

Warmte-integratie in de industrie

Nederlandse versie

26-5-2021

ISPT: Annita Westenbroek/ Agata van Oosten/ Christa de Ruyter

Met input van Marit van Lieshout (Hogeschool Rotterdam), Fons Pennartz (KWA), Aaldrik Haier (Water & Energy solutions), Egbert Klop (Blue Terra) Jan Grift (BlueTerra)



**Institute for
Sustainable
Process Technology**



Publiek eindrapport

Publiek eindrapport.....	2
1. Samenvatting.....	3
2. Introductie.....	4
2.1 Uitgangspunten.....	4
2.2 Doelstelling.....	4
3. Bouwstenen voor industriële casussen voor elektrificatie van warmte	5
3.1 Mogelijke bouwstenen voor warmteterugwinning	5
3.2 Bouwstenen opwaarderen van restwarmte.....	7
3.3 Samenvatting bouwstenen.....	9
4. Toepassing van warmte-integratie: Een vergelijking met de status quo	11
5. Knel- en leerpunten	12
5.1 Hoge temperatuurliften bemoeilijken business cases	12
5.2 WKKs beperken sterk de mogelijkheid voor toepassing van een warmtepomp	13
5.3 Onzekerheid overheidssteun op Capex en Opex	13
5.4 Kennislacunes bij adviseurs – Pinch-analyses zijn essentieel.....	13
5.5 Werkelijke kosten voor warmtepompen en systeem lastig vast te stellen	13
6. De oplossingsroutes.....	14
6.1 Neem een systeembenadering	14
6.2 Kijk niet alleen naar warmtestromen en het energieverbruik	14
6.3 Volg en reflecteer ontwikkelingen in technologie en energie- en CO2- prijzen.....	14
6.4 Werk samen in het verkrijgen van inzicht in daadwerkelijke kosten	14
6.5 Realiseer een gedegen kennisbasis	15
6.6 Stel een MeerJarenOnderhoudsPlan (MJOP) op	15
6.7 Stel een roadmap CO2-reductie op en creëer draagvlak	15
7. Conclusie en vervolgonderzoek	16
7.1 Conclusie	16
7.2 Vervolgonderzoek en ontwikkeling.....	17
8. Acknowledgement	17
9. Partners	17



1. Samenvatting

De warmtevoorziening voor alle temperatuurniveaus moet volledig CO₂-vrij zijn in 2050. Om dit te realiseren zijn twee ontwikkelingen nodig. Enerzijds zal de warmtevraag drastisch gereduceerd zijn door de toepassing van efficiënte processen. Anderzijds zal de restvraag ingevuld moeten worden met duurzame bronnen. Om deze doelstelling te bereiken is voor 2030 een tussendoel gesteld. Dan moet door power-to-heat oplossingen en inzet van duurzame warmtebronnen minimaal 5,3 Mton CO₂-emissiereductie en een energiebesparing van 93 PJ bereikt zijn.

De industrie staat hier voor een grote opgave. Om de besparingen te realiseren is een versnelde integratie nodig van warmte-innovaties. Dit rapport richt zich op het onderzoeken van de kenmerken van mogelijke oplossingsroutes voor warmte-integratie en elektrificatie van warmte in de industrie, en hoe deze kenmerken de besluitvorming beïnvloeden t.a.v. keuze voor specifieke oplossingsrichtingen. Het gepresenteerde onderzoek heeft nieuwe kennis opgeleverd die ertoe bijdraagt dat het bedrijfsleven beter in staat is om complexe keuzes te maken tussen verschillende technologische opties. Dit leidt tevens tot een betere focus in R&D om deze oplossingsroutes verder uit te werken en te komen tot de uiteindelijke realisatie.

Voor drie industriële warmte-integratie cases (DS Smith Paper, Corbion en Nouryon) is onderzoek gedaan naar mogelijke oplossingsroutes door KWA, BlueTerra, Water&Energy Solutions en Hogeschool Rotterdam en de industriële leden van het ISPT warmte-integratieplatform. Het onderzoek heeft geleid tot een grote variëteit van mogelijke technische scenario's. Voor deze verschillende technologische scenario's zijn de relevante kenmerken in kaart gebracht: technologische complexiteit, benodigde investeringen, ingrijpen in proces en product, benodigde wijzigingen in energie-infrastructuur, subsidie-instrumentarium, wijzigingen in processturing, opleiding, timing, etc.

Dit proces heeft inzicht verschaft in de knelpunten van de verschillende oplossingen. Het heeft ook geleid tot inzicht in de knelpunten die in het algemeen gelden:

- Hoge temperatuurliften bemoeilijken business cases
- WKKs beperken sterk de mogelijkheid voor toepassing van een warmtepomp
- Onzekerheid gecombineerde overheidssteun op Capex en Opex
- Kennislacunes bij bedrijven en adviseurs – pinch analyses zijn essentieel
- Werkelijke kosten voor warmtepompen en systeem zijn lastig vast te stellen

Daarnaast heeft het onderzoek geleid tot leerpunten, aandachtspunten en aanbevelingen voor de bedrijven om realisatie van warmte-integratie te bevorderen:

- Een efficiënte toekomstbestendige oplossing vereist een systeembenadering
- Kijk niet alleen naar warmtestromen en het energieverbruik
- Volg en reflecteer op ontwikkelingen in technologie en energie- en CO₂-prijzen
- Werk samen in het verkrijgen van inzicht in daadwerkelijke kosten
- Een gedegen kennisbasis is cruciaal
- Stel een MeerJarenOnderhoudsPlan op
- Stel een roadmap CO₂-reductie op en creëer draagvlak



2. Introductie

2.1 Uitgangspunten

De warmtevoorziening voor alle temperatuurniveaus moet volledig CO₂-vrij zijn in 2050. Om dit te realiseren zijn twee ontwikkelingen nodig. Enerzijds zal de warmtevraag drastisch gereduceerd zijn door de toepassing van efficiënte processen. Anderzijds zal de restvraag ingevuld moeten worden met duurzame bronnen. Om deze doelstelling te bereiken is voor 2030 een tussendoel gesteld. Dan moet door power-to-heat oplossingen en inzet van duurzame warmtebronnen minimaal 5,3 Mton CO₂-emissiereductie en een energiebesparing van 93 PJ bereikt zijn. Dit is doelstelling zoals beschreven in het Klimaatakkoord.

Om bovengenoemde besparingen te realiseren moet gewerkt worden aan een circulair systeem met een maximale toepassing van beschikbare warmte. De focus moet hiervoor komen te liggen op het opwaarderen van restwarmte in plaats van emitteren naar het milieu. In een divers aantal projecten wordt reeds gewerkt aan duurzame technologieën en concepten.

De ontwikkeling van technieken en apparaten voor warmte-integratie is in de afgelopen jaren in een stroomversnelling gekomen. Er zijn bijvoorbeeld in ISPT en TNO projecten nieuwe technologieën en componenten ontwikkeld. Dit heeft ook buiten de R&D-projecten om zijn effect gehad. Zo brengen toeleveranciers inmiddels vele warmte-integratietechnologieën op de markt.

2.2 Doelstelling

Desondanks loopt het geen storm bij de implementatie. De belangrijkste vraag van onderliggend project is: Wat houdt bedrijven tegen? En wat zou er gedaan moeten worden om warmte-integratie in de industrie te versnellen?

Het uiteindelijke doel is een versnelde toepassing van relevante technologieën en concepten die de omslag kunnen maken naar een 100% CO₂-vrij warmtesysteem. Het onderliggende onderzoek heeft hiertoe inzicht verkregen in:

- De kenmerken van verschillende oplossingsroutes voor industriële casussen voor warmte-integratie / elektrificatie van warmte (technologische complexiteit, benodigde investeringen, ingrijpen in proces en product, benodigde wijzigingen in energie-infrastructuur, wijzigingen in processturing, opleiding, timing etc.).
- Hoe deze kenmerken de besluitvorming beïnvloeden t.a.v. keuze voor specifieke oplossingsrichtingen. Deze inzichten zijn belangrijk voor het verkrijgen van een overzicht van leerpunten en aandachtspunten voor R&D om oplossingsroutes verder uit te werken en zo te komen tot de uiteindelijke implementatie /realisatie
- Welke gezamenlijke kennis- en competentie moet worden opgebouwd, welke focus moet worden aangebracht, welke technologieën en ontwerptools moeten ontwikkeld of doorontwikkeld worden, welke toeleverende organisaties moeten betrokken worden en welke niet-technologische barrières moeten worden opgelost en op welke wijze?

Al met al levert het rapport een grote hoeveelheid kennis. Deze kennis stelt het bedrijfsleven in staat om complexe keuzes te maken tussen verschillende technologische opties. Dit zal resulteren in de benodigde focus in R&D om bovengenoemde oplossingsroutes verder uit te werken. Op deze manier wordt de uiteindelijke realisatie van de oplossingen gefaciliteerd.



3. Bouwstenen voor industriële casussen voor elektrificatie van warmte

In het huidige onderzoek is met name ingegaan op de casus van de inzet van warmtepompen om de tegelijkertijd de energie- én warmtevraag te verminderen. Gekeken is naar warmtepompen in de temperatuurrange van 90°C tot 150°C. Dit vraagt veel aandacht voor de geschikte warmtebron (heat source) en het warmte-gebruikende proces (heat sink).

De temperatuursprong is namelijk de belangrijkste factor in de berekening van de benodigde elektriciteit om warmte op een hoger temperatuurniveau te brengen. Deze wordt namelijk bepaald door de zogenaamde Carnot factor.

$$\frac{P_{th}}{P_e} = COP = \eta \cdot T_c / dT$$

Waarin:

P_{th}	afgegeven thermisch vermogen [kW]
P_e	opgenomen elektrisch vermogen [kW]
COP	Coefficient of performance [-]
η	Systeemrendement (60 a 70%)
T_c	Condensortemperatuur in Kelvin [K]
dT	Temperatuursprong = temperatuurverschil tussen condensor en verdamper [K]

De in industriële processen te maken temperatuursprong dT is vaak te groot voor rendabele toepassing van warmtepompen en damprecompressie. Het is daarom belangrijk om na te gaan of er combinaties van maatregelen en technologieën mogelijk is om tot een efficiënt systeem van warmte-integratie te komen. Deze verschillende technieken kunnen gezien worden als bouwstenen en zullen hieronder kort worden beschreven. De beschrijving is onderverdeeld in twee soorten bouwstenen:

- Bouwstenen voor warmteterugwinning: Om warmte opnieuw te kunnen gebruiken, moet deze in sommige gevallen eerst worden overgedragen naar andere processtromen.
- Bouwstenen voor restwarmte opwaarderen: Om warmte opnieuw nuttig in het proces te kunnen toepassen, moet deze worden opgewaarderd naar een hoger temperatuurniveau.

Met behulp van de gedefinieerde bouwstenen worden mogelijke processcenario's geformuleerd.

3.1 Mogelijke bouwstenen voor warmteterugwinning

Voor dit rapport is voornamelijk gekeken naar de warmteterugwinning uit warme vochtige lucht. Hiervoor zijn de volgende alternatieven doorgerekend:

1. Directe terugwinning met een verdamper van een warmtepomp;
2. Indirecte terugwinning
 - a. met een lucht-water warmtewisselaar;
 - b. met een scrubber;
 - c. met een zeolietwiel.

Bij de keuze van het warmteterugwinningssysteem staat het "temperatuurverlies" centraal. Dit is het verschil tussen de temperatuur van de uitgaande lucht en het koudemiddel van de warmtepomp. Iedere graad verlies heeft impact op temperatuursprong en daarmee de COP van de warmtepomp.

Directe warmteterugwinning

Directe warmteterugwinning met een verdamper van een warmtepomp heeft het voordeel dat er geen water-tussencircuit nodig is. De nadelen zijn dat er veel koudemiddel nodig is voor de vulling en dat de warmteoverdracht een temperatuur-"verlies" tussen de uitgaande lucht en het koudemiddel veroorzaakt van



ruwweg 10 K. Een ander nadeel is dat de afstand tussen de warmtepomp en de schoorsteen niet te groot mag zijn. Dit in verband met de oliehuishouding van de warmtepomp.



Figuur 1: Directe warmteterugwinning (Smurfit Kappa)

Indirecte warmteterugwinning

Lucht-water warmtewisselaar

Met indirecte warmteterugwinning met een lucht-water warmtewisselaar is het temperatuurverlies in de orde van 15 K. Het voordeel is dat vanuit het watercircuit een compacte verdamper van de warmtepomp kan worden toegepast met weinig koudemiddel. Een ander voordeel is dat de afstand tussen de warmtepomp en de afgasstroom niet begrensd is met een watercircuit, hetgeen met koudemiddel wel het geval is.

Nadeel is dat er een pomp met leidingen nodig is met de bijbehorende regelapparatuur.

Scrubber

Een scrubber heeft het voordeel van een klein temperatuurverlies (circa 8 K) en heeft net zoals bij indirecte warmteterugwinning geen beperkingen in afstand. Bij een scrubber wordt het water dat door de warmtepomp gekoeld wordt over een bed met ringen gespreid. De (vochtige) drogerlucht stroomt in tegenstroom van onder naar boven. Door condensatie van damp op het oude water levert dit systeem (ook) netto water op. Nadeel van scrubbers is dat ze niet compact zijn en dat er extra ventilatorvermogen nodig is om de drukval te overwinnen.



Figuur 2. Voorbeeld van een scrubber (GEA)

Zeolietwiel

Een andere manier om latente warmte terug te winnen is de toepassing van een roterend zeolietwiel.

Zeoliet neemt vocht op uit de drooglucht en neemt de condensatiewarmte latent op. Bij de andere kant van de rondgang wordt het wiel geregenereerd met bijvoorbeeld oververhitte stoom van atmosferische druk.

Deze stoom kan rechtstreeks gecomprimeerd worden tot de gewenste druk, waarbij een deel weer gebruikt wordt voor de regeneratie van het wiel.



Figuur 3. Zeolietwiel (Puresci)

Het nadeel van een zeolietwiel is dat regeneratie met oververhitte stoom geen proven technology is. Daarnaast is voor regeneratie relatief veel stoom nodig waardoor de netto COP rond de twee uitkomt. Daarnaast is de stoom uit het zeolietwiel door vervuiling niet geschikt voor de walsen, maar is een extra stoom-stoom warmtewisselaar nodig. Het voordeel is dat het droogstelsel gesloten is en er geen warmte uit de schoorsteen verloren hoeft te gaan en er geen geuremissies optreden.

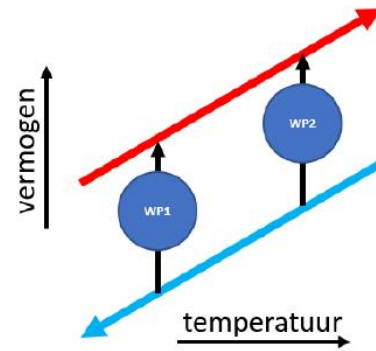
3.2 Bouwstenen opwaarderen van restwarmte

Voor de opwaardering van restwarmte tot stoom komen warmtepompen en mechanische of thermische dampcompressie in aanmerking.

Warmtepompen

Warmtepompen tot 80 à 90 °C zijn stand der techniek en redelijk betaalbaar (200-250 €/kWth). Tot een 130 °C zijn deze minder gangbaar en vanwege de benodigde drukken en ondervonden risico's duurder (300-500 €/kWth). Warmtepompen boven deze temperaturen zijn nog in een experimenteel stadium (Viking claimt 160 °C). De drukverhouding tussen de condensor en de verdamper bepaalt de zogenaamde temperatuursprong die je met de warmtepomp kan overbruggen. De maximale temperatuursprong in een enkele compressiestap is ruwweg 70 °C. Voor grotere stappen kunnen warmtepompen in cascade worden gezet. Het is ook mogelijk hetzelfde koudemiddel in twee stappen te comprimeren met tussenkoeling.

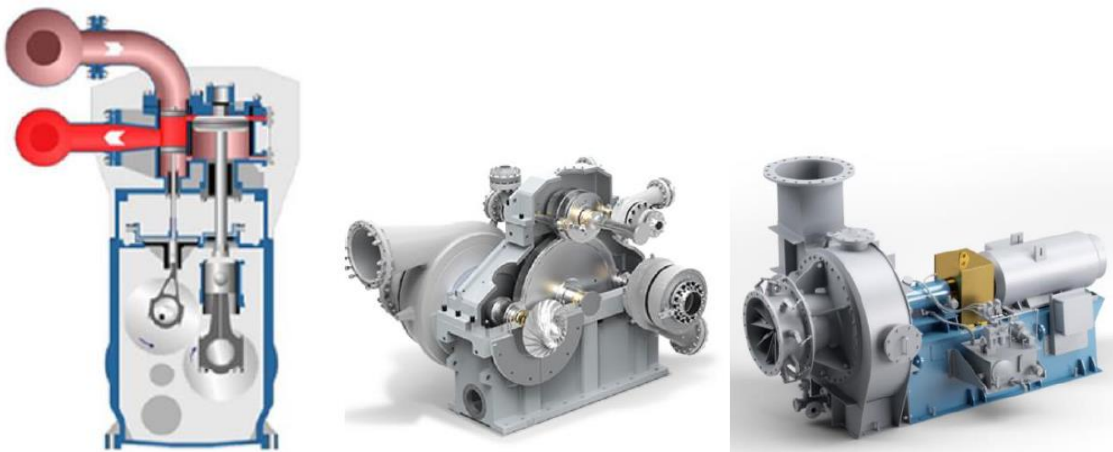
De verhouding tussen de geleverde warmte en de benodigde elektriciteit wordt de COP genoemd (Coefficient of Performance). Deze is nagenoeg evenredig met de temperatuursprong. De efficiency is er dus mee gebaat als de restwarmte op een zo hoog mogelijk temperatuurniveau wordt aangeboden. Bij drogers moet daarom gestreefd worden naar een zo hoog mogelijk dauwpunt in de schoorsteen. De warmte die bij condensatie vrij komt vertegenwoordigt immers het grootste vermogen. Het is dan ook zaak de luchttoevoer (zowel gecontroleerde als valse lucht) te minimaliseren. Om schade aan het product door druppels te voorkomen moet de kap zorgvuldig geïsoleerd worden omdat druppels ontstaan op plaatsen waar koudebruggen zijn.



Figuur 4: Warmtepomp bij Smurfit Kappa, stoom 115 °C, foto ECN. Rechts : schematisch een tegenstroom cascade warmtepomp.

Om een hogere COP te bereiken worden warmtepompen ook wel parallel in tegenstroom gezet, zodat iedere warmtepomp een kleinere temperatuursprong (hogere COP) heeft dan een enkele warmtepomp (zie Figuur 6 rechts).

In het geval van een kleine temperatuurdaling van de condenserende lucht en eenzelfde temperatuur van stoomvorming aan de leveringskant zoals in de onderhavige studie het geval is, is het niet aantrekkelijk voor meerdere warmtepompen in parallelstelling te kiezen. De basiskosten en de basisverliezen van een warmtepomp zijn daarnaast dermate hoog dat een enkele grotere warmtepomp in zo'n geval beter is. Om diezelfde reden is cascadering ook minder aantrekkelijk als een warmtepomp de temperatuursprong in één keer aan kan. In grensgevallen leveren twee warmtepompen in serie wel een hogere COP, maar vragen een hogere investering.



Figuur 5: A. Zuigercompressor (Spilling); B. Centrifugaalcompressor (Howden); C. Piller centrifugaal blower

Mechanische damprecompressie

Bij mechanische damprecompressie wordt stoom in één of meerdere stappen gecomprimeerd. Daarbij kan gekozen worden voor stoommotoren of roterende machines.



Stoommotoren zijn al decennia lang toegepast in de scheepvaart. Deze kunnen zowel elektriciteit opwekken (bij expansie) als stoom comprimeren. Het nadeel van deze systemen is de geluidsproductie en de hoge onderhoudskosten.

Bij roterende compressie kan gekozen worden tussen turbo's of centrifugaal blowers. Turbo's worden bij de industrie ingezet voor het comprimeren van gassen. Deze machines zijn zeer gevanceerd, draaien zeer hoge toerentallen en derhalve ook duurder dan de eenvoudige centrifugaalblowers, die vooral bij indampers worden ingezet. Voor kleine drukverhoudingen zijn centrifugaalblowers aantrekkelijk. De drukverhouding per trap is minder dan 2.

Thermische damprecompressie

Het meest eenvoudige systeem om damp te comprimeren is door gebruik te maken van het venturi-principe, waarbij hogedruk stoom door versnelling onderdruk creëert, waardoor lagedruk stoom meegesleurd wordt en na afgeremd te zijn middendruk stoom oplevert. De hoeveelheid stoom die nodig is voor de aandrijving is aanzienlijk en de geluidsproductie is een aandachtspunt. Het systeem is relatief goedkoop. De drukverhouding is in de praktijk onder de twee. Door cascadering zijn grotere drukverhoudingen te bereiken. Door systemen van verschillende grootte parallel te plaatsten kan het regelbereik aanzienlijk verbeterd worden (Project bij Sugar Beet Company te Dinteloord).



Figuur 6: Thermische damprecompressie (foto Smurfit Kappa)

3.3 Samenvatting bouwstenen

In tabel 1 op de volgende pagina is een samenvatting gegeven van de verschillende mogelijke technologieën voor warmteterugwinning en -opwaardering en hun voor- en nadelen t.a.v. hun toepasbaarheid, o.a. wat betreft technologische complexiteit, benodigde investeringen, ingrijpen in proces en product, wijzigingen in energie-infrastructuur, wijzigingen in processturing, opleiding, timing etc.



Tabel 1. Technologieën – voor- en nadelen

	Technologie	Voordelen	Nadelen
Warmte-terugwinning	Verdamper van een warmtepomp (direct)	Geen water-tussencircuit nodig	<ul style="list-style-type: none"> - Veel koudemiddel nodig - 10K temperatuurverlies - Afstand tussen warmtepomp en schoorsteen mag niet te hoog zijn, ivm de oliehuishouding v warmtepomp
	Lucht-water warmtewisselaar (indirect)	<ul style="list-style-type: none"> - Weinig koudemiddel nodig - afstand tussen warmtepomp en afgasstroom is niet begrensd 	<ul style="list-style-type: none"> - 15K temperatuurverlies - pomp met leidingen nodig met de bijbehorende regelapparatuur
	Scrubber (indirect)	<ul style="list-style-type: none"> - Klein (8K) temperatuurverlies - afstand tussen warmtepomp en afgasstroom is niet begrensd - Levert extra water op 	<ul style="list-style-type: none"> - niet compact - extra ventilatorvermogen nodig om drukval te overwinnen
	Zeolietwiel (indirect)	Systeem is gesloten: geen warmteverlies uit schoorsteen en geen geuremissies	<ul style="list-style-type: none"> - relatief veel stoom nodig voor regeneratie (COP 2) - regeneratie met oververhitte stoom is geen proven technology - Extra stoom-stoom warmtewisselaar nodig ivm voor walsen ongeschikte vervuilde stoom
Opwaarderen restwarmte	Warmtepompen	<ul style="list-style-type: none"> - Tot 90 °C gangbaar en betaalbaar - Maximale temperatuursprong: 70 °C 	Stand der techniek nog laag: <ul style="list-style-type: none"> - tot 130° minder gangbaar en duurder - tot 160 °C nog in experimenteel stadium Hoge basiskosten en – verliezen (daardoor beter één warmtepomp dan een cascade van meerdere)
	Mechanische dampcompressie	Stoommotoren: <ul style="list-style-type: none"> - Al jarenlang breed toegepast Turbo's: <ul style="list-style-type: none"> - Zeer geavanceerd, hogere toerentallen Centrifugaal blowers <ul style="list-style-type: none"> - Eenvoudig en gunstig geprijsd 	Stoommotoren: <ul style="list-style-type: none"> - Hoge geluidsproductie - Hoge onderhoudskosten Centrifugaal blowers <ul style="list-style-type: none"> - Kleine drukverhouding - met cascadering is grotere drukverhouding te krijgen
	Thermische dampcompressie	Meest eenvoudige systeem	<ul style="list-style-type: none"> - Kleine drukverhouding (<2) - met cascadering is grotere drukverhouding te krijgen - Veel stoom nodig voor aandrijving - Hoge geluidsproductie



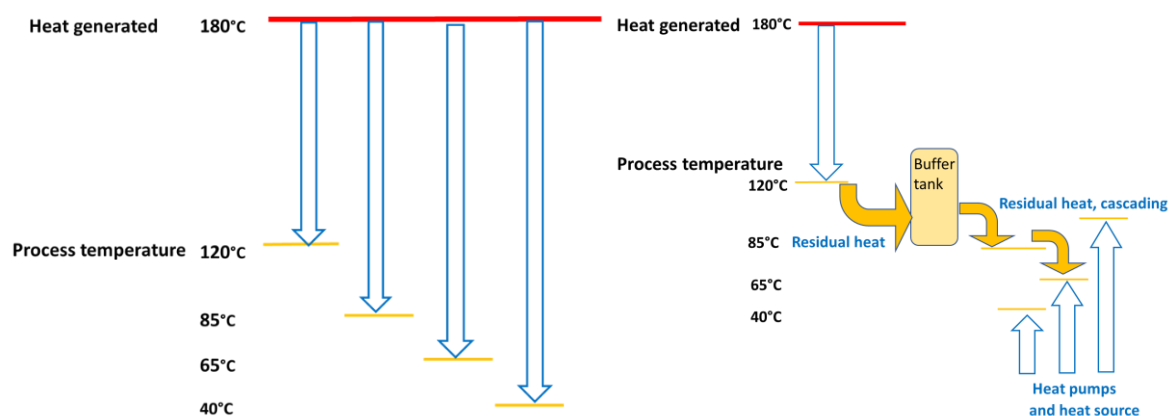
4. Toepassing van warmte-integratie: Een vergelijking met de status quo

In het vorige hoofdstuk zijn verschillende bouwstenen beschreven die een rol kunnen spelen in warmte-integratie. In dit hoofdstuk zal een exemplarische vergelijking worden gemaakt waarin de toepassing van een warmtepomp wordt vergeleken met de status quo van een stoomsysteem.

De warmtepomp komt in de warmtetransitie in de plaats van of staat parallel aan een stoomsysteem. De concurrentie met het stoomsysteem is groot. Stoom is een goede warmtedrager. Met een 10 bar (of hogere druk) stoomketel kan de stoom in relatief dunne leidingen getransporteerd worden naar de gebruikers. Eén kg condenserende stoom levert maar liefst 2.400 kJ. In theorie kan een warmtepomp ook waterdamp (als koudemiddel) comprimeren en dus stoom leveren. Echter bij temperaturen onder de bv. 50°C is de dichtheid van waterdamp erg laag zodat voor een bepaald vermogen een zeer groot slagvolume van de compressor nodig is.

De op 10 bar (180°C) opgewekte stoom wordt meestal bij het proces in druk gereduceerd, omdat het proces maar 80°C of 140°C aan warmte nodig heeft. De 10 bar is alleen nodig voor compact stoomtransport. Hier ontstaat ook de in-efficiency door transmissie-warmteverlies, rookgas-warmteverlies en verliezen in het retour condensaatsysteem. Het bijzondere is dat als de werkelijk benodigde procestemperatuur wordt geanalyseerd dan liggen deze vaak “slechts” tussen de 80°C tot 140°C. Warmtepompen kunnen juist deze warmte produceren op het temperatuur niveau van het proces, dus op die 80°C tot 140°C. Dit is efficiënter dan warmte opwekken op een hoge stoomdruk en temperatuur.

In de warmtetransitie zal een splitsing optreden naar de temperatuurniveaus van de processen. Een kleine hoge temperatuur opwekker die één proces bedient, waarbij de restwarmte via buffers weer wordt aangeboden aan de lagere temperatuur processen. Dit gebeurt in combinatie met warmtepompen die de andere processen van warmte voorzien op het temperatuurniveau van het proces. Zie onderstaande figuur met links de traditionele stoom (aardgas) oplossing en rechts de nieuwe (elektrisch gedreven warmtepompen en wat stoom waar het niet anders kan).



Figuur 7: Links de traditionele warmtevoorziening (status quo) en rechts de nieuwe, met restwarmte en warmte opgewekt op de benodigde temperaturen.

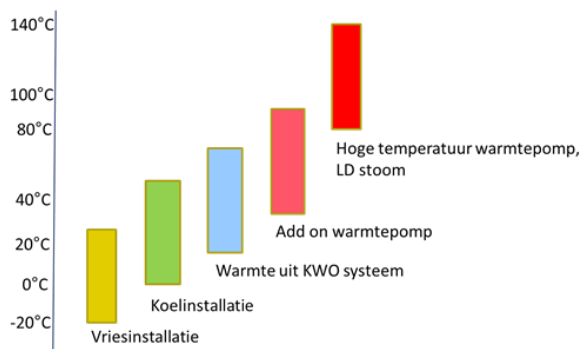
Bij warmtelevering door een traditionele CV of stoomketel is de warmtebron eenvoudig: een brandstof. De relatie stoomproductie en de gasbrander is direct. De warmtepomp heeft echter twee energiebronnen nodig om de warmte te leveren: de “rest”warmte (heat source) en elektriciteit. Het betrouwbaar en stabiel aanleveren van deze warmte is cruciaal. Daarnaast vraagt de warmtepomp voldoende aansluitvermogen



van een bedrijf vanwege de motor. De vraag is of de op de bestaande elektrische infrastructuur kan worden aangesloten zonder bijzondere kosten.

Voor bestaande bedrijfsprocessen vraagt dit om een complexe transitie, ook van de infrastructuur. Voor nieuwbouw is dit beter te integreren.

De hoogte van de temperatuurlift (van heat source naar heat sink) is op twee manieren een bepalende of beperkende factor: enerzijds loopt de compressor tegen de grenzen van het werkgebied aan (drukverhouding, persgastemperatuur), anderzijds loopt de COP sterk terug bij toenemend drukverschil. Die afnemende COP bepaalt of het zinvol is, berekend vanuit CO₂ emissie, om een gasgestookte ketel te vervangen door een warmtepomp. Bij een COP (warmte) hoger dan 2,5 tot 3 is er sprake van CO₂ emissie reductie ten opzichte van een gasgestookte ketel. In dat geval is er dus een eis aan de temperatuur van de bronzijde van de warmtepomp. Figuur 8 geeft ter indicatie de temperatuurlift van warmtepompen aan bij verschillende toepassingen. Het onderste niveau in de range geeft de minimale brontemperatuur weer, bij het bovenste niveau van de maximale afgifte temperatuur waarbij COP = 3. Binnen deze range is COP > 3. Ook koel- en vriesinstallaties zijn hier als warmtepompen beschouwd.



Figuur 8: Temperatuur ranges van warmtepompen met voldoende COP > 3 binnen de uiterste niveaus per range

Deze analyse is opgesteld vanuit het concept van de elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp, in een gesloten of open cyclus. Voor andere warmtepompconcepten zoals de warmte gedreven absorptie, de thermochemische, de akoestische warmtepomp en andere warmtetransformatoren gelden vergelijkbare overwegingen.

5. Knel- en leerpunten

Warmtepompen hebben in de gebouwde omgeving hun plaats veroverd. Ook in de industrie zijn warmtepompen in opmars. Bovenstaande analyses laten echter zien dat een warmtepomp geen catalogus object is. De integratie van de warmtepomp in het warmte-integratiesysteem, de afstemming tussen warmtebron en warmte-gebruiker, is een uitdagend engineeringproject waar verschillende bouwstenen op elkaar afgestemd moeten worden. Het vraagt om een complexe systeemintegratie met aanpassingen in de kern van het productieproces. Aanpassingen die niet alleen kostbaar zijn, maar ook onzeker. Onderstaand is een overzicht gegeven van de **algemene knel- en leerpunten t.b.v. de ontwikkeling van technologie, kennis en subsidie-instrumentarium.**

5.1 Hoge temperatuurliften bemoeilijken business cases

Hoe hoger de temperatuur waarop de warmte nodig is en hoe lager de temperatuur waarop de warmte vrijkomt hoe, meer compressie arbeid nodig is en hoe minder er bespaard wordt. Hoeveel compressie arbeid er precies nodig is hangt af van de efficiency van de compressor, het temperatuurverschil over de



warmtewisselaars van de verdampers en de condensator van de warmtepomp en de warmtecapaciteit en het compressie gedrag van het werkmedium.

5.2 WKKs beperken sterk de mogelijkheid voor toepassing van een warmtepomp

Wanneer alleen naar de energiebesparing door toepassing van warmtepompen (incl. bijbehorende proceswijzigingen en overige warmterugwin-technologieën) in het proces wordt gekeken, dan zijn er potentieel goede matches te vinden wat betreft COP en toepassingsgebied. Echter veel bedrijven hebben een WKK voor hun stoomvoorziening.

Een WKK is een zeer energie-efficiënte manier om de opwekking van elektriciteit te combineren met het produceren van stoom. Als de WKK de enige manier is om stoom te produceren en voor de business case van de WKK is het nodig dat de elektriciteitsproductie constant blijft, dan leidt het verlagen van de hoeveelheid condensaat die naar de WKK gaat door het invoeren van een warmtepomp altijd tot verslechtering van de business case van de WKK, die niet door een warmtepomp gecompenseerd kan worden. Ook kan dit direct of indirect effecten hebben op een eventuele vrijstelling voor ODE belasting. Of dit het geval is, hangt af van de systeemgrenzen en zal per fabriek verschillen.

Alleen als er sprake is van een aanvullende boilercapaciteit die geopereerd wordt naast een WKK, dan kan een warmtepomp mogelijk de boiler (gedeeltelijk) vervangen zonder dat de business case van de WKK wordt beïnvloed. Op termijn is het denkbaar dat de combinatie van verlaagde warmtevraag in de fabrieken met een lagere elektriciteitsprijs via het net (bijv. door toenemende productie van elektriciteit via wind en zon), dat de combinatie van warmtepompen en inkoop van elektriciteit van het net voor bedrijven interessanter is dan een WKK.

5.3 Onzekerheid overheidssteun op Capex en Opex

Ook beschikbare subsidies op de onrendabele top hebben een effect op de incentive (elektrificeren via E-boiler versus energie-efficiëntie met warmtepompen). SDE++ subsidies zijn nu nog niet geschikt voor het financieren van proces-efficiëntie met warmtepompen, omdat zowel de kosten voor als de efficiëntie van de warmtepomp zelf geen weerspiegeling is van de totale investeringskosten voor en te behalen efficiëntiewinst van het totaal aan benodigde proceswijzigingen (inclusief WKK). VEKI subsidie is een alternatieve mogelijke subsidie, echter deze subsidieert alleen de investeringen. Ondanks de verhoogde energie-efficiëntie in het proces zullen met de integratie van warmtepompen in het proces de operationele kosten in de meeste gevallen stijgen door de additionele kosten voor elektriciteit en onderhoud (en eventuele extra energiebelastingen).

5.4 Kennislacunes bij adviseurs – Pinch-analyses zijn essentieel

Sommige bedrijven geven warmte-integratie adviezen zonder pinch-analyse uit te voeren. Bij sites met een beperkt aantal warmtebronnen en toepassingen is dat mogelijk, doordat door de beperkte schaal van de site een gebrek aan systematiek gecompenseerd kan worden met gezond verstand en ervaring. Niettemin betekent het niet uitvoeren van een pinch-analyse dat er niet systematisch naar de meest optimale oplossing gezocht wordt. Zodra sites complexer wordt neemt de kans op suboptimale oplossingen toe. Een Pinch-analyse, zoals al in de jaren 90 uitgebreid bewezen bij plants wereldwijd, is de meest betrouwbare manier is om tot een optimale warmte-integratie te komen.

5.5 Werkelijke kosten voor warmtepompen en systeem lastig vast te stellen

Er is grote onduidelijkheid over de werkelijke kosten van de toepassing van warmtepompen. Hier zijn een groot aantal redenen voor:

- Uit concurrentieoverwegingen houden zowel toeleveranciers als productiebedrijven de kosten van warmtepompen geheim. Alleen voor gesubsidieerde warmtepompprojecten is in beperkte mate kosteninformatie beschikbaar;
 - Er zijn veel verschillende randvoorwaarden die de kosten van met name de installatie sterk kunnen beïnvloeden;
 - Er is veel ontwikkeling dus hoe verhouden de kost data van 5 jaar geleden zich tot de huidige prijzen?
- De onduidelijkheid over de werkelijke kosten maakt het moeilijk om de business case goed vast te stellen.



6. De oplossingsroutes

In het project zijn een aantal technologieën besproken en leer- en aandachtspunten naar voren gekomen voor de bedrijven die kunnen bijdragen aan het faciliteren van de interne keuze, detailuitwerking en besluitvorming. Eén van de doelstellingen van dit rapport was ook om te komen tot oplossingsroutes. Tijdens het onderzoeken van de drie casussen hebben we echter ervaren dat er niet een one-size-fits-all oplossing is voor warmte-integratie systemen. De oplossingsroutes die wij hieronder beschrijven zijn daarom meer algemene aanbevelingen die bij navolging kunnen leiden tot een goede opleidingsroute voor een individuele industriële onderneming.

6.1 Neem een systeembenadering

Voor het kunnen bepalen van een optimale warmte-integratieoplossing is het belangrijk om het gehele processysteem, inclusief energievoorziening, belastingsysteem, infrastructuur en de omgeving. De scope bepaling van een project kan deze maken of breken. Een te nauwe scope kan leiden tot een suboptimaal resultaat.

Ook uit de literatuur is bekend dat **voor een systematische aanpak van de warmte-integratie minimaal 80-90% van de warmtestromen meegenomen moeten worden in de analyse.**

- Minimaliseer de energievraag. Om de energietransitie haalbaar en betaalbaar te maken moet er eerst gekeken worden naar het minimaliseren van de energievraag, daarna pas naar het vervangen van utiliteitopwekkende apparatuur of de transitie naar een andere energiebron.
- Huidige en beoogde toekomstige energie-infrastructuur (bijv. E-boiler versus gasboiler + stoomturbine) en wens/mogelijkheid om te elektrificeren.
- Bestaande proces-, energie- en warmtesysteem. Zorg dat je kloppende energie- en massabalansen hebben waarin alle processtromen die >1% van de massa zijn, zijn opgenomen. Als die informatie voor handen is, is de hoeveelheid werk om een pinch analyse van de site te maken beperkt.
 - o Hoeveelheid en kwaliteit van de beschikbare restwarmte (dauwpunt)
 - o Behoeftte aan restwarmte voor andere processen
 - o Stoombehoefte (hoeveelheid en kwaliteit en variaties daarin binnen het productportfolio)
- Beschikbare ruimte en te overbruggen afstanden

6.2 Kijk niet alleen naar warmtestromen en het energieverbruik

Het kritisch reviewen van procesdata leidt niet alleen tot operationele besparingen, maar vormt ook een belangrijke basis voor het doorrekenen van nieuwe technologieën. Opschaling van een lab naar fabriek vereist kennis van beide situaties.

Productiehoeveelheden zijn leidend. Efficiëntieverbeteringen en veranderen van energiebronnen kan niet los bekeken worden. Een business case op energie kan ook gemaakt worden door bottlenecks uit productieprocessen weg te nemen.

6.3 Volg en reflecteer ontwikkelingen in technologie en energie- en CO₂-prijzen

Blijf ontwikkelingen van (nieuwe) technologieën monitoren en spiegelen aan de huidige en verwachte utilityprijzen. Hetzelfde geldt voor eerder onrendabel verklaarde projecten. Door de resultaten van projecten te borgen, onder andere reden van afschieten, kan gemonitord worden wanneer een project wel uit kan (veranderende utility prijzen of ontwikkeling in technologie).

CO₂-kosten zullen in de nabije toekomst een signifikanter deel innemen van de utilitykosten. Dit zorgt ervoor dat besparingsmogelijkheden op fossiele brandstoffen financieel aantrekkelijker zullen worden. Dit maakt het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse op de besparingsmogelijkheden steeds belangrijker; bij welke CO₂-prijs zou het wel uit kunnen?

6.4 Werk samen in het verkrijgen van inzicht in daadwerkelijke kosten

Zoek naar een manier waarop de kostenstructuur van warmtepompen onderzocht kan worden in samenwerking met technologieleveranciers zonder de antikartelvormingsregels te overtreden. Het is heel



belangrijk om meer inzicht in kosten te krijgen zodat de grote variatie in terugverdientijden, zoals die in onderliggende studie naar voren zijn gekomen, veel kleiner worden.

6.5 Realiseer een gedegen kennisbasis

In het project is gebleken dat de meeste bedrijven geen of zeer beperkte kennis hebben van het systematisch analyseren van de warmte-integratie opties.

Dit heeft twee gevolgen:

1. Bedrijven zijn geneigd het werk op te delen in handteerbare stukjes. Hierdoor wordt slechts gekeken naar een deel van het systeem en wordt er gekeken naar suboptimale oplossingen waardoor minder energie bespaard kan worden op een kosteneffectieve manier. Als een site niet heel groot is, is de kans groot dat er op deze manier helemaal geen businesscase voor een warmtepomp gevonden wordt. Een bedrijf denkt zelf dat er niets mogelijk is bij zijn of haar bedrijf, is dus niet geneigd om te investeren in onderzoeken naar het potentieel;
2. Het management zal de veranderingen niet aandurven, omdat de verduurzamingsopties niet door de eigen mensen gedragen worden.

Uit ervaringen van KWA blijkt dat verduurzamingsopties in een bedrijf pas kans van slagen hebben als de eigen mensen de kennis bezitten, het vertrouwen hebben in de opties en het verhaal zelfstandig aan het management (de beslissers) en de collega's kunnen overbrengen. Men wil niet afhankelijk zijn van leveranciers of adviseurs. Goede kennis en kennisoverdracht is daarbij onontbeerlijk. Dit vraagt om uitwisseling van kennis en ervaring en een goede samenwerking tussen de industrie, engineers, adviseurs en leveranciers.

6.6 Stel een MeerJarenOnderhoudsPlan (MJOP) op

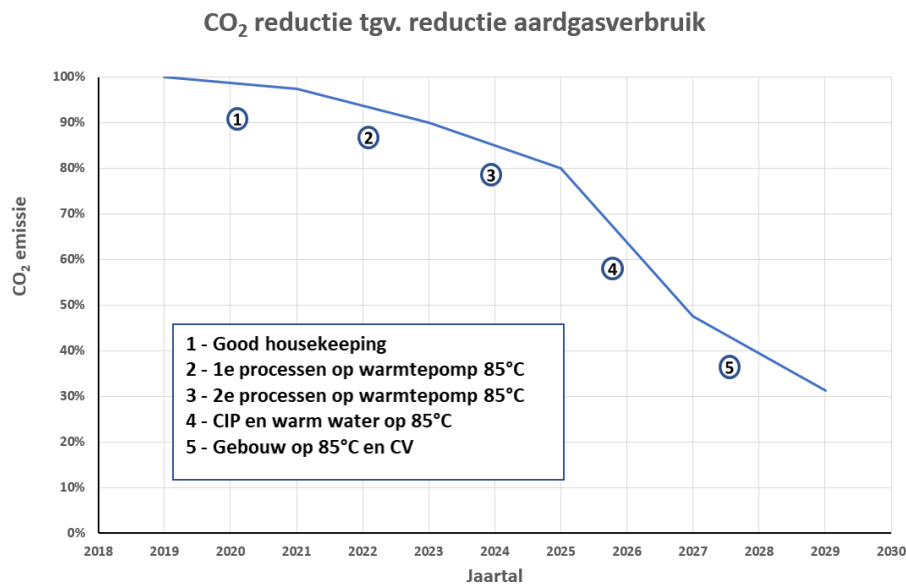
Bedrijven zoeken hierbij de natuurlijke vervangingsmomenten op van de belangrijke proces unit operations. In tegenstelling tot de gebouwde omgeving is een MJOP niet gebruikelijk in de industrie. Om bij een vervanging een efficiënter apparaat of nieuwe techniek te kiezen is een jaar tot enkele jaren voorbereiding nodig. De praktijk leert dat de industrie wacht tot het apparaat niet meer voldoet waarbij op korte termijn een vergelijkbaar vervangend apparaat met nagenoeg dezelfde specificaties wordt aangekocht. Een goede planning en tijdige voorbereiding leidt tot een hogere CO₂-reductie.

Daarvoor is voorbereidingstijd nodig, een vooruitziende strategie, en bovendien een meer-jaren vervangingsplan voor de warmtevoorziening waaraan men zich conformeert in alle lagen van het bedrijf.

6.7 Stel een roadmap CO₂-reductie op en creëer draagvlak

De energie transitie vindt in fasen plaats in een tijdspad en vormt zo de langetermijnstrategie voor energie. Dit vraagt om het schetsen van een implementatieplan. Uiteindelijk resulteert dit in een CO₂-emissiereductiegrafiek in de tijd, zoals weergegeven in figuur 9.

Daarnaast vergt elektrificatie ver vooruitdenken. De huidige ruimte op de netaansluiting en de transformatoren is al snel ingenomen. Het in de tijd zetten van de energiebesparingsmogelijkheden geeft kans tot vroegtijdig inzetten op de juiste dingen. Kortom, het opstellen van een roadmap CO₂-reductie is belangrijk.



Figuur 9: Voorbeeld resultaat van een transitie roadmap tot 2030 ter CO₂-emissiereductie

Draagvlak in de organisatie is ook enorm belangrijk om de implementatie van de lange termijnplannen te garanderen. Denk hierbij aan:

- Collega's meenemen die bijdrage leveren aan het MJOP, de technische procesinnovaties en eigen projectengineering.
- Het stellen van realistische en meetbare doelen met oog op de mogelijke verduurzamingsopties.
- Management participatie realiseren, met uitgangspunten als de beoogde tijdshorizon, de ambitie, het risicoprofiel en de beschikbaarheid van middelen, het commitment om zich aan het plan te committeren.
- Duurzaamheidsbeleid en projectuitvoering zijn vaak in conflict met elkaar (tijdspad, budget, inkoop, leveranciers).
- Het bewaken van de roadmap over een lange looptijd, het stellen van ijkpunten.

7. Conclusie en vervolgonderzoek

7.1 Conclusie

Er zijn een aantal algemene knelpunten bij het ontwerp van processen voor warmte-integratie met warmtepompen in de industrie:

- Hoge temperatuurliften bemoeilijken business cases
- WKKs beperken sterk de mogelijkheid voor toepassing van een warmtepomp
- Onzekerheid gecombineerde overheidssteun op Capex en Opex
- Kennislacunes bij bedrijven en adviseurs – pinch analyses zijn essentieel
- Werkelijke kosten voor warmtepompen en systeem zijn lastig vast te stellen

Leerpunten, aandachtspunten en aanbevelingen voor de bedrijven om realisatie van warmte-integratie te bevorderen zijn o.a:

- Een efficiënte toekomstbestendige oplossing vereist een systeembenadering
- Kijk niet alleen naar warmtestromen en het energieverbruik
- Volg en reflecteer op ontwikkelingen in technologie en energie- en CO₂-prijzen
- Werk samen in het verkrijgen van inzicht in daadwerkelijke kosten
- Een gedegen kennisbasis is cruciaal
- Stel een MeerJarenOnderhoudsPlan op
- Stel een roadmap CO₂-reductie op en creëer draagvlak



7.2 Vervolgonderzoek en ontwikkeling

Binnen dit project is nieuwe kennis gegenereerd welke kan worden toegepast in het meerjarige missiegedreven nationaal R&D programma op 'droog, ontwater en warmte-innovaties', waarin innovatie en praktijk actief wordt gekoppeld. In het programma zullen activiteiten plaatsvinden die bijdragen aan versnelling van het behalen van de doelstellingen van de industrie.

Onderliggend onderzoek hebben het platform nieuwe kennis geleverd inzake de technologische en niet-technologische vraagstukken die in het programma opgelost moeten worden.

De resultaten van onderliggend project zijn dan ook gebruikt voor het vormgeven en focussen van dit programma, dat als 'The Heat is On' project (THIO) dat subsidie toegekend heeft gekregen vanuit het MOOI-instrument.

De in THIO op te bouwen kennis en competentie van de oplossingsroutes voor elektrificatie van warmte in de industrie moet leiden tot een versnelde toepassing van relevante technologieën en concepten die de omslag kunnen maken naar een 100% CO₂ vrij warmtesysteem.

8. Acknowledgement

This project is co-funded by TKI-E&I with the supplementary grant 'TKI- Toeslag' for Topconsortia for Knowledge and Innovation (TKI's) of the Ministry of Economic Affairs and Climate Policy

9. Partners



Institute for
Sustainable
Process Technology

Nouryon



TEIJIN
Human Chemistry, Human Solutions



WaterEnergySolutions[^]

