgekeurd door:

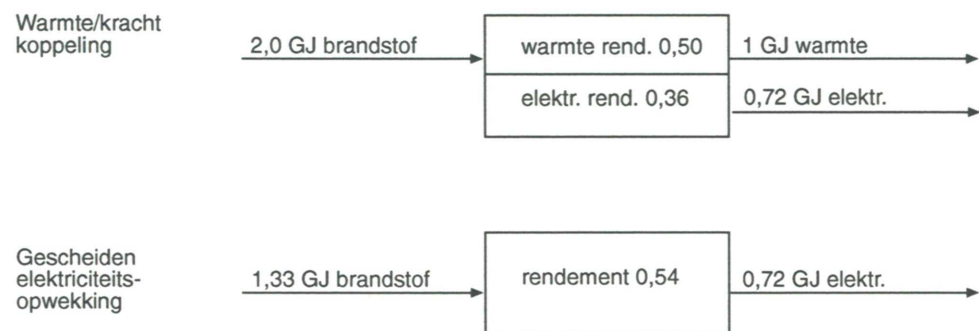


Dr.ir. P. Verlaan
Afdelingshoofd

Bijlage Vergelijkingen tussen energetische en exergetische allocatie van brandstofverbruik aan elektriciteits- en warmte-opwekking bij warmte/kracht koppeling

Berekeningsvoorbeeld gasmotor warmte/kracht koppeling

Energetische allocatie



Specifiek brandstofverbr. voor warmteproductie: $2,0 - 1,33 = 0,67 \text{ GJ}_{br}/\text{GJ}_w$
(bij een rendement van 54% voor gescheiden elektriciteitsopwekking)

Exergetische allocatie

Bij $t_{gem} = 75^\circ\text{C}$ r voor de door de gasmotor WKK geleverde warmte is bij een omgevingstemperatuur van 5°C de exergie/energie verhouding van deze warmte: $(1 - 278/348) = 0,201 \text{ GJ}_{ex}/\text{GJ}_{en}$.

Aan warmteproductie gealloceerd brandstofverbruik:

$$\frac{0,201}{0,72 + 0,201} * 2 = 0,44 \text{ GJ}_{br}/\text{GJ}_w$$

(vergelijk met 0,67 bij energetische allocatie)

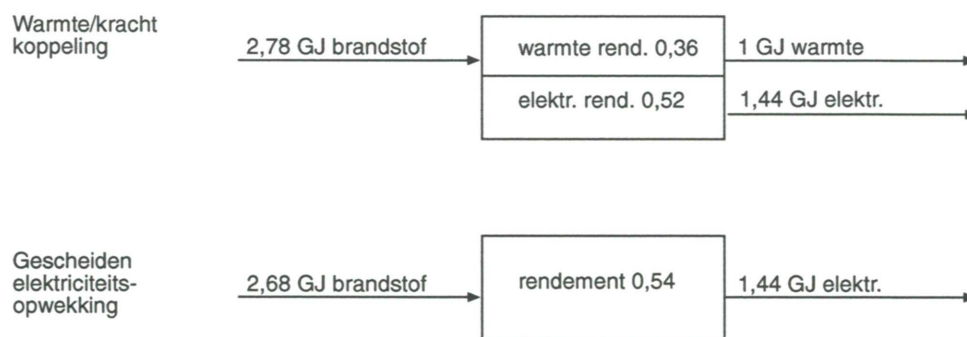
Aan elektriciteitsproductie gealloceerd brandstofverbruik:

$$\frac{0.72}{0.72 + 0.201} * \frac{2}{0.72} = 2.17 \text{ GJ}_{br}/\text{GJ}_e$$

(vergelijk het hiermee overeenkomend opwekkingsrendement van 0,46 met het rendement van 0,54 voor gescheiden opwekking)

Berekeningsvoorbeeld STEG warmte/kracht koppeling

Energetische allocatie



Specifiek brandstofverbr. voor warmteproductie: $2,78 - 2,68 = 0,10 \text{ GJ}_{br}/\text{GJ}_w$
(bij een rendement van 54% voor gescheiden elektriciteitsopwekking)

Exergetische allocatie

Bij $t_{\text{gem}} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ voor de door de STEG WKK geleverde warmte is bij een omgevingstemperatuur van $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de exergie/energie verhouding van deze warmte: $(1 - 278/338) = 0,178 \text{ GJ}_{\text{ex}}/\text{GJ}_{\text{en}}$.

Aan warmteproductie gealloceerd brandstofverbruik:

$$\frac{0,178}{1,444 + 0,178} * 2,78 = 0,30 \text{ GJ}_{\text{br}} / \text{GJ}_w$$

(vergelijk met 0,10 bij energetische allocatie)

Aan elektriciteitsproductie gealloceerd brandstofverbruik:

$$\frac{1,444}{1,444 + 0,178} * \frac{2,78}{1,444} = 1,71 \text{ GJ}_{\text{br}} / \text{GJ}_e$$

(vergelijk het hiermee overeenkomend opwekkingsrendement van 0,58 met het rendement van 0,54 voor gescheiden opwekking)