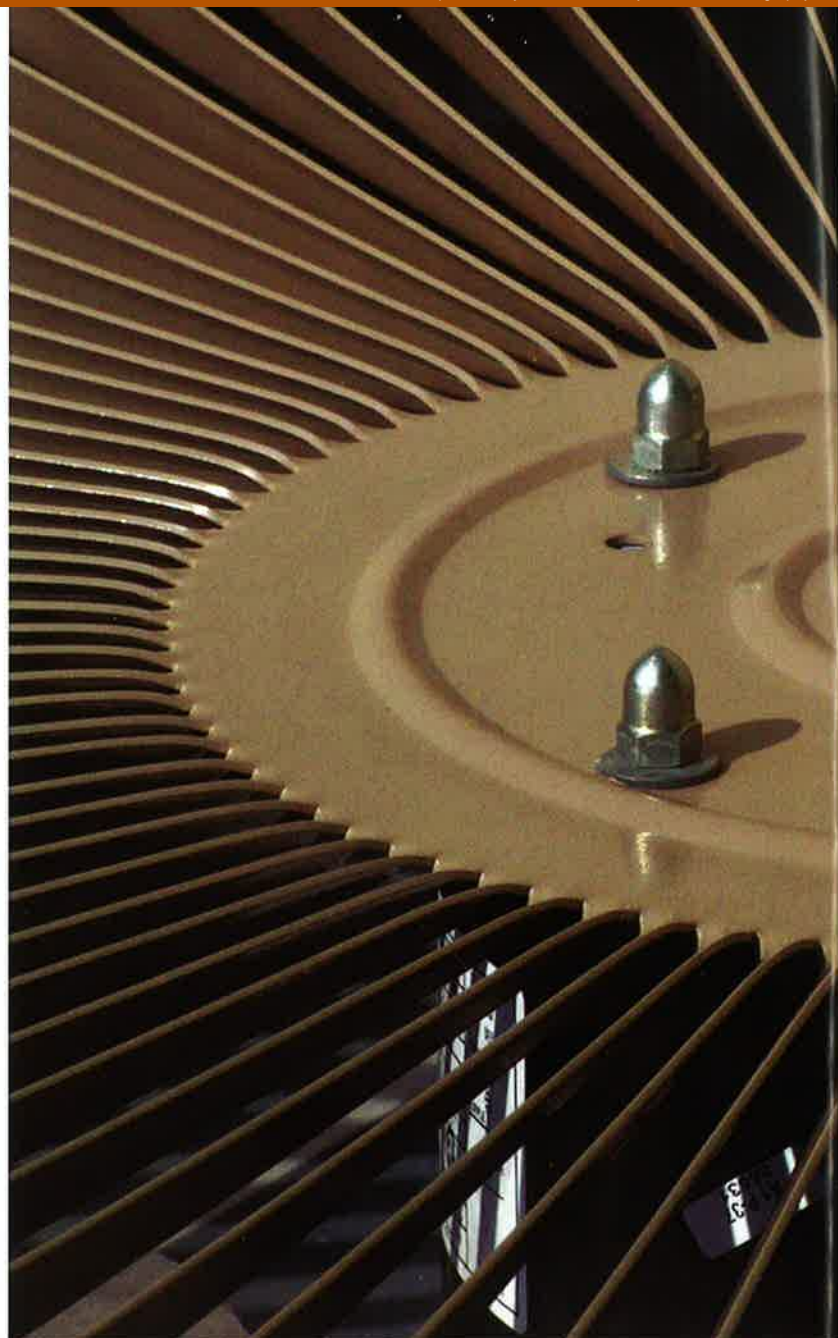


In het kader van het Europese streven naar meer energie-efficiëntie wordt binnen de industrie recent ook aandacht besteed aan het nuttig inzetten (recupereren) van restwarmte.

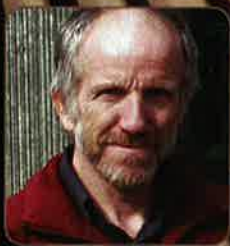
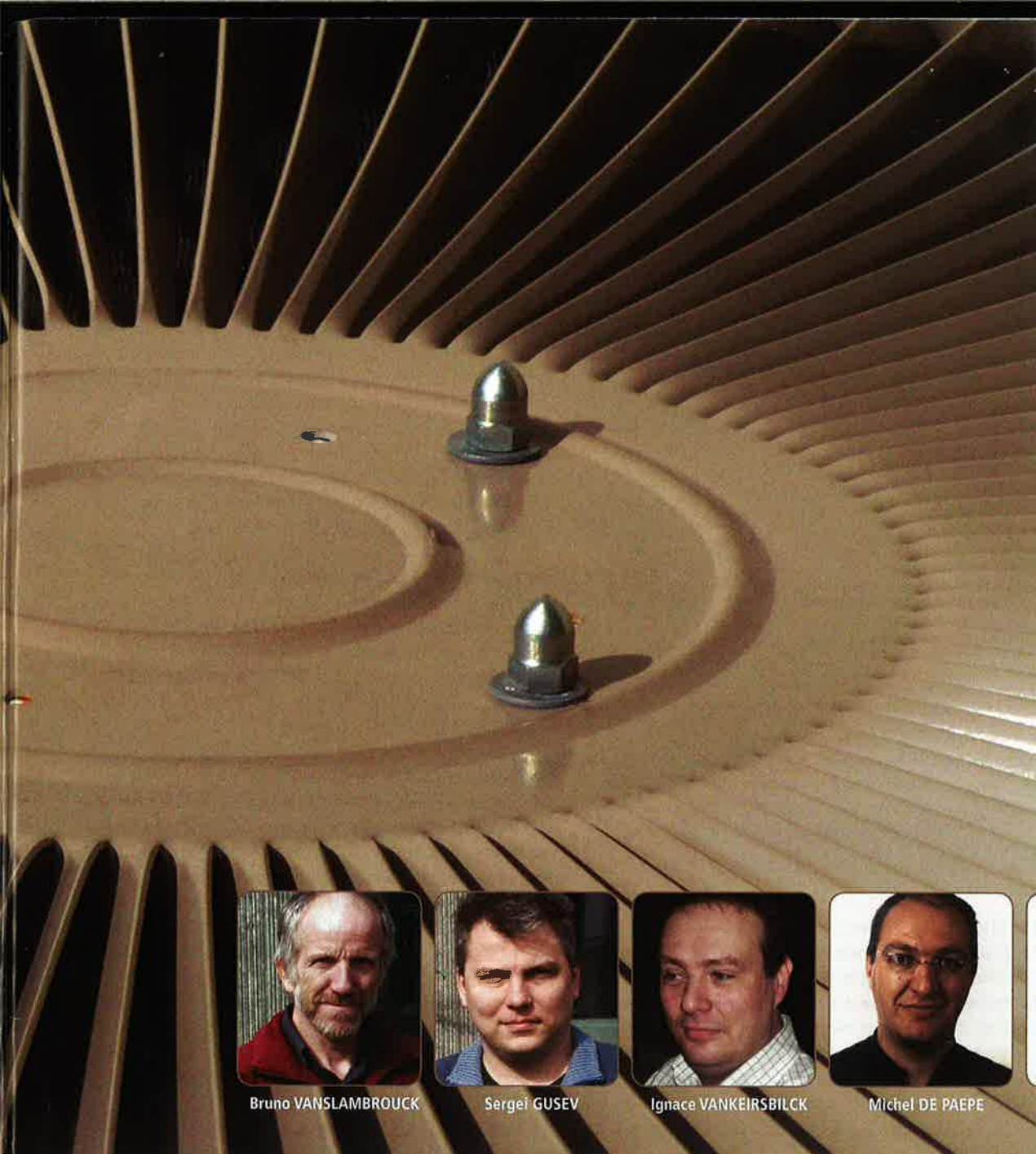
**Bruno Vanslambrouck,
Ignace Vankeirsbilck, Sergei Gusev
Michel De Paepe & Jeroen De Maeyer**



Van Restwarmte naar

Restwarmteproblematiek

Men schat dat er vandaag ongeveer 140TWh aan industriële restwarmte wordt weggekoeld naar de omgeving. De warmte staat vaak op lage temperatuur, waardoor ze als weinig waardevol wordt gepercipieerd. In het kader van het Europese streven naar meer energie-efficiëntie wordt binnen de industrie recent ook aandacht besteed aan het nuttig inzetten (recupereren) van deze restwarmte. In een stappenplan voor energiebeheer wordt het wegkoelen van deze restwarmte de allerlaatste optie. Zoals het stappenplan uit Tabel 1 aangeeft kan dit slechts de allerlaatste stap zijn in de aanpak van de restwarmteproblematiek.



Bruno VANSLAMBROUCK



Sergeï GUSEV



Ignace VANKEIRSILCK



Michel DE PAEPE



Jeroen DE MAEYER

Proceswarmte

AANPAK RESTWARMTEPROBLEMATIEK

- 1 Probeer het ontstaan van restwarmte in een proces te voorkomen
- 2 Probeer restwarmte te recupereren voor gebruik binnen hetzelfde proces
- 3 Recupereer restwarmte voor hergebruik binnen andere processen, binnen of zelfs buiten de onderneming. Creëer een warmtenetwerk
- 4 Transformeer restwarmte naar een bruikbaar temperatuurniveau of een andere energievorm
- 5 Koel restwarmte weg naar de omgeving

De eerste drie stappen richten zich op intensief hergebruik. Pas indien deze mogelijkheden onmogelijk blijken of uitgeput zijn, zijn er een aantal technologieën aan de orde die het mogelijk maken om de restwarmte te transformeren naar een andere energievorm waaronder koude, elektriciteit en proceswarmte. Tabel 2 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 2:
Mogelijkheden
omvorming
restwarmte naar
andere energievorm

VAN RESTWARMTE NAAR KOUDE
Ab- en adsorptiekoeling: voor restwarmte vanaf $\pm 70^{\circ}\text{C}$
Stoomejectorkoeling: restwarmte en een kleine hoeveelheid stoom vereist

VAN RESTWARMTE NAAR ELEKTRICITEIT
Stoomturbine-installatie (Rankine Cyclus): voor restwarmte, hoger dan $\pm 400^{\circ}\text{C}$ en voldoende groot debiet (vanaf ± 10 MWth), commercieel beschikbaar
Organische Rankine Cyclus (ORC): voor restwarmtestromen op lagere temperatuur en/of lager debiet. Commercieel beschikbaar, aanbod breidt uit.
Stirlingmotor: te klein en/of experimenteel voor industrieel gebruik
Thermo Akoestische Generator (TAG): experimenteel

VAN RESTWARMTE NAAR PROCESWARMTE (VERHOGEN TEMPERATUURSNIJVEAU)
Compressiewarmtepomp (meest verspreide type)
Andere warmtepompprincipes als de absorptiewarmtepomp, chemische warmtepomp, hybride warmtepomp (combinatie compressie- en absorptiewarmtepomp), **mechanische dampcompressie** (open warmtepomp)...

Organische Rankine Cyclus

De Onderzoeksgroep Thermodynamica van Howest voert al sedert geruime tijd onderzoek uit naar de technologie en toepassingsmogelijkheden van ORC. Een ORC wordt schematisch weergegeven op figuur 1. De restwarmte wordt gebruikt om een medium op te warmen en te verdampen (6-1). Het bekomen gas wordt geëxpandeerd over een expander (1-2) die een generator aandrijft. Daar het werkmedium na expansie nog oververhit is, wordt er vooraleer te condenseren warmte gerecupereerd om de vloeistof na de condensor voor te verwarmen (2-3 en 5-6). Na condenseren in de condensor wordt de druk weer opgebouwd via de voedingspomp (3-4-5).

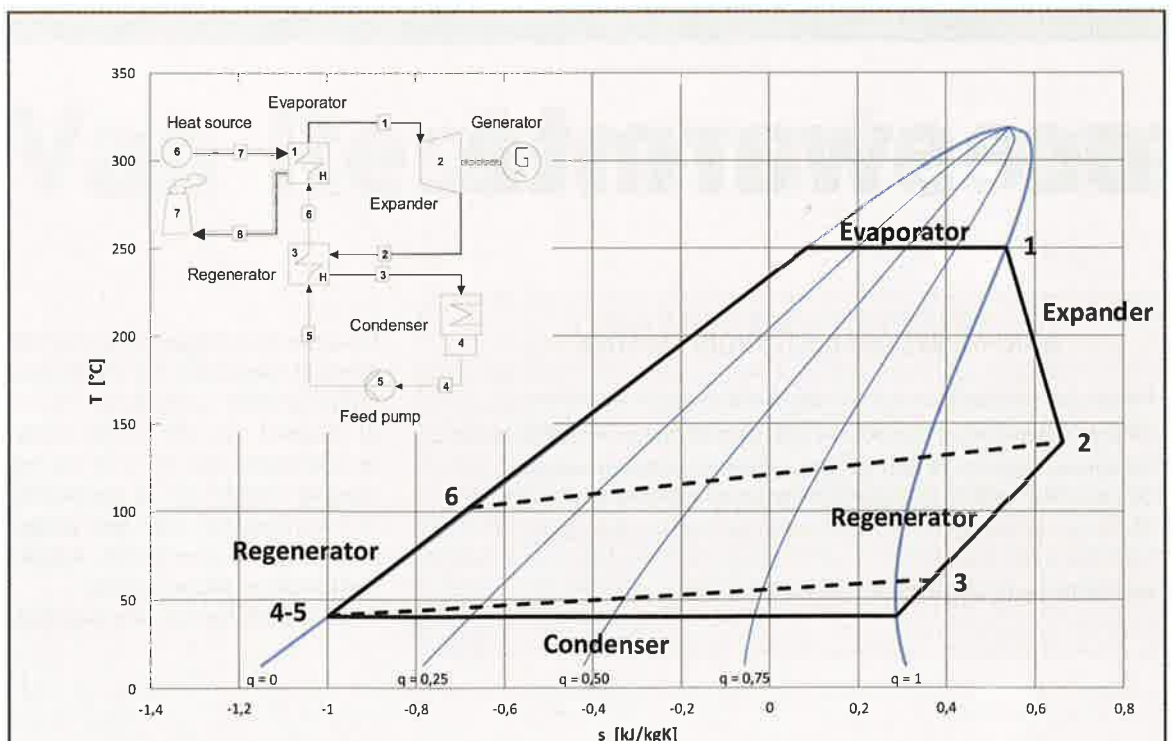
De belangrijkste onderzoeksresultaten vandaag zijn:

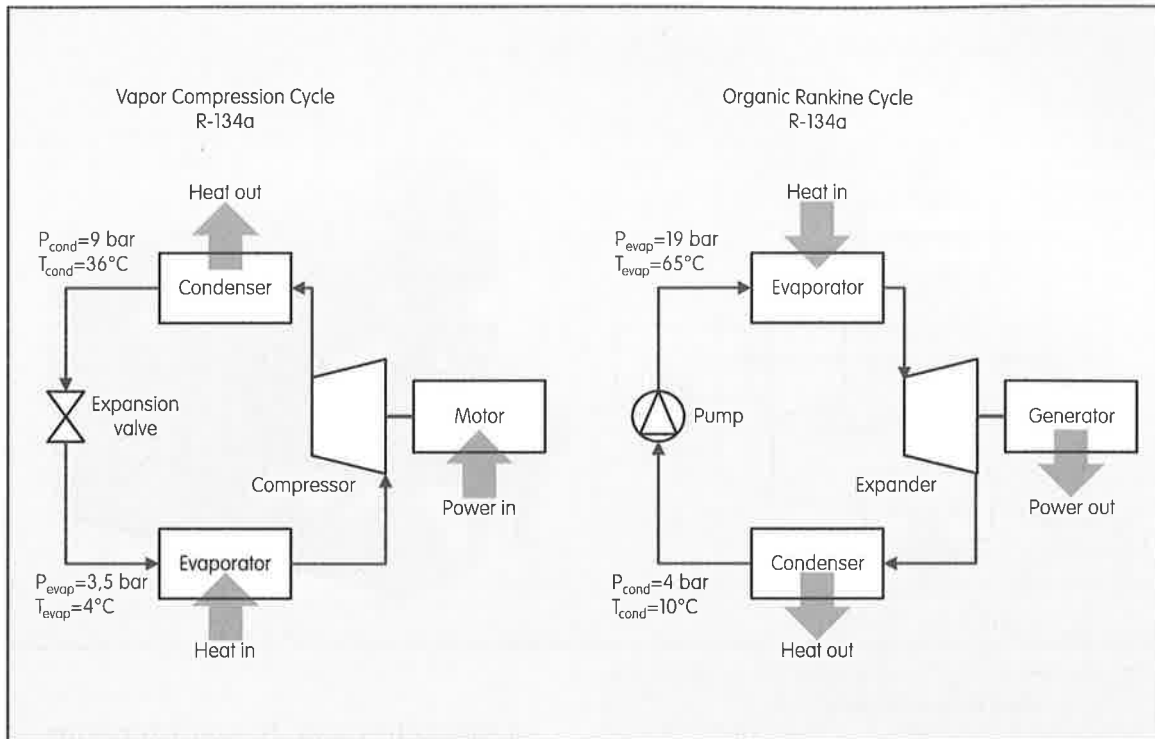
Een terugverdientijd van 3 jaar of korter is realiseerbaar indien het hernieuwbare restwarmte betreft (bijvoorbeeld uitlaatwarmte van biogas- of stortgasmotoren). Dit vanwege de ondersteuning met Groenestroomcertificaten. Bij grotere projecten is ook het gebruik van een stoomturbine-installatie mogelijk.

Een internal rate of return (IRR), groter of gelijk aan 15% is soms haalbaar bij gebruik van niet hernieuwbare warmte. Dit is sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs (vermeden inkoop) en de complexiteit van de inpassing. Het omzettingrendement restwarmte naar elektriciteit wordt bepaald (en beperkt) door het temperatuurniveau van de restwarmte en natuurlijk het type ORC, de uitvoeringswijze en andere randvoorwaarden (bv. werkmedium, condensortemperatuur...). Algemeen geldt wel dat hoe lager de temperatuur van de aangeboden restwarmte is, hoe lager het cyclusrendement zal zijn. Dit varieert van ongeveer 5% voor restwarmte op 85°C tot maximaal $\pm 23\%$ voor restwarmte vanaf 300°C .

Dit artikel gaat dieper in op twee van de hierboven beschreven technologieën. Enerzijds de Organische Rankine Cyclus waarmee restwarmte wordt getransformeerd in elektriciteit en de industriële warmtepomp waarbij restwarmte wordt opgewaarderd tot proceswarmte. Deze koppeling, daar beide technologieën nauw met elkaar verwant zijn.

Figuur 1: Schema ORC en voorstelling op T-s diagram





Figuur 2:
Koelmachine,
'omgekeerd'
tot ORC

Vooral het heel lage cycluserendement bij gebruik van restwarmtebronnen, met een temperatuur lager dan 100°C is opvallend. Dit houdt in dat er naast een beperkte hoeveelheid elektriciteit nog een bijna even grote restwarmtestroom op nog veel lagere temperatuur blijft bestaan. Het restwarmteprobleem is dus slechts ten dele opgelost, betere valorisatiemogelijkheden zouden in dit geval welkom zijn.

Industriële warmtepompen

Een **Hoge Temperatuur Industriële Warmtepomp (HT IWP)** kan de temperatuur van restwarmte opdrijven met als doel bruikbare proceswarmte te bekomen. Een warmtepomp kan gezien worden als een omgekeerde ORC, waarbij er vermogen wordt toegevoerd aan de cyclus via een motor om warmte op te waarderen.

Warmtepompen vinden stilaan hun intrede voor woningverwarming. Dergelijke toestellen leveren water aan 30-45°C voor bv. vloerverwarming en onttrekken hiervoor warmte aan de omgeving. Een HT IWP is een warmtepomp die groter is dan de types voor residentieel gebruik en warmte kan leveren op een temperatuurniveau vanaf 65-70°C. Er zijn industriële warmtepompen op de markt met een verwarmingsvermogen in de MW-range, het uitgaande temperatuurniveau is momenteel echter beperkt tot 80 à 90°C.

Er zijn twee grote uitdagingen of vragen bij industriële warmtepompen:

- ① Hoe kan restwarmte worden opgewaardeerd tot op een temperatuurniveau van meer dan 90°C?
- ② Hoe kan de warmtepomp rendabel worden ingezet?

Hoe een hoge temperatuur warmtepomp realiseren?

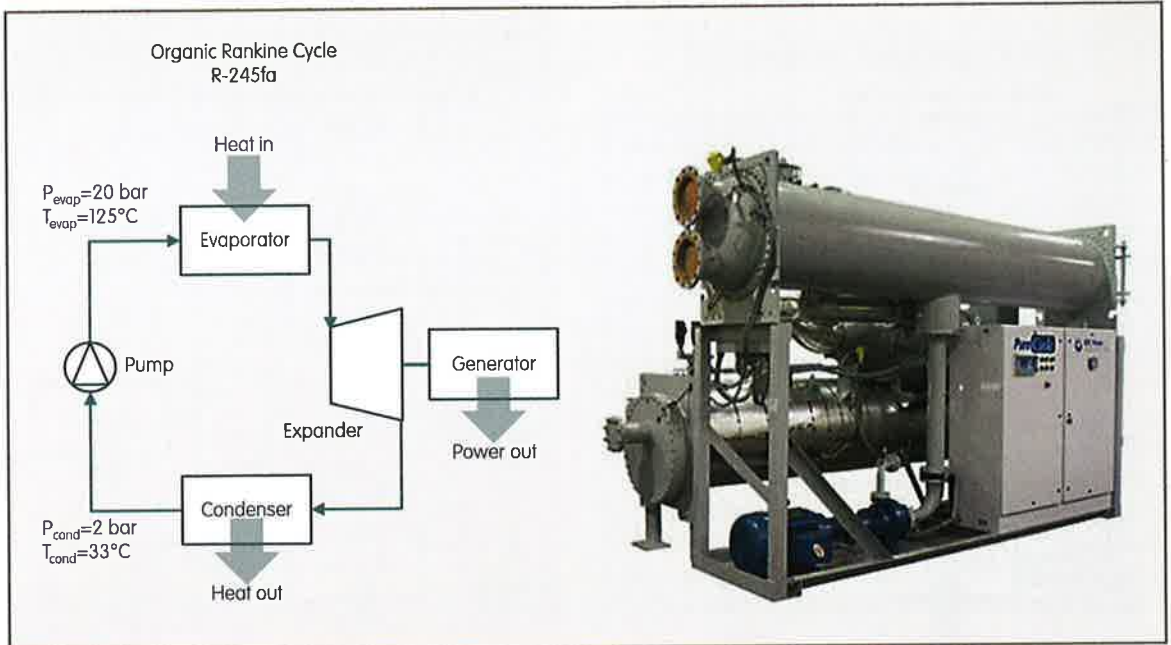
Vanuit het ORC-onderzoek bleek dat een aantal ORC's ontwikkeld zijn vanuit bestaande koelmachines die werden 'omgekeerd'. Figuur 2 (rechts) toont hiervan een voorbeeld. De hier voorgestelde ORC kan warmte van ongeveer 75-85°C verwerken als er op voldoende lage temperatuur (10°C) kan gecondenseerd worden. Het is in wezen een omgekeerde ijswatermachine (figuur 2, links), waarbij het drukniveau tot tegen de maximum limiet verhoogd werd.

Door het medium R-134a te vervangen door bv. R-245fa (speciaal ontwikkeld voor lage temperatuur ORC's) kunnen de temperatuurniveaus zowel aan verdampers- als aan condensorzijde opgedreven worden. Zo ontstond de bekende 'PureCycle 280' van Pratt & Whitney, afgeleid van een Carrier-ijswatermachine (figuur 3).

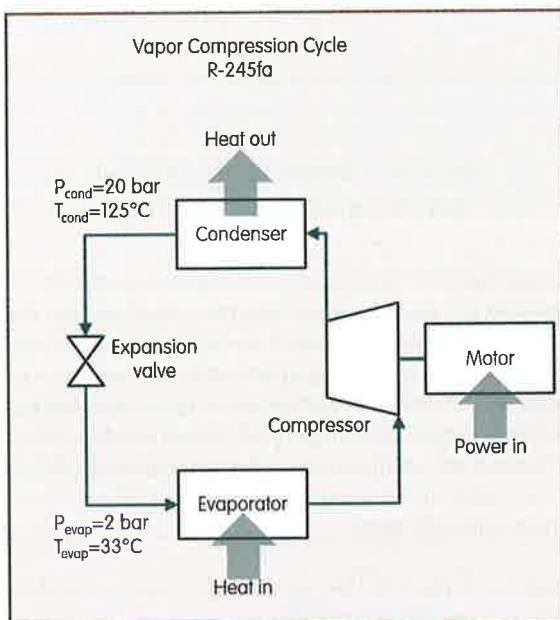
Door de koelmachine nu echter niet om te keren, maar het juiste werkmedium, de drukniveaus en drukverhoudingen goed te kiezen, kan men warmtepompen realiseren die bij aanzienlijk hogere temperatuurregimes kunnen werken in vergelijking met het huidige markt-aanbod. Binnen het ORC-onderzoek zijn diverse media bestudeerd die zich hiertoe kunnen lenen.

In het voorbeeld van de PureCycle 280 zou men, met behoud van het medium R-245fa zoals gebruikt in ORC-regime, restwarmte van 40-50°C kunnen opwaarderen tot proceswarmte op 110-115°C. Zie figuur 4.

Figuur 3:
De PureCycle 280
(links: schema,
rechts: machine)



Figuur 4:
De PureCycle 280
als hoge tempera-
tuur warmtepomp



Prestatiefactor

De energieprestatie van een warmtepomp wordt vastgelegd door een prestatiegetal, best gekend onder de benaming "Coefficient of Performance" of COP. Dit is de verhouding tussen de uitgaande warmtestroom Q en het benodigde aandrijfvermogen P , geleverd via de motor. De in theorie hoogst haalbare COP is gelijk aan deze van de Carnot-cyclus en wordt gelinkt aan de temperatuurniveaus waartussen de warmtepomp werkt. Beschouw als rekenvoorbeeld het geval waarbij restwarmte op 30°C beschikbaar is en proceswarmte op 80°C gevraagd wordt. De COP volgens een Carnot-cyclus $= 353\text{K}/(353\text{K}-303\text{K}) = 7$. Verliezen allerhande en noodzakelijke temperatuursverschillen bij gebruik van warmtewisselaars binnen de cyclus zorgen er voor dat in de huidige praktijk slechts 50 tot 60% van de Carnot-COP haalbaar is. In het rekenvoorbeeld dus een COP = 3,5 à 4,2 als een realistische waarde.

Aandrijving van de warmtepomp

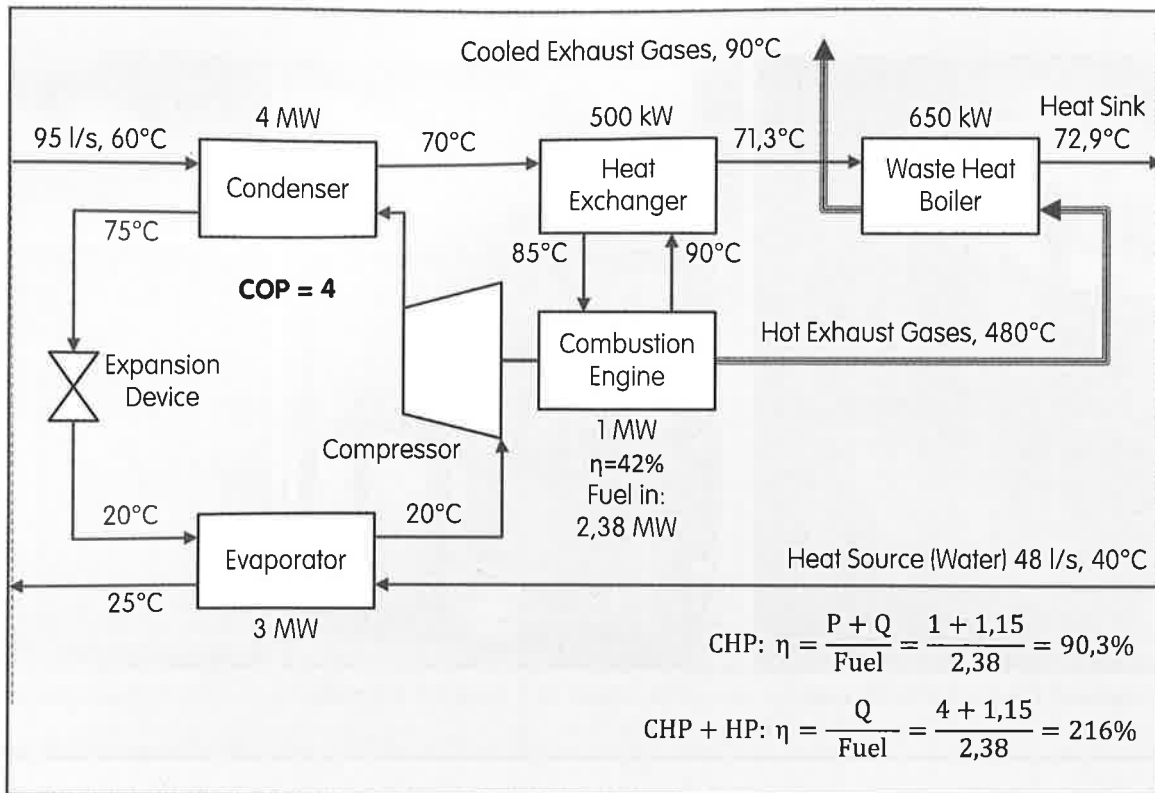
Warmtepompen worden doorgaans elektrisch aangedreven. Als met een gemiddeld omzettingrendement van 40% gerekend wordt voor elektriciteitsproductie, kan via het gebruik van een warmtepomp primaire energie bespaard worden als de COP minstens 2,5 bedraagt. Er wordt echter slechts op energiekosten bespaard indien de COP hoger is dan de verhouding elektriciteitsprijs/warmteprijs. Deze bedraagt in de industrie 2 tot 4, afhankelijk van aankooprijzen energie en of men als warmteprijs de brandstofprijs of de productieprijs van warm water of stoom hanteert.

Het probleem van de ongunstige verhouding elektriciteit/warmte-prijs kan omzeild worden door de warmtepomp aan te drijven via een thermische machine (verbrandingsmotor of gasturbine). Men kan dan zelfs de restwarmte van deze machine (bv. de uitlaatwarmte en de motorkoeling) integreren in het proces. Hierdoor dient de warmtepomp niet de volledige gewenste warmtestroom te leveren en dient deze ook niet de volledige temperatuurslift te realiseren, wat de COP ten goede komt. Onderstaande schema's (fig. 5 en 6) illustreren deze werkwijze.

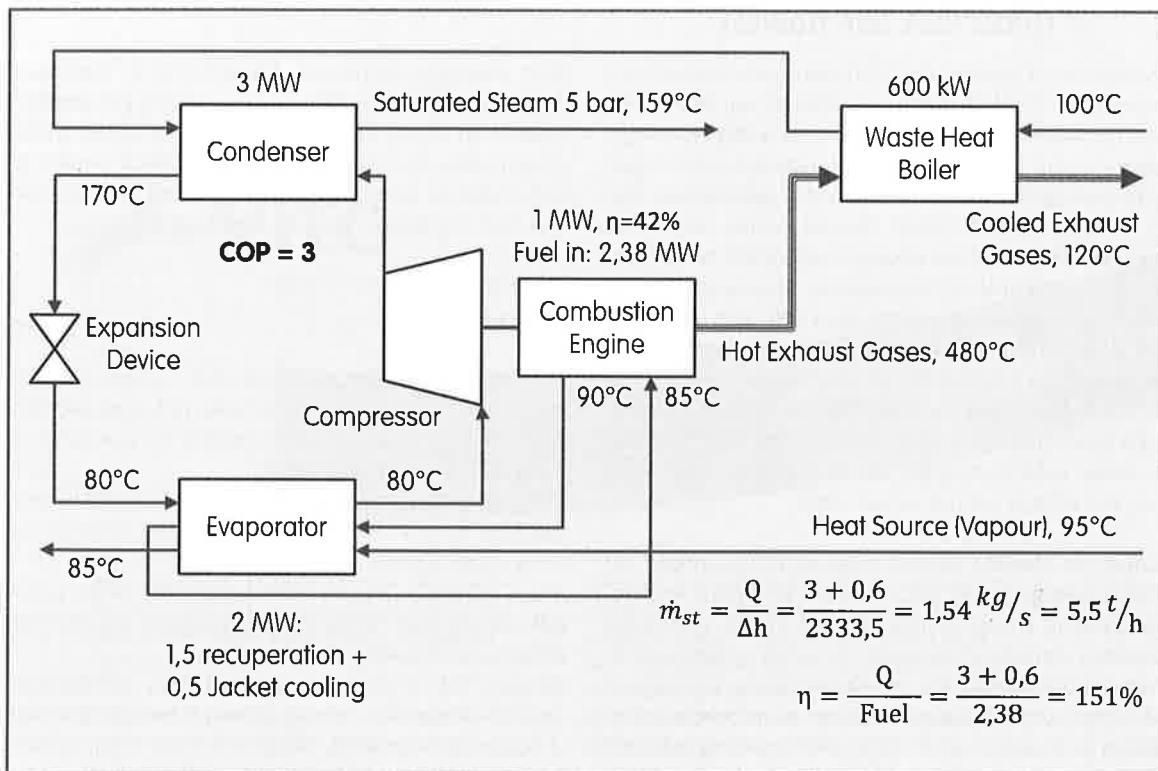
Op Figuur 5 wordt aangetoond dat een warmtepomp-gasmotorcombinatie die (anders verloren) warmte onttrekt uit (afval)water van 40°C en proceswater verwarmt van 60 naar 73°C kan beschouwd worden als een "ketel" met een "rendement" gelijk aan 216%. Dit is realiseerbaar met bestaande industriële warmtepompen.

Op Figuur 6 is een gelijkaardige oefening gemaakt voor een veel voorkomende situatie binnen de voedingsindustrie. Er wordt condensatiewarmte gerecupereerd uit dampen en opgevaardeerd tot lage druk processtoom ($5\text{bar}-160^\circ\text{C}$), bruikbaar voor allerhande kookprocessen (of eventueel nog iets hogere temperatuur voor opwarming frituurolie).

De warmtepomp op deze figuur is vandaag echter een theoretisch gegeven en dient nog te worden ontwikkeld.



Figuur 5: Warm water productie via een warmtepomp-gasmotorcombinatie



Figuur 6: Stoomproductie via een warmtepomp-gasmotorcombinatie

Economische haalbaarheid

Een warmtepomp-gasmotorcombinatie zal aanzienlijk duurder zijn dan een ketel en ook de onderhoudskosten zullen hoger oplopen. Daar tegenover staat een potentiële brandstofbesparing van 25 tot 60%. Het geheel is ook als "warmtekrachtkoppeling" te beschouwen, waardoor er in Vlaanderen wkk-certificaten kunnen bekomen worden.

Vanuit de veronderstelling dat een HT IWP ongeveer tegen dezelfde prijs zou kunnen bekomen worden als een even grote ORC en een realistische inschatting van de overige kosten en opbrengsten, werd nagerekend dat een IRR van 15% haalbaar is voor het geval van stoomproductie (figuur 6). Warm waterproductie via deze methode (figuur 5) zou een nog gunstiger resultaat opleveren vanwege de hogere brandstofbesparing. Dit biedt alvast perspectieven.



Heat source: Thermal oil boiler 250kW, Maxxtec



ORC, 10kWe, BEP-Europe E-Rational



Cooling loop

Figuur 7: Demo- en testopstelling ORC van Howest met 10 kWe BEP-Europe ORC

Onderzoek aan Howest

Via een recent goedgekeurd Europees onderzoeksproject binnen het CORNET-frame, op initiatief van Howest en in samenwerking met UGent, wordt de uitdaging aangegegaan om aan te tonen dat de voorgestelde oplossingen in de praktijk technisch en economisch realiseerbaar zijn. In verband met ORC heeft Howest immers een ruime technologische kennis opgebouwd vanuit twee door het IWT gesteunde TETRA-projecten. Daarnaast zal, met behulp van de test- en demostand ORC (fig. 7) een HT WP gedemonstreerd worden, eventueel via ombouw van de aanwezige 10 kW ORC, ontstaan uit een gezamenlijk IWT-project met BEP-Europe (Brugge). Ook met thermische machines (wkk) heeft Howest heel wat ervaring. Er is een didactisch uitgeruste wkk met aardgasmotor van 288 kWe in gebruik sedert 1995.

Binnen de Vlaamse Gebruikersgroep zijn voorlopig een 25-tal bedrijven en organisaties vertegenwoordigd, van waaruit 8 case studies uit heel diverse industriële sectoren aangebracht werden. Er wordt samengewerkt met Duitsland, waar PTS (Papiertechnische Stiftung) uit München vooral de integratie binnen papierproductieprocessen zal uitwerken en PFI (Prüf- und Forschungsinstitut) uit Pirmasens zich naar de biogassector zal richten. Ook daar is er nog een lokale Gebruikersgroep.

Besluit

Binnen dit artikel werd voorgesteld hoe men via de inzet van warmtepompen, restwarmte kan valoriseren door deze op een hoger temperatuurniveau te brengen en als proceswarmte te hergebruiken. Voor uitgaande temperaturen tot $\pm 90^{\circ}\text{C}$ kunnen hiervoor bestaande industriële warmtepompen gebruikt worden.

Voor hogere temperaturen, tot zelfs 200°C , werd aangegeven hoe deze zouden kunnen ontwikkeld worden. Howest en UGent zullen hierbij de daad bij het woord voegen door binnen een Europees CORNET project de technische en economische haalbaarheid te onderzoeken, met hopelijk een gunstig resultaat.

Referenties

- Lambauer, J.; Fahl, U.; Ohl, M.; Blesl, M.; Voß, A.: Forschungsbericht: Industrielle Großwärmepumpen -Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Juli 2008.
- Jakobs, R.: Status and Outlook: Industrial Heat Pumps. 3rd EHPA European Heat Pump Forum, Brussels, 20.05.2010. Information Centre on Heat Pumps and Refrigeration, Germany.
- Andrew McMullan, A.: Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings. A Best Practices Steam Technical Brief. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003.
- Markussen, C.M.; Ommen, T.S.: Industrial Heat Pumps, Optimization and Application. Master thesis, Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Section of Thermal Energy Systems, September 2010.
- Love, C.: Industrial Heat Pumps for Low-Temperature Heat Recovery. Washington State University Extension Energy Program, Olympia, Washington, 2009.
- Lewis, N.: Case Studies of Waste Heat Driven Industrial Heat Pumps. Master thesis, The North Carolina State University Industrial Assessment Center, dept of Mechanical Engineering, Raleigh, NC, 2007.
- Shi-jie Liu; Wu Chen; Zhen-xiöng Cai; hao-yu Zheng: Study on the Application of High Temperature Heat Pump to Recover Waste Heat of Marine Diesel Engine. Inst. of Marine Eng., Jimei Univ., Xiamen, China. In: Energy and Environment Technology, 2009.

De auteurs

Bruno Vanslambrouck doceert thermodynamica en andere energiegerelateerde vakken binnen de academische bachelor en masteropleidingen van Howest, De Hogeschool West-Vlaanderen. Als coördinator van de Onderzoeksgroep Thermodynamica initieert en leidt hij tevens onderzoeksprojecten binnen dit domein, dit in een nauwe samenwerking met de onderzoeksgroep van prof. Michel De Paepe, UGent. Bruno.vanslambrouck@howest.be; www.howest.be; www.orcycle.eu

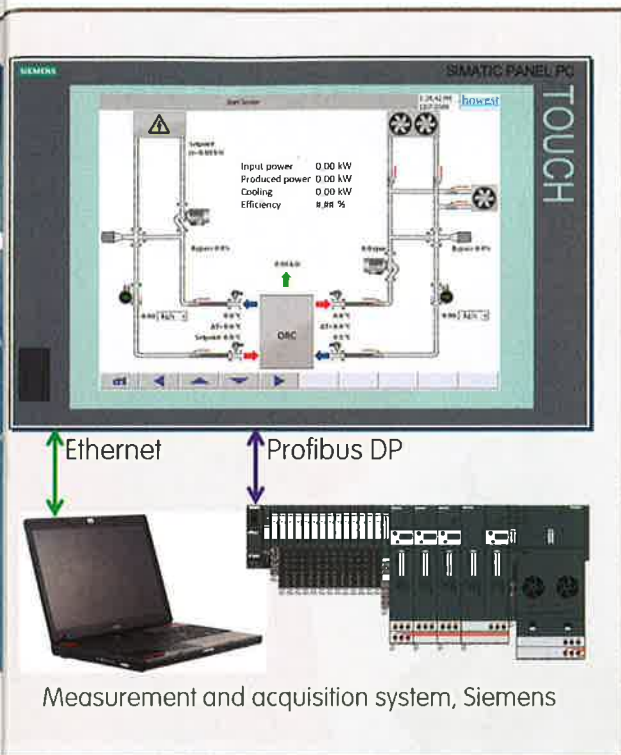
Ignace Vankeirsbilck en Sergei Gusev zijn beiden projectmedewerker binnen de Onderzoeksgroep Thermodynamica van Howest. Momenteel werken zij aan het IWT-TETRA-project 'Restwarmterecuperatie via een Organische Rankine Cyclus'.

Michel De Paepe is professor aan de Universiteit Gent, faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, waar hij de onderzoeksgroep Technische Thermodynamica en Warmte-overdracht leidt. Hij is tevens coördinator van de post-academische opleiding Energie-efficiëntie in de Industrie aan het Instituut voor Permanente Vorming van de Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur en de Faculteit Bio-Ingenieurswetenschappen van de Universiteit Gent.

Michel.depaepe@ugent.be

Jeroen De Maeyer is IOF-mandaathouder aan de Universiteit Gent, gekoppeld aan het consortium Sustainable Energy Technologies. In die functie coördineert hij het valoriseerbaar onderzoek van AUGent-onderzoeksgroepen die onderzoek verrichten in het domein van hernieuwbare energietechnologie.

jeroen.demaeyer@ugent.be, www.set.ugent.be



Measurement and acquisition system, Siemens



VITO is een toonaangevend Europees, onafhankelijk onderzoeks- en adviescentrum, dat innovatieve technologieën en wetenschappelijke kennis praktisch toepasbaar maakt voor overheden en industrie.

VITO is actief in milieu-, energie- en materiaaltechnologie, industriële productie- en proces-technologieën en aardobservatie.

VITO levert intelligente en kwalitatieve oplossingen waar grote en kleine bedrijven concurrentieel voordeel uithalen, en objectief onderzoek, studies en adviezen, die industrie en overheden in staat stellen hun toekomstbeleid te bepalen.

VITO's onderzoek vindt zijn toepassing in nieuwe, efficiënte en goedkopere productietechnologieën, verminderd energieverbruik, biomaterialen, gezondheidszorg, milieuzorg enz., alsook het in kaart brengen en monitoren van de effecten van klimaatwijziging. Hierbij zijn het vrijwaren van het leefmilieu en het duurzaam gebruik van energie en grondstoffen steeds prioritair.

VITO's onderzoekscentrum is gevestigd in Mol, met satellietkantoren in Berchem en Oostende.

VITO telt circa 600 hooggekwalificeerde medewerkers uit diverse specialismen en werkt samen met sectorfederaties en hun onderzoekscentra, universiteiten en hogescholen, Europese onderzoeksinstituten, ...

VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL
Voor meer informatie, neem vrijblijvend contact op met Kristine Verheyden
Tel. + 32 14 33 55 53
Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be