

Whitepaper

VERDUURZAMING VAN LAGE TEMPERATUUR INDUSTRIËLE WARMTEBEHOEFTE

Praktische handvatten bij de invulling van MMIP 7



Met medewerking van:
WES - Lianne Bril
TU-D - Sikke Klein
HSR - Brendon de Raad/Marit van Lieshout
ISPT - Annita Westenbroek
Uniper - Patrick Nanninga
Dow - Kees Biesheuvel
HbR - Mark Franken
Energystorage NL - Jeroen Neefs
Yokogawa - Patrick Kools
Huhtamaki - Anton Wemmers

Redactie door Ekinetix



Inhoud

1	Inleiding	3
	Wat is een TKI?	4
	Beleidscontext	4
2	Warmte in de procesindustrie	5
	Toepassingsgebied MMIP-7	5
	Warmte in de procesindustrie	5
	Warmteterugwinning	5
	Aanpak voor verduurzaming	6
3	Bewezen oplossingen en methodieken	7
	Indeling methodieken	7
	Volgorde van activiteiten	7
	Overzicht van oplossingen	7
	Merit order bij toepassing van oplossingen	7
	Reduce: energiebesparing en hergebruik	8
	Energiezuinig ontwateren en drogen [Kan evt. naar bijlage]	8
	Reduce en reuse: Systematische interne warmte-integratie	9
	Warmte-integratie	9
	Pinch-analyse	9
	Re-use: de rol van de industriële warmtepomp	10
	Open en Gesloten systeem warmtepompen [Kan evt. naar bijlage]	10
	Toepassing van warmtepompen	11
	Replace: vervanging van fossiele bronnen	11
	Geothermie als warmtebron voor de industrie	11
	Elektrificatie en de rol van opslag	12
	Rol van industriële flexibiliteit	14
	Repurpose: Gebruik van intern onbruikbare restwarmte	15
	Uitkoppeling naar derden	15
	Organische Rankine-cyclus	15
4	Discussie	17
	Take-aways	17
	Voorkeursaanpak	17
	Uitdagingen voor toepassing	17
	Conceptueel begrip van de techniek	18
	Doorkruisende thema's	18
	Aanpak voor innovatie en implementatie	18
	Actieagenda	20
5	Conclusie	21
6	Referenties	22

1. Inleiding

Urgentie

In Nederland zorgt de industrie voor ongeveer veertig procent van de totale uitstoot van broeikasgassen. In 2020 ging het om 47,5 Mt CO₂ en 6.6 Mt CO₂-equivalent aan andere broeikasgassen. Deze uitstoot komt voor een groot deel op rekening van de warmtebehoefte en ook komt een substantiële hoeveelheid vrij als reactieproduct bij de productie van industriële producten zoals staal en waterstof.

Tegelijk speelt de industrie een belangrijke rol in de Nederlandse economie en samenleving. Daarom is het een maatschappelijke opgave om deze industrie te transformeren naar een duurzame manier van opereren, die bijdraagt aan een brede maatschappelijke welvaart en kwaliteit van leven.

Reductieopgave industrie

Het Klimaatakkoord en Coalitieakkoord geven richting aan de benodigde industriële transformatie. Als einddoel is vastgesteld klimaatneutraliteit in 2050, met een streefdoel van 55% reductie in 2030 ten opzichte van 1990.

De opgave van de industrie is niet alleen groot in absolute termen, maar ook in vergelijking met de andere sectoren. In 1990 stootte de industrie jaarlijks 86,7 Mton uit. In 2015 was dit nog 55,1 Mton. Richting 2030 staat de industrie voor een verdere reductieopgave van ca. 19,4 Mton per jaar. Dit is een combinatie van bestaand beleid (5,1 Mton) en de additionele opgave (14,3 Mton), om uit te komen op een uitstoot van 35,7 Mton (Bron: Klimaatakkoord).

Lage-temperatuurwarmte

In 2020 bedroeg de totale energiebehoefte in de industrie zo'n 700 PJ. Ca. 560 PJ - 80% procent hiervan - betreft warmte. De overige 20% - ongeveer 140 PJ - zit vooral in het gebruik van elektriciteit in aandrijvingen. Van de totale warmtebehoefte ligt op zijn beurt ongeveer 40% beneden de 300 °C.

Het is cruciaal om dit segment op korte termijn te verduurzamen voor het uiteindelijk bereiken van een CO₂-vrije industriële energiehuishouding. Daarom richt dit paper zich met name op opties voor de verduurzaming van dit industriële warmtesegment.

MMIP 7: Een CO₂-vrij industrieel warmtesysteem

Als onderdeel van het Klimaatakkoord en het Missie gedreven Innovatiebeleid zijn dertien Meerjarige Missie gedreven Innovatieprogramma's opgesteld. De focus in dit paper ligt op MMIP 7: CO₂-vrije industriële energiehuishouding. MMIP 7 omvat het ontwerp en de (her)inrichting van klimaatneutrale energie- en warmtesystemen voor een optimaal energiegebruik van industriële clusters en bedrijven. Er is, zoals gepland, een herijking van MMIP 7 gepubliceerd in april 2023 (ref 1).

Scope van dit whitepaper

De scope van dit whitepaper valt binnen het dekkingsgebied van MMIP 7. Een belangrijk deel van de taakstelling binnen MMIP 7, vooral op de kortere termijn, gaat om lage-temperatuur warmte. Dit betreft temperaturen in het bereik tot 300 °C. De toepassingen, die in dit paper worden beschreven, zijn vooral van toepassing op deze lage-temperatuur warmte. Dit whitepaper concentreert zich op de doelstellingen voor 2030.

Motivatie

Dit whitepaper richt zich op warmte in het lage temperatuurbereik omdat hier op korte termijn veel voortgang te boeken is:

- Ten eerste zijn de oplossingen binnen het lage temperatuurdomein relatief marktrijp. Veel van de besproken technieken zijn in de afgelopen decennia ontwikkeld tot de huidige marktrijpheid, onder andere met inbreng van de verschillende TKI's. Hierdoor zijn de technieken nu veelal beschikbaar en technisch zijn de risico's vaak klein. Hiermee is voortgang op de korte termijn haalbaar. De uitdaging ligt nu vooral in het aantonen van de economische haalbaarheid en betrouwbaarheid in dagelijkse toepassing.
- Ten tweede is het in dit toepassingsgebied vaak mogelijk oplossingen te implementeren waarbij bestaande equipment en processen behouden kunnen blijven en 'slechts' aanpassingen aan bestaande processen nodig zijn. Bij hoge temperatuur daarentegen gaat het ook vaak om alternatieve processen, bijvoorbeeld bij de overgang van fossiel gedreven processen naar elektrisch gedreven processen. Dit vergt zogeheten 'radicale procesinnovaties' die gepaard gaan met grotere veranderingen, risico's en investeringen.

Vertaling van MMIP 7 naar de praktijk

Het onderdeel lage temperatuurwarmte van MMIP 7 pakt een urgente opgave aan: warmtevoorziening voor de industrie gebeurt momenteel nog steeds onvoldoende op een duurzame manier, en verduurzaming is in hoog tempo nodig. MMIP 7 bevat hierover ook veel relevante informatie en draagt technieken aan.

Echter kan het lastig zijn overzicht over MMIP 7 te krijgen. Het veld aan oplossingen is namelijk zeer breed en vaak theoretisch beschreven. In de praktijk is kennis over de mogelijkheden binnen MMIP 7 dus niet altijd optimaal aanwezig. Ook is op het vlak van energie-integratie samenwerking tussen verschillende bedrijven in dezelfde sector, of over de sectoren, niet gebruikelijk, terwijl dit wel in toenemende mate nodig is. Daarbij weten partijen elkaar niet altijd doeltreffend te vinden.

Ondanks de technische mogelijkheden, blijft hierdoor potentieel onbenut doordat overgaan tot concrete actie lastig is. Daardoor kan de inbedding van oplossingen vertraagd raken. Dit whitepaper heeft als doel hierin helderheid te scheppen door het geven van concrete voorbeelden.

Doelen van dit whitepaper

Dit whitepaper beoogt:

- overzicht te geven in een aantal mogelijkheden binnen verduurzaming van lage-temperatuurwarmte en MMIP 7;
- het delen van kennis en informatie over de technische elementen, om breder bewustzijn van de technische mogelijkheden te scheppen;
- bedrijven tot actie aan te zetten voor toepassing van verduurzamingstechnieken;
- samenwerking te stimuleren, zorgen dat bedrijven elkaar beter weten te vinden;
- de rollen van TKI E&I duidelijker maken, uitnodigen tot gesprek en gebruik van de loketfunctie;
- te laten zien welke innovaties zijn gerealiseerd, mede door ondersteuning vanuit TKI E&I;
- Aanbevelingen te doen voor nieuwe initiatieven en samenwerking aan te reiken.

RoI TKI E&I

TKI Energie en Industrie draagt bij aan het realiseren van de MMIP's en missie C. Daarbij hoort het delen van kennis en het bieden van de juiste handvatten. Bij TKI E&I is kennis aanwezig over de techniek, subsidiemogelijkheden en tal van andere onderwerpen. Er is een groot netwerk en een overkoepelend beeld van de verschillende sectoren.

Activiteiten van TKI E&I zijn onder andere:

- Aanreiken van relevante kennis en ervaringen als kennispartner;
- Onderzoek, innovaties en demonstratieprojecten helpen vormgeven en stimuleren;
- Matchmaking: aanzetten tot samenwerking en het bijeenbrengen van partijen;
- Gaten in het landschap van innovaties identificeren, ontwikkeling op die gebieden stimuleren;
- Mogelijkheden voor kennisvergaring en partnerships beter zichtbaar maken;
- Meedenken over behoeften voor innovatie en ontwikkeling vanuit de industrie.

TKI E&I staat dus open voor input vanuit de industrie. Industriepartijen zijn uitgenodigd zich te melden, wanneer er behoeften zijn. TKI E&I kan bestaande oplossingen aandragen die wellicht nog niet bekend zijn en kan (mee)werken aan nieuwe oplossingen.

Wat is een TKI?

Binnen een Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI) zoeken ondernemers en wetenschappers naar manieren om vernieuwende producten en diensten naar de markt te brengen. Dat doen ze met fundamenteel onderzoek, industrieel onderzoek, experimentele ontwikkeling of een combinatie hiervan. Het TKI zorgt voor de opbouw van het netwerk, delen van kennis en regie op de projecten.

Beleidscontext

IKIA en missie gedreven innovatiebeleid

De kennis- en innovatieopgaven krijgen in de Integrale Kennis en Innovatieagenda (IKIA) vorm in zogenoemde Meerjarige Missie gedreven Innovatieprogramma's (MMIP's). Voor klimaat en energie zijn dat er dertien. In de IKIA staat de integrale kennis en innovatie centraal, die nodig is voor de maatschappelijke opgaven van het Klimaatakkoord. Ook heeft het kabinet het missie gedreven innovatiebeleid opgesteld. Hierin zijn kennis en innovatievragen uit de IKIA vertaald naar vijf missies voor 2050, met tussendoelen voor 2030. Zie hiervoor ook: <https://www.klimaatakkoord.nl/themas/kennis--en-innovatieagenda>

Missie C (IKIA Energietransitie en Duurzaamheid)

Missie C van de IKIA richt zich op grondstoffen, producten en processen in de industrie. De missie luidt: "In 2050 zijn grondstoffen, producten en processen in de industrie netto klimaatneutraal en voor tenminste 80 procent circulair." Missie C betreft zowel de procesindustrie als de kleinere relevante uitstoters van CO₂ zoals fijnchemie, voedings- en papierindustrie, afvalverwerking, fijnmetaal, glas en keramiek. De grotere gebruikers zijn geconcentreerd in de vijf industrieclusters, terwijl de kleinere procesindustrie vaak ook in regionale industriegebieden te vinden zijn.

MMIP's

Om invulling te geven aan de missies, zijn er in totaal dertien Meerjarige Missie gedreven Innovatieprogramma's (MMIP's). Hierin staan de innovatieopgaven op hoofdlijnen beschreven; voor de korte termijn (ontwikkeling, demonstratie en uitrol) en voor de middellange en lange termijn (onderzoek en ontwikkeling). Daarom bevatten de MMIP's tussendoelstellingen voor 2030 en einddoelen voor 2050.

Voor het slagen van de systeemtransitie in de industrie is het noodzakelijk om nieuwe processen en technieken te ontwikkelen, die het mogelijk maken om efficiënter en anders te produceren. Om de benodigde nieuwe technologieën beschikbaar, betrouwbaar en betaalbaar te maken zijn innovatief onderzoek, pilots en demonstratie van groot belang. Daarom bestaat Missie C uit drie MMIP's, met elk een specifieke missie.

Het accent in de MMIP's voor de industrie ligt op het realiseren van kostenreductie en versneld naar de markt brengen van technologieën zoals elektrolyse van water (groene waterstof), elektrificatie, CCU(S), circulaire processen en warmte-uitkoppeling.

2. Warmte in de procesindustrie

Toepassingsgebied MMIP 7

MMIP 7 streeft naar vermindering van de broeikasgasemissies van het warmtesysteem, met name CO₂. Dit wordt bereikt door de ontwikkeling en implementatie van energie-efficiënte processen en van het gebruik van duurzame warmtebronnen. Dit levert een drastische reductie op van de warmtevraag en biedt een duurzame invulling van de resterende vraag.

De scope van MMIP 7 omvat de procesindustrie met hoge-temperatuur processen en vaak een warmteoverschot, en de kleinere relevante energiegebruikers zoals fijnchemie, voedings- en papierindustrie, afvalverwerking, fijnmetaal, glas en keramiek. De grotere gebruikers zijn vooral geconcentreerd in de vijf industrieclusters, terwijl de kleinere procesindustrie vaak ook in regionale industriegebieden te vinden zijn.

Warmte in de procesindustrie

Reactiewarmte

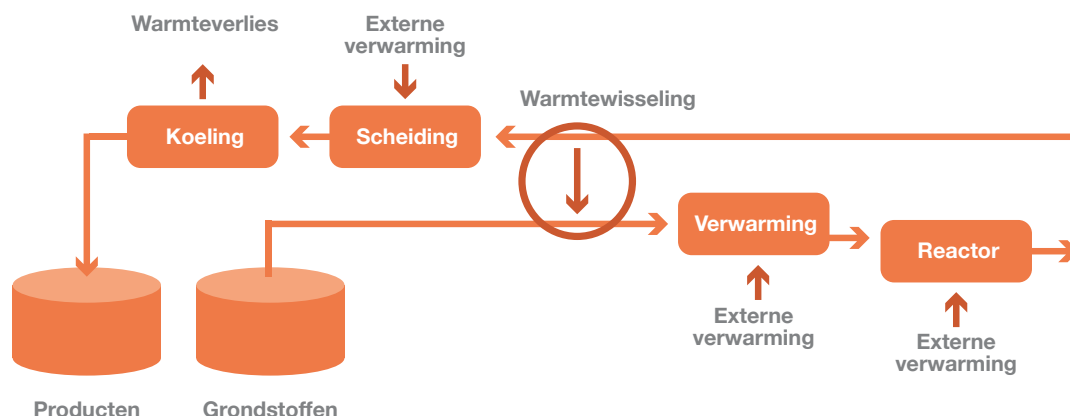
De warmte in de procesindustrie wordt voornamelijk ingezet als proceswarmte voor productscheiding en -zuivering (waaronder drogen); het mogelijk maken van verpompen en specifieke zaken zoals pasteurisatie/sterilisatie. De onderliggende processen hebben vele decennia aan optimalisatie achter de rug. Hierbij zijn de juiste procescondities zoals druk, temperatuur, compositie van grondstoffen en veilige operatie-windows gevonden.

Benodigde procestemperatuur

Voor het opereren van veel processen is een bepaalde temperatuur nodig om op te starten en/of voldoende snel te verlopen. Ook komt er bij sommige processen warmte vrij. De grondstoffen moeten dus vaak opgewarmd worden en de gevormde producten hebben een hoge temperatuur. De hete producten moeten vervolgens worden afgekoeld voor bijvoorbeeld opslag of verdere verwerking in scheidings- en zuiveringsprocessen.

Minimaliseren van de warmtebehoefte

De warmte die vrijkomt bij de afkoeling (warmteverlies) wordt gebruikt voor het opwarmen (externe verwarming) van de koude reactanten. Dit heet warmte-integratie. Zie figuur 1.



Figuur 1. Schematisch overzicht van grondstofvoorverwarming met hete productstromen.

Warmteterugwinning

Limieten aan warmteterugwinning

Er zijn limieten aan dit interne warmtehergebruik en vaak is dan ook externe verwarming noodzakelijk voor reactie en scheidingen. Warmteterugwinning is nooit perfect. Oorzaken daarvoor zijn onder andere:

- Er zijn altijd warmteverliezen aan de omgeving. Door goede isolatie kunnen deze wel worden beperkt.
- Warmteoverdracht met warmtewisselaars kan alleen als er voldoende temperatuurverschil is tussen de betrokken stromen. De af te koelen stroom moet gemiddeld warmer zijn dan de op te warmen stroom. Niet alle energie is terug te winnen in de op te warmen stroom. Een verdere restkoeling van de warme stroom is dus nodig.
- Ook komt het voor dat productstromen die nog bruikbare warmte bevatten, om andere redenen moeilijk via warmtewisseling met grondstoffen gekoeld kunnen worden. Dat komt bijvoorbeeld door vervuiling, viscositeit, ruimtegebrek of kosten.
- Tenslotte kan de lay-out van een fabriek om praktische redenen de ideale uitwisseling van warmte belemmeren. Bijvoorbeeld omdat dit te duur is (bijvoorbeeld doordat grote afstanden moeten worden overbrugd), onveilig is of de operatie te veel bemoeilijkt.

Hoe groot de energiebehoefte voor externe verwarming uiteindelijk is, hangt af van de effectiviteit van de toegepaste systematiek voor warmteterugwinning en de energie-efficiency van de apparaten en unit-operaties.

Door een goed ontwerp is dus warmtehergebruik te optimaliseren, maar nog steeds blijft er behoefte aan een externe energiebron. Daarvoor zijn er alternatieven die efficiënter zijn dan het toepassen van ondervuurde externe verwarming (denk aan boilers of fornuizen) of koeling via een koelmedium (vaak water). De energie-inhoud van een reeds bestaande, resterende lage temperatuurwarmtestroom kan worden gebruikt om een andere stroom op een hoger en bruikbaar exergieniveau te brengen. Dit kan met toevoeging van relatief kleine hoeveelheden elektriciteit (zie hoofdstuk 3).

Beperkte bruikbaarheid lage-temperatuurwarmte

Bij veel industriële processen blijft uiteindelijk warmte over, meestal op lagere temperatuur, die niet intern wordt hergebruikt. Deze energie verlaat de industrie via de buitenomgeving, opname in de producten en scheidingen, en via koeltorens en ventilatoren. De temperatuur van deze stromen ligt, volgens bijvoorbeeld het Botlek onderzoek van Deltalinqs (ref 4), veelal rond 40-100 °C. Veel energie die aan een fabrieksinstallatie wordt toegevoerd, komt dus ook weer vrij. Dit betekent echter niet dat deze direct herbruikbaar is (zie hoofdstuk 3).

Aanpak voor verduurzaming

Kansen voor verduurzaming

Op de korte termijn liggen er de volgende verduurzamingskansen voor warmtegebruik in de industrie:

- Verminderen van energieverliezen in het proces;
- Een optimaal ontwerp voor warmterugwinning;
- Herbruikbaar maken van de overgebleven warmte van (te) lage temperatuur.

(zie hoofdstuk 3)

Integraal perspectief

Om de complexiteit van verduurzaming van industriële warmte te doorzien, volstaat het niet om alleen maar individuele opties te bezien. Het kiezen voor de meest geschikte oplossing vanuit het totale systeem, vraagt om een integraal perspectief. Daarbij is een visie nodig op:

- Het warmtesysteem van een industriële partij of een industrieel cluster, bij voorkeur onderdeel van een overall verduurzamingsmasterplan;
- De bijbehorende energie-infrastructuur; hiervoor is samenwerking nodig tot op het niveau van industrieclusters.

De focus in het ontwerp van dergelijke systemen is gericht op effectiviteit/impact, veiligheid, betrouwbaarheid en betaalbaarheid (ten opzichte van de bereikte energie en CO₂-reductie).

Op basis van diverse commerciële studies (o.a. ref 4) is gebleken dat uitgaande van een dergelijke systeemaanpak de totale energiebehoefte voor temperaturen van < 200-250 °C kan dalen met mogelijk 30% of meer - bij gelijkblijvende industriële productie en bij rendabele investering. De resterende energiebehoefte wordt vervolgens anders ingevuld. Met name voor de lage temperaturen zijn elektrificatiemogelijkheden al goed beschikbaar.

Baseload en fluctuaties

In de industrie is het gebruikelijk om energie base-load (volcontinu) aan te leveren en voorradig te hebben. Daarmee kan het proces optimaal worden ingeregeld en de onvoorspelbaarheid geminimaliseerd. Maar bij toenemende aandelen hernieuwbare elektriciteit, zal het opgewekte vermogen steeds meer fluctueren in de tijd. Hierdoor ontstaan op nationaal niveau momenten van overschotten en schaarste aan duurzame energie. Daardoor

wordt - ondanks voldoende gerealiseerde en geplande opwekcapaciteit van elektriciteit - base-load energie schaars en dus kostbaar. Dit vraagt om de nodige aanpassingen aan de kant van de industrie en het energiesysteem (zie hoofdstuk 3).

Samenwerking

Flexibiliteit in de energievraag is in te bouwen op het niveau van individuele bedrijven. Maar samenwerking tussen bedrijven kan de behoefte aan geschikte warmte en/of flexibiliteit economischer en betrouwbaarder maken. Denk hierbij aan schaalvergroting en collectieve investeringen.

In Nederland zijn veel grote energiegebruikers geconcentreerd in vijf industrieclusters: Rotterdam/Moerdijk, Chemelot, Vlissingen/Terneuzen, Delfzijl/Eemshaven en het Noordzeekanaalgebied. Samen zijn deze goed voor ongeveer 60% van de industriële CO₂ uitstoot. Deze concentraties bieden de kans op risicoverlaging en (economische) schaalvergroting door samenwerking.

De kleinere verspreide procesindustrie – ook wel cluster 6 genoemd – kan minder makkelijk dit soort samenwerking organiseren. Daardoor spelen deze partijen vaak een voorloperrol voor innovatie binnen de eigen fabriekspoort. Dit zal een belangrijke pijler worden voor de ontwikkeling van een industrie die elektrificeert en kan omgaan met fluctuerende volumes en prijzen van elektriciteit.

3. Een greep uit bewezen oplossingen en methodieken

Het in dit whitepaper beschreven temperatuursinterval van industrieel warmtegebruik (het bereik tot circa 300°C) is een veelbelovend gebied voor industriële verduurzaming op de korte termijn, met grote impact. Het biedt namelijk een groot CO₂-reductiepotentieel, maar bovenal zijn er reeds methoden beschikbaar van een hoog TRL-niveau. In dit hoofdstuk worden een aantal van deze technieken, concepten en methoden gecategoriseerd en toegelicht.

Indeling methodieken

Volgorde van activiteiten

De voorkeursaanpak bij het minimaliseren van het warmteverbruik kent een zekere volgorde van activiteiten (ref 5,6):

- 1 In kaart brengen hoe de warmte-integratie te maximaliseren, digitaal ondersteund door modellen;
- 2 Identificeren van belemmeringen voor dergelijke optimale warmte-integratie;
- 3 Gericht onderzoeken hoe deze belemmeringen op te heffen;
- 4 Als de alternatieven direct beschikbaar zijn, deze inzetten om de best haalbare warmte-integratie toe te passen;
- 5 Als de alternatieven nog verdere ontwikkeling nodig hebben (circa 10-15 jaar), overgaan op het toepassen van de momenteel maximaal haalbare warmte-integratie;
- 6 Zijn nieuwe alternatieven voldoende ontwikkeld, dan deze toepassen; de warmte-integratie afstemmen op de nieuwe situatie zodat een nieuw optimum wordt bereikt;
- 7 Na het uitvoeren van alle bovenstaande opties: toepassen van technologieën gebaseerd op alternatieve vormen van energie om fossiel- en/of CO₂-vrije processen mogelijk te maken.

Deze aanpak houdt rekening met schaarste aan hoogwaardige duurzame energie. Daarom wordt gestreefd om in het lage-temperatuurbereik ten eerste de warmtevrage te minimaliseren. Hoewel deze aanpak de voorkeur heeft, zal deze niet altijd integraal toepasbaar zijn. Daarom is opvolgend een scala aan oplossingen beschikbaar.

Overzicht van oplossingen

Onderstaande tabel bevat een overzicht van belangrijke methoden voor de verduurzaming van lage-temperatuurwarmte. Deze komen allen min of meer terug in de recente update van MMIP 7 (ref 1). Deze tabel is geen totaaloverzicht, maar heeft als doel richting te geven bij de aanpak van deze complexe opgave.

Ook hierbij bestaat een logische volgorde in:

- 1 Allereerst zo veel mogelijk verminderen van het gebruik van (extern verworven) energie (Reduce & Reuse);
- 2 Effectieve inzet van duurzame bronnen (Replace);
- 3 Nuttig gebruik van niet-terugwinbare restwarmte buiten de fabriek (Repurpose).

Systeemintegratie, ondersteund door digitale technieken, is een onderwerp dat al deze pilaren beslaat.

Tabel 1: Overzicht van technieken voor vermindering van warmtegebruik in het lage temperatuurbereik.

Reduce & Reuse	Replace	Repurpose
<ul style="list-style-type: none"> • Energiebesparing en direct hergebruik • Warmte-integratie tussen procesonderdelen (obv pinch-analyse) • Wärmtepompen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geothermie • Elektrificatie • Duurzame brandstoffen • Opslag • Industriële flexibiliteit 	<ul style="list-style-type: none"> • Uitkoppeling (warmtenetten) • Opwek van elektriciteit (Organic Rankine Cycle)
Systeemintegratie en digitale technieken		

Merit order bij toepassing van oplossingen

In grote lijnen volgt de voorkeursaanpak de weg van het geringste verbruik van hoogwaardige energievormen. Lage temperatuur heeft een lagere kwaliteit dan hogere temperatuur, waarbij elektrische energie dan weer een hogere 'kwaliteit' heeft dan warmte. Met andere woorden: de inzet van elektriciteit of duurzame brandstoffen om laagwaardige warmte te genereren is niet de voorkeursroute.

Illustratie: elektriciteit naar warmte en vice versa

Een illustratie van het begrip kwaliteit van energie (ook wel exergie genoemd) is het voorbeeld van een e-boiler.

Stel dat deze met bijna 100% efficiëntie stoom maakt uit water; van 150°C en een druk van 5 bar. Per kg stoom kost dit ~2.100 kJ elektriciteit. Als je vervolgens met deze stoom via een stoomturbine weer elektriciteit zou maken, dan wordt dit slechts voor minder dan 10% weer elektriciteit. Een groot deel blijft over als warmte van een lagere temperatuur. De totale hoeveelheid energie blijft namelijk behouden, maar er is een verlies aan kwaliteit van energie; elektrische energie heeft een hogere kwaliteit dan warmte.

Het omgekeerde principe werkt ook: als je het proces omdraait van turbine naar compressor, dan is er relatief weinig elektriciteit (hoge exergie) nodig om de lage temperatuurwarmte naar een hogere temperatuur te brengen – het principe van de warmtepomp (deze wordt later besproken).

De verduurzaming van lage-temperatuurwarmte volgt dus idealiter een bepaalde merit order: eerst reductie (reduce), dan hergebruik (reuse) en uiteindelijk vervanging (replace):

- 1 Reduceer eerst de hoeveelheid energie die nodig is voor het kernproces;
- 2 Bekijk daarna hoe beschikbare warmte-energie uit de directe of wijdere omgeving als warmte is her te gebruiken;
- 3 Tot slot kan de resterende energiebehoefte duurzaam worden ingevuld:
 - via elektriciteit; direct via bijvoorbeeld warmtepompen of e-boilers, of indirect via e-fuels en/of waterstof;
 - met duurzame warmte; vanuit bijvoorbeeld geothermie of zonnethermie.

Als elektriciteit wordt ingezet voor de generatie van lage temperaturen, gaat dit bij voorkeur via een warmtepomp als er een restwarmtebron is (reuse). Pas als er energetisch gezien geen alternatieven zijn, via de e-boiler. Wel kan elektrificatie hoogwaardig worden ingezet om de totale energiebehoefte van het kernproces zelf te reduceren, bijvoorbeeld via nieuwe, energiezuinigere elektrisch aangedreven technologieën.

De inzet van duurzame elektriciteit (hoewel geminimaliseerd) vraagt zeer waarschijnlijk wel flexibiliteit in de hele energieketen. Zowel bij de opwek als bij de distributie en het industriële gebruik. Ook wordt opslag of import van duurzame energiedragers op diverse plekken in de keten belangrijk.

Voor een effectieve inzet van de oplossingsroutes, is planning vanuit een integraal perspectief nodig. Denk daarbij op diverse schalen; overbrug bedrijfsgrenzen of zelfs sectoren. De implementatie van een dergelijk plan richting 100% duurzaam kan in fases. Daarbij is economische haalbaarheid belangrijk. De eerste megawattens energiereductie zijn namelijk vaak goedkoper dan de latere.

Reduce: energiebesparing en hergebruik

Een eerste strategie voor de reductie van het energiegebruik van processen is gebaseerd op good housekeeping en toepassing van Best Available Technologies (BAT) op bestaande processen. Voorbeelden hiervan zijn:

- Isolatie en verbeterde aandrijvingen;
- Goede metingen en procesbesturing;
- Nieuwe concepten in bijvoorbeeld productscheidingen, zoals membranen als aanvulling op destillatie of in plaats daarvan.

Daarnaast bestaan volledig nieuwe (maar nog laag TRL) concepten om de energiebehoefte per geproduceerde hoeveelheid product verder te verminderen. Deze hebben vooral invloed op onnodige verliezen en op zo direct mogelijk gebruik van exergie. Een concept kan bijvoorbeeld gebaseerd zijn op elektrochemie. Zo kan elektriciteit direct in elektrochemische

reactoren worden gebruikt in plaats van via warmte. Ook nieuwe methoden zijn onderhevig aan een thermodynamische grens: als de producten meer energie bevatten dan de grondstoffen, zul je die energie hoe dan ook moeten toevoeren.

Hieronder een voorbeeld van energiebesparende maatregelen bij het ontwateren van producten en grondstoffen.

Energiezuinig ontwateren en drogen

Een groot deel van de industriële warmtebehoefte gaat naar scheidingsprocessen zoals droog- en indampprocessen. Door de relatief hoge verdampingswarmte van water, is het verwijderen van water enorm energie-intensief. Strategieën voor het verlagen van het energieverbruik bij deze processen, zijn:

1. *Zorgen dat je minder water hoeft te verwijderen*

De hoeveelheid water in vloeistofmengsels heeft invloed op de viscositeit en dus de stroming en verwerkbaarheid van deze vloeistoffen. Het verlagen van de hoeveelheid water vereist technologische innovaties waarmee je de viscositeit (tijdelijk/lokaal) kunt regelen, zodat de vloeistof nog steeds verwerkt kan worden. Dit is vooral relevant in de agro-food en voedingsmiddelenindustrie, maar ook in de papier- en kartonindustrie of andere sectoren waar ze gebruik maken van coatings of lijmen op waterbasis.

2. *Het water verwijderen zonder het te verdampen*

Nadat de hoeveelheid water gedurende het proces en transport geminimaliseerd is, is de volgende stap deze te verwijderen zonder te verdampen. Vaste biomassa en bio-based grondstoffen houden door hun hygroscopische componenten en structuur water vast. Een deel is te verwijderen met mechanische of fysische drukverschillen en/of verhoogde gravitatie (persen, osmose, vacuüm, centrifugeren). Hoe meer water hierdoor verdwijnt, hoe minder water hoeft te verdampen tijdens het uiteindelijke droogproces.

Innovaties richten zich op het verhogen van de efficiëntie van dergelijke ontwateringstechnieken, bijvoorbeeld door het toepassen van ultrasone- of microgolven in combinatie met persen. Innovaties om vloeistofmengsels in te dikken, richten zich ook op nieuwe technieken; met innovatieve semi-permeabele membranen extra drukverschil (Reversed Osmose) of een concentratieverschil (Forward Osmosis) aanleggen. Bij deze technieken bevatten de uiteindelijke producten wel nog steeds een aanzienlijke hoeveelheid water.

Voor het niet-thermisch verwijderen van deze lagere concentraties water zijn innovatievere technieken nodig. Zo worden in het 'Electrified' project (ref 9) elektrische processen ontwikkeld om water te verwijderen zonder het te verdampen. Bijvoorbeeld via elektrolyse met elektroresponsieve hydrogels,

elektro-osmose of elektrohydrodynamisch drogen. Dit is dus een voorbeeld van reduce en replace.

3. Wanneer verdamping nodig is, de energie opgeslagen in de waterdamp terugwinnen

Het verhogen van de kwaliteit van de waterdamp helpt om de efficiëntie van droogprocessen te verbeteren. Een voorbeeld hiervan is 'superheated steam' drying. De hoeveelheid lucht in de dampstroom is bepalend voor de efficiëntie en het gemak waarmee deze warmte kan worden teruggewonnen of hergebruikt. Hoe meer lucht in de waterdamp, hoe lastiger het is om de verdampingsenergie terug te winnen op een bruikbare temperatuur (dauwpunt). Bij veel droogprocessen wordt hete lucht gebruikt om het droogproces te versnellen, condensatie in de apparaten te voorkomen en een goede productkwaliteit te waarborgen. Oververhitte waterdamp zonder lucht valt met damprecompressie relatief simpel op te waarderen tot stoom van hogere druk en temperatuur.

Voor verdamping van de resten aan water is het terugwinnen van de ingevoerde energie uit de waterdamp, met daarin veel (latente) warmte, een optie. Het hergebruiken van deze latente 'verdampingsenergie', in een volgende verdampingsstap of om stoom te maken voor het verdampingsproces, kan aanzienlijke energiebesparingen opleveren. Warmtepompen en stoomcompressie, ook geïntegreerd in het apparaat, zijn hierin belangrijke technologieën.

Let wel: Bij de bovengenoemde ontwikkelingen van nieuwe droogprocessen is energie-efficiëntie niet de enige belangrijke parameter. Ook de kwaliteit van het te drogen product en de snelheid van het droogproces zijn cruciaal.

Reduce en reuse: Systematische interne warmte-integratie

Warmte-integratie

Warmte-integratie bevindt zich op het grensvlak van reduce en reuse. Bij warmte-integratie gaat het om het terugwinnen van warmte met een warmtewisselaar. Vaak zijn er in een fabriek verschillende warme en koude stromen die elkaar kunnen verwarmen en koelen. Bij warmteoverdracht via een warmtewisselaar is een minimaal temperatuurverschil nodig tussen de warme (energieleverende) stroom en de koude (energie vragende) stroom.

Het kiezen van het optimale temperatuurverschil is een optimalisatievraagstuk, waarbij economische haalbaarheid en technische factoren, zoals vervuiling, meewegen. De pinch-analyse is ontwikkeld om systematisch te bepalen hoe dit energetisch optimaal mogelijk is.

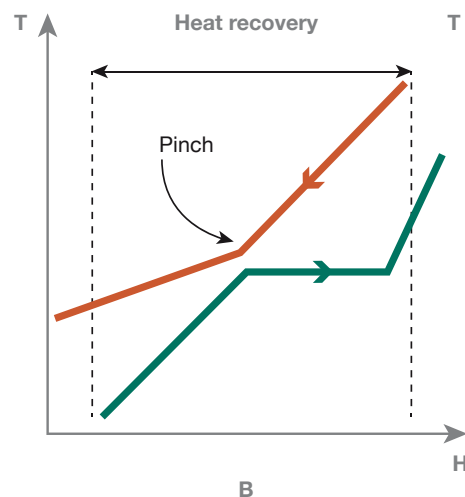
Pinch-analyse

In een pinch-analyse worden de energiestromen van een fabriek gebruikt om de warmte- en koudevraag te bepalen op elke voorkomende temperatuur. Warmteoverdracht tussen warme en koude stromen leidt dan tot temperatuursverandering in zowel de warme stroom (wordt kouder of condenseert) als de koude stroom (wordt warmer).

De pinch-analyse resulteert in een 'composite curve' (zie figuur 2), waaruit de best mogelijke warmteoverdracht wordt bepaald. Op de horizontale as staat de energie-inhoud van de stromen en op de verticale as de temperatuur waarbij de warmteoverdracht kan plaatsvinden. Het gebied tussen de stippellijnen is de maximale hoeveelheid warmte die via warmtewisselaars theoretisch te hergebruiken is. De pijl geeft het 'pinch-punt' aan – een belangrijk gegeven voor het ontwerp van een warmtesysteem.

Uit de composite curve is op te maken:

- Er is veel overlap tussen de warmte leverende stromen (rood) en de warmte vragende stromen (blauw). In dit gebied van overlap zijn warmtevraag en beschikbaarheid gedekt;
- Aan de rechterkant is bij de blauwe stroomwarmte nodig die niet beschikbaar is vanuit 'rood' – hier is externe energieleverantie nodig;
- Aan de linkerzijde is het duidelijk dat er een warmteoverschot is in de rode stroom die niet kan worden overgedragen aan 'blauw'. Op deze gebieden is sprake van restwarmte en er is externe koeling nodig.



Figuur 2: Composite curve, het resultaat van de pinch-analyse.

Bij temperaturen hoger dan het pinch-punt bestaat een netto warmtevraag, onder het pinch-punt is er sprake van een warmteoverschot. Het is dus (wellicht contra-intuïtief) niet efficiënt om via warmtewisselaars warmte van boven de pinch te gebruiken om een stroom onder de pinch op te warmen. Dit zal zowel de netto warmtebehoefte als externe koelingsbehoefte van het proces juist doen stijgen.

Warmtewisselaars en warmtepompen

Een pinch-analyse laat zien dat er vaak voldoende energie-inhoud beschikbaar is (helemaal links) om de overblijvende behoefte (helemaal rechts) te dekken – en dat er een onbalans in de temperatuur bestaat. Warmte van onder de pinch kan dus gebruikt worden om warmtestromen boven de pinch te verwarmen. Een stroom uit een gebied met warmtekort wordt verwarmd met een stroom uit een gebied met warmteoverschot. Dit kan niet via warmtewisselaars omdat warmte niet van lage naar hoge temperatuur stroomt. Met warmtepompen is dit wel mogelijk.

Een betere warmte integratie betekent dus minder behoefte aan externe verwarming of koeling. Een warmtewisselaarnetwerk dat in staat is om de situatie uit de pinch-analyse te bewerkstelligen wordt een MER-warmtewisselaarnetwerk genoemd, waarbij MER staat voor zowel minimal energy requirements als maximal energy recovery.

Bronnen: (ref 4,5,10-15 and appendix 1)

Reuse: de industriële warmtepomp

De toepassing van restwarmte ligt vaak op een hogere temperatuur dan de beschikbare warmtestroom. Reuse, ofwel hergebruik van warmte, houdt in dat een bestaande (lage temperatuur) warmtestroom wordt opgewaardeerd om opnieuw, op een hogere temperatuur, in te zetten. Hiervoor biedt een warmtepomp een aantrekkelijke oplossing.

Verdampingsprocessen (zoals drogen, kristallisatie en distillatie) lenen zich vaak goed voor efficiënt warmtehergebruik. Hierbij vindt vaak binnen een apparaat warmte integratie plaats. Daarnaast kan warmtehergebruik tussen afzonderlijke procesonderdelen plaatsvinden. Dit gebeurt door systematisch het bruikbaar restwarmtepotentieel en de inzet van (hogetemperatuur) warmtepompen te bepalen, via een pinch-analyse.

Open en Gesloten systeem warmtepompen

Er bestaan twee typen warmtepompsystemen: gesloten en open systemen.

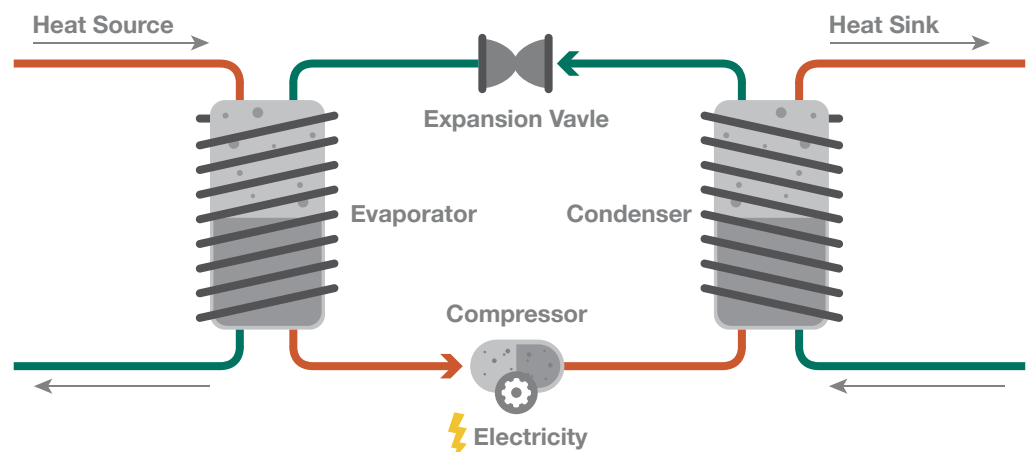
Gesloten systeem

In een gesloten systeem warmtepomp (ref 7, figuur 3) wordt energie uit een warmtestroom op een lage temperatuur overgebracht op een hoge temperatuur warmtestroom. Dit gebeurt in een compressie-expansieproces van een werkmedium.

- In het expansieventiel (expansion valve) verdampt het medium bij lage druk met als resultaat een lage temperatuur. Deze koude stroom wordt in contact gebracht met de warmtebron (de af te koelen stroom).
- Met een warmtewisselaar wordt energie uit deze bronstroom (de koudere stroom) opgenomen.
- De opgewarmde damp wordt meteen elektrische compressor op een hogere druk gebracht. Hierbij stijgt volgens een thermodynamische wet de temperatuur tot een gewenste hoogte.
- Wanneer het gasvormige werkmedium op deze hogere druk en temperatuur is, wordt het weer gecondenseerd. Daarbij levert het via een warmtewisselaar de opgenomen warmte weer af aan de op te warmen stroom.

Netto wordt er dus warmte verplaatst vanuit een afkoelende stroom naar een opwarmende stroom op hogere temperatuur. Het aandrijven van dit proces kost energie, voor het aandrijven van de compressor.

Figuur 3. De werking van een warmtepomp met gesloten systeem.



Open systeem

Er bestaan ook warmtepompen die uitgevoerd zijn als open systemen, zoals stoomrecompressie. Hierbij is geen werkmedium nodig. Stoom is een veelgebruikt industrieel warmtemedium vanwege de grote hoeveelheid warmte die vrijkomt bij condensatie. Gangbare industriële stoomsystemen werken tussen drukken van 3 tot 45 bar met bijbehorende temperaturen tussen 130 °C en 250 °C.

Hoe valt met stroomcompressie restwarmtestromen op te waarden?

- Bijvoorbeeld: er is restwarmte beschikbaar op 120 °C;
- Hiermee kan direct stoom van 110 °C worden geproduceerd, met een warmtewisselaar. Deze stoom heeft een lage druk;
- Via een compressor kan de stoom op een hogere druk, bijvoorbeeld 5 bar, worden gebracht. Bij de compressie stijgt de temperatuur aanzienlijk, tot boven 300 °C;
- Deze (oververhitte) stoom kan bij deze hogere druk bij ongeveer 150 °C worden gecondenseerd en daarbij warmte afgeven;
- Hiermee kan een processtroom tot ca. 140 °C worden opgewarmd via een warmtewisselaar.
- Via de stoomcompressor is dus warmte van een lager temperatuurniveau (120 °C) geschikt gemaakt voor afgifte op een hoger temperatuurniveau (140 °C).

Dit principe werkt zelfs als er stoom wordt gegenereerd op lagere temperaturen, bijvoorbeeld 80 °C of lager. Maar deze stoom is dan laag in druk – 0,5 bar of minder – en moet sterker worden gecompriemd tot de vereiste hogere druk om een bruikbaar warmteniveau te bereiken. Dit kost meer compressiearbeid en geeft dus een lagere efficiëntie, uitgedrukt met een Coëfficiënt Of Performance. Maar ook in dit geval geldt dat er minder arbeid nodig is om de stoom uit de restwarmte te produceren, dan stoom vanuit koud water.

Toepassing van warmtepompen

Warmtepompen (zowel in open als gesloten systemen) maken het dus mogelijk om warmte opgehaald van onder het pinchpunt boven dit punt te gebruiken, door de toevoer van arbeid (elektriciteit). Een warmtepomp levert dus voornamelijk warmte die voorheen geen - of een negatieve - waarde had, samen met een kleiner deel warmte dat is ontstaan uit de toegevoerde elektrische arbeid.

De hoeveelheid benodigde arbeid wordt bepaald door het type en de efficiëntie van de warmtepomp en de temperatuurlift, het verschil in de temperaturen. De hoeveelheid warmte die kan worden overgedragen vereist een grondige studie naar de juiste restwarmte, de benodigde temperatuurlift en de toepasbare technologieën.

De verhouding tussen de geleverde bruikbare warmte en de hoeveelheid toegevoerde arbeid wordt de Coëfficiënt of

Performance (COP) genoemd. De maximale COP in een ideale situatie (een Carnot proces genoemd) is als volgt te bepalen:

$$\text{COP ideaal} = \frac{T_{\text{warm}}}{T_{\text{warm}} - T_{\text{koud}}} = \frac{T_{\text{warm}}}{\Delta T_{\text{lift}}}$$

De COP neemt dus af bij een grotere temperatuursprong en bij een hogere doelt temperatuur.

In de praktijk is 50-70% van de maximale COP haalbaar. De variatie in het rendement hangt ook af van het ontwerp van de warmtepomp. Zo zijn open systemen, zoals damprecompressie (MVR), meestal efficiënter dan gesloten systemen. Daarnaast hebben geavanceerde configuraties veelal een beter thermisch rendement. Systemen met hogere rendementen zijn meestal kostbaarder, waardoor een kosten-batenanalyse nodig is. In de praktijk zijn COP's van 3 tot 15 haalbaar.

Industriële warmtepompen (ook hoge temperatuur warmtepompen genoemd) komen voor in vele vormen en maten. Zo zijn er momenteel warmtepompen beschikbaar van 0,03 MW tot ca. 100 MW en zijn temperaturen tot ongeveer 150-200 °C mogelijk. Er zijn ontwikkelingen om grotere vermogens te kunnen bedienen, en in het geval van stoomrecompressie zijn zelfs hogere temperaturen haalbaar. Het Internationale Energie Agentschap (ref 15) houdt een actueel overzicht bij van mogelijke warmtepomptechnieken.

Replace: vervanging van fossiele bronnen

Na minimalisatie van het energiegebruik en hergebruik komen (hoogwaardige) duurzame energiebronnen in beeld voor verdere verduurzaming. Er zijn verschillende alternatieven: directe elektrificatie, biobrandstoffen, kernenergie en geothermie. Indirecte elektrificatie, met dragers zoals waterstof en daarvan afgeleide producten zoals e-fuels, ammoniak en methanol (ref 2).

De toepassing van deze energiedragers is vaak niet direct mogelijk, maar vergt aanpassingen in het energiesysteem. Dit is de scope van de volgende paragrafen.

Geothermie als warmtebron voor de industrie

Geothermie betreft het oppompen van heet (en zout) water uit natuurlijke waterhoudende grondlagen in de diepte, het overdragen van de warmte op een medium en het terugpompen van het afgekoelde water een stuk verderop. Het basisprincipe is een doublet: een geboorde put voor het oppompen van water (productieput) en een put voor het terugvoeren van het afgekoelde (injectieput).

Gemiddeld gezien stijgt de temperatuur van de aarde met 20 à 30 °C/km. Voor een voldoende hoge temperatuur voor industriële toepassing is dan een diepte nodig van 3 tot 5 km.

Geothermie kent de nodige technische en economische uitdagingen. Voor de benodigde schaal van enkele tientallen megawatts zijn investeringskosten hoog. Daarnaast zijn er onzekerheden bij de aanleg. Zo is permeabiliteit van de ondergrond essentieel, en zijn de verwerking van bijvangst (zoals olie, gas) en corrosie complicerende factoren. Maar is het project een succes, dan is de energie in principe gratis en langdurig beschikbaar. Op de kansenkaarten voor Nederland zijn de economisch haalbare mogelijkheden voor geothermie te zien. (ref 16).

Er bestaan ook geothermieconcepten waarbij er geen water wordt opgepompt, maar op diepte een soort warmtewisselaar wordt aangelegd (ref 17). Hierin wordt een werkmedium zoals bijvoorbeeld ammoniak rondgepompt om zo de warmte te oogsten. Een volgende stap in dit concept is het gebruik van warmtepompen om lage temperatuurwarmte uit geothermie op te waarden. Zo wordt de warmte geschikt gemaakt voor industrieel gebruik.

Elektrificatie en de rol van opslag

Elektrificatie

Momenteel maakt elektriciteit een klein deel uit van het totale primaire industriële energieverbruik – ongeveer 20%. Door elektrificatie zal dit aandeel sterk gaan toenemen. Daarnaast worden in toenemende mate hernieuwbare bronnen ingezet voor elektriciteitsproductie. Een belangrijk verschil met de huidige productie is dat met deze duurzame bronnen, die afhankelijk zijn van de beschikbaarheid van zon en wind, fluctuaties ontstaan in het opwekprofiel. Gebruikers zullen daardoor met een grillige energielevering en/of -prijzen te maken krijgen.

Dat schuurt met de huidige situatie waarin er voor de industrie een constante on demand energievoorziening (base-load) is. Er is nog weinig ervaring met het variabelere opereren van processen. Bij processen met een zekere (thermische) traagheid, kan een vorm van buffering mogelijk zijn waardoor een fluctuerend energiegebruik mogelijk is. Ook batch-processen bieden een mogelijkheid.

Industriële partijen voorzien echter risico's voor de betrouwbaarheid, veiligheid en productkwaliteit. Ook zijn er mogelijk economische nadelen; processen lopen vaak op maximale capaciteit, een verlaagde productie is lastig in te lopen. In het geval van batch-processen geldt dit in mindere mate, maar het kan wel invloed hebben op werkroosters en de eventuele noodzaak van nachtdiensten.

De verwachting is dat als er eenmaal ervaring is in het omgaan met fluctuaties in de energielevering, industriële processen en

energie supply chains zullen komen die veel flexibeler opereren dan de huidige. Maar in de transitiefase zal er nog veel behoefte zijn aan een stabiele energielevering. Het opslaan van energie kan hierbij uitkomst bieden.

Funcities van opslag

Met verdergaande verduurzaming van het energieaanbod wordt opslag snel relevanter en soms zelfs noodzakelijk. Energieopslag voor industriële toepassingen heeft verschillende functies zoals:

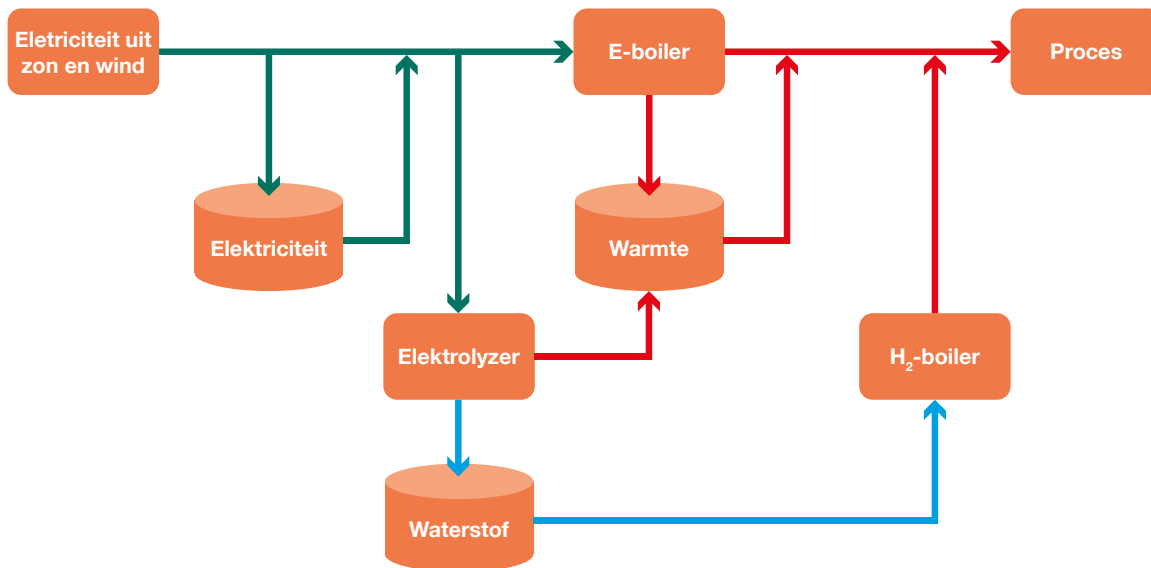
- voorkomen van fluctuaties in de levering dus meer continuïteit in het aanbod om processen van energie te voorzien wanneer het nodig is;
- energieopslag 'achter de meter' kan bedrijven helpen met het oplossen van netcongestie door flexibele afname mogelijk te maken;
- zelf opgewekte duurzame energie, of reststromen van bijvoorbeeld warmte en gas opslaan om later in het productieproces te gebruiken.

Vormen van energieopslag

In het duurzame energiesysteem van de toekomst moeten weers- en seizoensinvloeden worden overbrugd. Daarom zijn verschillende vormen van opslag nodig voor het dekken van alle tijdsintervallen, van (micro-)seconden tot dagen, weken en maanden.

Er bestaan verschillende opslagmethoden, gebaseerd op verschillende energiedragers en technieken. Hoewel ze conceptueel een vergelijkbare functie vervullen, hebben deze elk hun karakteristieken en zijn op verschillende tijdschalen, schaalgrootten en voor andere toepassingen optimaal inzetbaar. Een versimpelde weergave van de rol van opslag bij het stabiliseren van energielevering is te zien in figuur 4.

Voorbeelden van opslagmethoden zijn batterijen, warmteopslag en waterstof. Batterijen kunnen bijvoorbeeld relatief snel bijdragen aan een stabiel elektriciteitsnet, thermische opslag kan huizen en industrieën van warmte voorzien, en duurzame moleculen zoals waterstof zijn in grote volumes op te slaan om seizoenen te overbruggen. In de volgende paragrafen wordt een aantal thermische, elektrochemische en chemische opslagvormen besproken (Bron: ref 18, 35).



Figuur 4: Diverse manieren om energielevering te stabiliseren met behulp van opslag

Thermische opslag

Thermische opslag draait om het opslaan van warmte in een materiaal (medium) en deze ook weer als warmte te onttrekken. Dit kan bijvoorbeeld met een warmtebatterij. De bron is overtollige warmte, of overvloedige elektriciteit. Deze wordt aangeleverd vanuit een warmtebron en met warmtewisselende pijpen door een medium geleid. Deze warmt daarbij op tot temperaturen rond de 400 - 600 °C en slaat zo de warmte op. De warmte komt weer vrij door een warmtedrager (olie of water) door buizen in het hete medium te leiden. Een warmtemanagementsysteem (WMS) zorgt voor een constante warmtestroom bij constante temperatuur. Een warmtebatterij ter grootte van een 40 ft zeecontainer kan ruim 3.0 MWh opslaan (ref 19). De typische round trip efficiency kan naar schatting rond de 90% bedragen (ref 33).

Elektrochemische opslag

Elektrochemische opslag van elektriciteit op industrieel niveau is mogelijk met grote batterijen. Elektriciteit is de input, die in een chemische verbinding wordt vastgelegd en weer als elektriciteit vrijgemaakt. Zulke batterijen zijn samengesteld uit duizenden kleine eenheidscellen en een elektronisch batterij managementsysteem (BMS), dat bewaakt dat de batterij in de veilige bedrijfsmodus werkt en de elektriciteit gelijkmatig verdeelt bij zowel opslag als levering.

Functies die grootschalige batterijen kunnen vervullen in de industrie, zijn:

- Zorgen voor elektriciteitsvoorziening in periodes met weinig elektriciteitsproductie en/of hoge elektriciteitsprijzen (plaatsing al dan niet on-site);
- Optimalisatie van het elektriciteitssysteem;
- Off-grid energieopwekking en -levering mogelijk maken, zoals in energiehubs.

Wel moet men rekening houden met een beperkt maximaantal laadcycli en dat de batterijen voor een optimale levensduur niet volledig volgeladen en ontladen dienen te worden. De grootste schaal voor dit soort industriële batterijen is circa 4 MWh, met een formaat van een 40 ft zeecontainer, een gewicht van 40 t (ref 20) en een maximaal leververmogen van circa 1 MW. De round trip efficiency tussen laden en ontladen ligt naar schatting rond 90% (ref 34).

Chemische opslag en duurzame brandstoffen

Chemische opslag draait om het vastleggen van energie in moleculen. Er zijn verschillende methoden om zulke moleculen te produceren. De vastgelegde energie is te gebruiken als elektriciteit, warmte of de moleculen kunnen op zichzelf een product zijn.

Er zijn verschillende moleculen die zich lenen voor dergelijke opslag. Het kleinste en chemisch eenvoudigst te maken molecuul is waterstof. Ook valt te denken aan complexere producten zoals ammoniak, mierzuur, synthetisch aardgas en methanol. Hierin kan energie worden opgeslagen, maar de moleculen zijn ook direct in te zetten als duurzame grondstoffen voor de industrie.

Er zijn verschillende manieren om waterstof te produceren. In de energietransitie is een belangrijke route de elektrochemische productie van waterstof. Daarbij wordt een elektrolyser gebruikt om vanuit water, met elektriciteit, waterstof en zuurstof te produceren. Het is ook te produceren uit groen gas of biogas via vergassing. De geproduceerde waterstof kan vervolgens worden opgeslagen (via compressie, gebonden aan een drager of als e-fuel) en wanneer nodig worden gebruikt

Er zijn verschillende toepassingen:

- Waterstof is een product op zichzelf. Het wordt al grootschalig gebruikt in de industrie en petrochemie. Dit is nu nog fossiele waterstof. Daarnaast is waterstof een bouwsteen voor de productie van bijvoorbeeld ammoniak en producten zoals synthetische brandstoffen en basischemicaliën zoals methanol of di-methylether – mogelijk op basis van CO₂ als grondstof;
- Waterstof is een energiedrager die zich leent voor grootschalige opslag en transport van energie. Daaraan gerelateerd is waterstof ook de basis voor de productie van andere, afgeleide energiedragers voor mondiaal transport van schone energie.
- Waterstof is om te zetten in elektriciteit, bijvoorbeeld met een brandstofcel of een gasturbine voor verschillende toepassingen. Waterstof kan worden ingezet in mobiliteit voor zwaar vervoer, zowel via brandstofcellen als interne verbranding (ICE);
- Verbranding van waterstof voor de productie van proceswarmte, bijvoorbeeld in een (hybride) boiler;

De energie-efficiëntie van productie en gebruik van waterstof wordt medebepaald door de toepassing. Voor de productie van 1 kg waterstof is circa 50-54 kWh elektriciteit nodig. Bij het omzetten van waterstof in elektriciteit, komt bij de gangbare elektrolyse apparaten ook restwarmte vrij van rond de 70 - 80°C. Afhankelijk van de toepassing kan een deel hiervan nuttig bruikbaar zijn. Als de restwarmte niet nuttig wordt gebruikt, geldt:

- Als de waterstof wordt gebruikt als product op zichzelf, is geen tweede omzetting nodig.
- Bij elektrochemische omzetting van waterstof, bijvoorbeeld voor elektriciteitsproductie, is de bruikbare energie-inhoud 33.33 kWh/kg (LHV). Met een brandstofcel kan waterstof elektrochemisch worden omgezet naar elektriciteit, bij een efficiëntie van 45-65%. Op die manier is ca. 35% van de oorspronkelijk benodigde elektriciteit weer als elektriciteit bruikbaar.
- Bij verbranding van waterstof voor de productie van warmte is de bruikbare energie-inhoud 39.3 kWh/kg (HHV), waarbij de vrijkomende waterdamp wordt gecondenseerd. Als deze in een moderne boiler wordt ingezet met een efficiëntie van rond de 95%, is een totale round trip efficiency van ca. 70-75% te behalen.

Ondanks het energieverlies, vooral bij dubbele conversie, biedt waterstof een aantal mogelijkheden:

- Het kan opslag van grote hoeveelheden hernieuwbare energie mogelijk maken om bijvoorbeeld seizoensopslag te faciliteren.
- Waterstofproductie kan zorgen voor een hoger aantal economische draaiuren van hernieuwbare energie-installaties. Dit biedt tevens een mogelijkheid voor flexibele afname van elektriciteit.
- Waterstof en aanverwante energiedragers bieden de mogelijkheid om duurzaam geproduceerde energie over lange afstanden te transporteren. Dit maakt import van hernieuwbare elektriciteit mogelijk vanuit locaties

met gunstige omstandigheden en overvloed naar locaties met tekorten. Doordat op sommige locaties de capaciteitsfactoren van zon en wind substantieel hoger liggen, kan (een deel van, of het gehele) verlies aan energie in bepaalde gevallen worden gecompenseerd.

Karakteristieken van opslag van waterstof:

- De energiedichtheid van de opslag is hoog ten opzichte van batterijen (elektrisch en thermisch). Een 40 ft tubetrailer met gasvormige waterstof op 500 bar kan ruim 600 kg waterstof bevatten. Dat komt overeen met ongeveer 30 MWh aan energie. Dit is 10 keer zoveel als bij een elektrische of thermische batterij.
- Ook is het mogelijk om waterstof op grote schaal onder druk op te slaan in de ondergrond, bijvoorbeeld in zoutkoepels of in lege gasvelden.

Een nieuwe ontwikkeling betreft metal fuels waarbij waterstof energetisch wordt omgezet met ijzeroxide ('roest') in ijzerpoeder dat een aantrekkelijke opslagcapaciteit per volume-eenheid biedt en waarmee warmte geproduceerd kan worden, op een andere plaats en tijd (ref 21). De 'drager' is daarbij herbruikbaar.

Rol van industriële flexibiliteit

Flexibiliteit in het productieproces is een belangrijke strategie voor de industrie om zich aan te passen aan fluctuaties in energielevering en -prijzen. Wanneer de energiebehoefte in het productieproces zelf iets kan worden verminderd in het geval van schaarste, verkleint dit de benodigde externe of interne opslag. Hiermee is echter nog weinig ervaring. Hier worden twee strategieën besproken.

Koppelen productie en energieopslag

Met energieopslag en deze te koppelen aan opwek, ontstaat al een zekere flexibiliteit in energieafname. In principe kan de flexibiliteit in het volgen van het aanbod aan elektriciteit zelfs 100% zijn, dan blijft het productievolume behouden. Dit vereist wel een grote, en dus kostbare, opslagcapaciteit. Een mogelijk verdienmodel ontstaat wanneer de opslag wordt gevuld bij een groot (en dus goedkoper) aanbod. De opgeslagen energie wordt vervolgens ingezet bij schaarste (en dus hogere prijzen). Een spreiding van de verantwoordelijkheid over de keten van opwek tot gebruik biedt hierbij uitkomst, door het spreiden van risico's, netbelasting en investeringen.

De koppeling van opslag en flexibiliteit ontstaat wanneer de leveringscapaciteit vanuit de opslag minder groot is dan de maximale energiebehoefte, bijvoorbeeld 80% daarvan. Dit betekent niet automatisch dat het productievolume dan moet worden terug geschaald met 20%. Het kan namelijk voorkomen dat ten tijde van schaarste het maximum productievolume wordt gehandhaafd door hybride levering vanuit het grid samen met

de eigen opslag. In de praktijk lijkt dat de opslagbehoefte gelijk is aan een paar dagen energiebehoefte – dit kan nog steeds erg veel zijn.

Voorraden van grondstoffen en (half)fabrikaten

Ook is flexibiliteit mogelijk door (tussen)opslag van grondstoffen en (half)fabricaten. Deze kunnen al een aanzienlijk deel van de totale benodigde energie in het proces bevatten. Bij beschikbaarheid van goedkope hernieuwbare stroom, wordt de productie opgeschaald en grotere voorraden van de meest energie-intensieve producten aangehouden. Op deze manier kunnen tijdens periodes van schaarse en kostbare elektriciteit bepaalde energie-intensieve onderdelen van het proces worden afgeschaald. Dit vereist wel een zekere overcapaciteit om verlaagde productie later te kunnen inhalen.

Samenwerking

Het is dus duidelijk dat flexibiliteit een significante bijdrage kan leveren, maar dat tevens andere buffering nodig zal zijn om een stabiel energiesysteem te handhaven. Het volledig opvangen van schommelingen door individuele industriële partijen is niet altijd mogelijk, zowel qua kosten als qua ruimtebeslag. Er is veel winst te behalen door samenwerking over de energy supply chain. Het gaat daarbij om interne en externe buffering van elektriciteit, warmte, waterstof en diverse afgeleiden daarvan, mogelijk vanuit import, of andere oplossingen zoals metal fuels (ref 21, Bronnen: 33, 34, 35)

Repurpose: Gebruik van intern onbruikbare restwarmte

Uitkoppeling naar derden

Beschikbare restwarmte

Wellicht contra-intuïtief, maar het grootste deel van de warmte die aan een fabrieksinstallatie wordt toegevoerd, komt ook weer vrij – minus de warmte opgeslagen in producten, scheidingsbehoefte en thermische verliezen. De warmtebehoefte van de industrie in Nederland is rond 560 PJ en hiervan komt naar schatting ruim 500 PJ per jaar als restwarmte vrij. Dit is een energiestroom van maar liefst 16 GW. Deze hoeveelheid is theoretisch genoeg om de warmtebehoefte van de bebouwde omgeving volledig af te dekken, die namelijk volgens het Klimaatakkoord in 2030 ca. 333 PJ zal bedragen.

Match tussen beschikbare en gevraagde warmte

Maar de warmte is niet altijd zonder meer toepasbaar in bijvoorbeeld de gebouwde omgeving en tuinbouw. De koppeling is niet eenvoudig te maken, vanwege:

- Het verschil tussen geleverde en benodigde temperatuur: De benodigde aanvoertemperatuur voor verwarming is rond de 60-70°C, terwijl veel restwarmte uit de industrie uiteindelijk (na maximaal intern of extern industrieel hergebruik) rond de

40-50 °C ligt. Voordat de warmte bruikbaar is, moet deze eerst worden opgewaardeerd.

- De match tussen vraag- en aanbodprofielen: er zijn piekuren in de vraag, en in sommige sectoren ook variaties in de productie. Dit geldt op korte (minuten, uren, dagen) en langere (weken, maanden) termijn. Om deze verschillen op te vangen, is buffering nodig.
- Seizoeneffecten: Het vraagprofiel van warmte en de beschikbaarheid over het jaar komen niet overeen. De warmtebehoefte voor de gebouwde omgeving ligt grotendeels in de maanden november t/m maart. In deze periode is de vraag groter dan de industriële warmteproductie. In de zomer is het andersom; de warmtevraag is veel kleiner dan de beschikbare industriële restwarmte.
- Leveringszekerheid: De beschikbaarheid van warmte voor bijvoorbeeld huishoudens wordt (mede) afhankelijk van levering door de industrie. Bij een (tijdelijke) uitval in de industrie of als er minder restwarmte beschikbaar komt, zijn er alternatieven nodig.
- Fysieke afstand: Bepalend voor de haalbaarheid, kosten en de resterende temperatuur.

Om de industriële restwarmte van lage temperatuur nuttig te kunnen toepassen, zijn verschillende (grootschalige) oplossingen denkbaar:

- Een opwaarderingsstap die de temperatuur op de juiste waarde brengt; deze oplossingen – zoals warmtepompen - zijn op sommige plekken al in gebruik of in ontwikkeling. Voorbeelden hiervan zijn te vinden in bijv. ref 22,23.
- Een grote warmtebuffer voor industriële warmte die nu, meestal na koeling, in de omgeving verdwijnt. Te denken valt aan een groot bassin in de buurt van een grote waterweg en stad. Ook kan de waterweg zelf overwogen worden, rekening houdend met omgevingseffecten.

Organische Rankine-cyclus

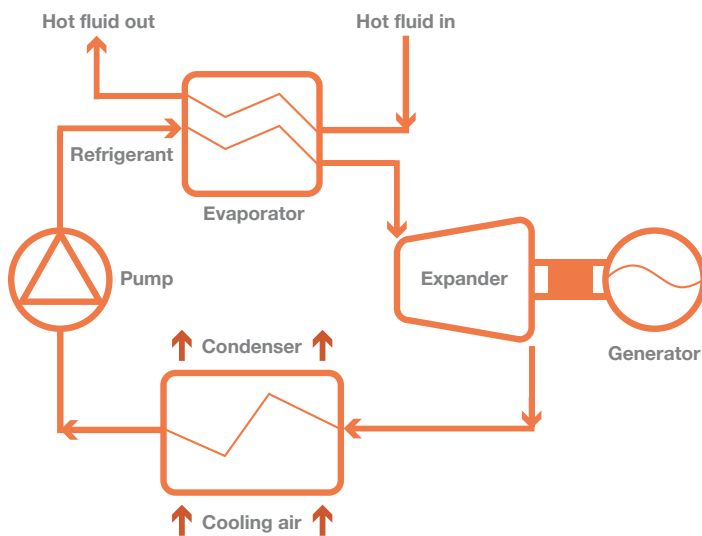
Eerder is toegelicht dat restwarmte van lage temperatuur het beste toe te passen is om andere stromen te verwarmen. Het is namelijk een thermodynamisch gegeven dat de kwaliteit van de warmte afneemt met de temperatuur die het heeft. Restwarmte heeft vaak een lage temperatuur na het toepassen van de bovenstaande technieken, waardoor het moeilijk nuttig te gebruiken is. Toch bevat deze warmte nog veel energie.

Volgens industrie-experts zouden enkele tientallen procenten van de energie die wordt ingevoerd in een fabriek weer als energiebron te gebruiken zijn. Oftewel: de warmte is technisch en praktisch te verkrijgen, en heeft een voldoende hoge temperatuur. Te denken valt aan warmte bij de schoorstenen van industriële fornuizen.

Organic Rankine Cycle

Deze warmte kan, indien mogelijk, worden ingezet in een warmtenet. Maar als dit niet mogelijk is, is er een alternatief: de Organic Rankine Cycle (ORC). ORC-systemen zetten restwarmte van industriële processen om in arbeid, om daarmee bijvoorbeeld elektriciteit te produceren.

De ORC-cyclus werkt op een vergelijkbare manier als de waterstoom cyclus van een elektriciteitscentrale, maar maakt gebruik van organische media met lagere kookpunten dan water. Een dergelijk medium verdampt wanneer het wordt blootgesteld aan restwarmte. Dit gebeurt bij lagere temperaturen (en bij hogere druk) waardoor ORC-systemen effectief energie kunnen halen uit lage-temperatuurbronnen. Vervolgens wordt de damp van druk gelaten, waarbij arbeid wordt verricht om elektriciteit te maken. Tenslotte wordt het medium gecondenseerd en via een pomp op druk gebracht voor de volgende cyclus. Zie figuur 12.



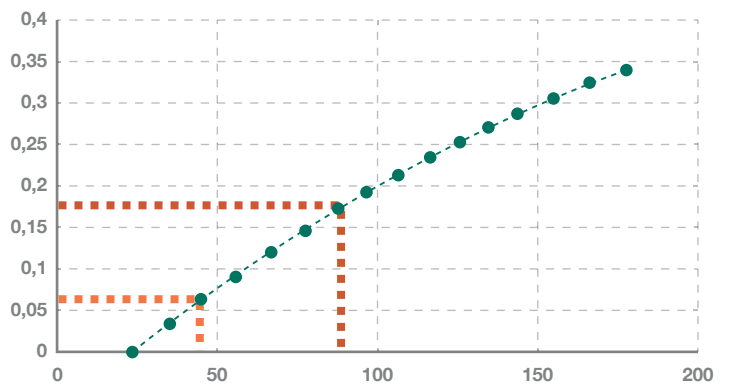
Figuur 5: Principe van de Organic Rankine Cycle

Efficiëntie

De maximaal haalbare efficiëntie van elektriciteitsproductie hangt af van de temperatuur van het energiedragende medium, zie figuur 11. De Carnot Efficiency is een maat voor de bruikbaarheid van de restwarmte voor het verrichten van arbeid, waarbij 1 de maximale potentiële efficiëntie is, en 0 betekent dat een stroom geen arbeid kan verrichten.

Aangezien de restwarmte in dit gebied vaak tussen 40-80 °C ligt, is deze theoretisch nog bruikbaar om arbeid te verrichten. Echter is de efficiëntie hiervan laag. De Carnot efficiency ligt rond de 6-18% en het daadwerkelijke rendement van omzetting zal ongeveer de helft hiervan bedragen. Direct gebruik als verwarmingsmedium heeft dus de voorkeur. Is dat niet mogelijk, dan kan de ORC een duurzame oplossing bieden als alternatief voor koeling tot de toegestane temperatuur.

Carnot Efficiency bij diverse temperaturen (DegC)



Figuur 6: Bruikbaarheid van de restwarmte voor arbeid bij diverse temperaturen

Toepassingsvoorbeelden

ORC-technologie wordt al praktisch toegepast:

- Terugwinning van restwarmte uit industriële ovens, fornuizen en andere thermische processen;
- Benutting van restwarmte uit producten van raffinaderijen en chemische processen;
- Warmteterugwinning uit pulpproductie en recovery boilers in de papier- en kartonindustrie;
- Terugwinning van restwarmte uit cementovens en klinkerkoelers;
- Benutting van restwarmte uit staalproductieprocessen.

De levensvatbaarheid en voordelen ervan zijn in verschillende industrieën aangetoond. Enkele voorbeelden:

- Een cementfabriek heeft een ORC-systeem geïntegreerd om restwarmte van de klinkerkoeler terug te winnen, waardoor ongeveer 2 MW aan elektriciteit wordt opgewekt en de koolstofvoetafdruk van de fabriek jaarlijks met 8 kton vermindert.
- Een petrochemische fabriek heeft restwarmte van de fakkelininstallaties omgezet in 3 MW aan elektriciteit, wat bovendien een vermindering van 90% van de fakkelluitstoot opleverde.
- Een industriële bakkerij heeft een ORC-systeem geïntegreerd bij de ovens, waardoor 200 kW aan elektriciteit wordt opgewekt en het energieverbruik met 15% is verminderd.

Status en outlook

ORC-systemen zijn dus, net als warmtepompen, een optie voor het optimaliseren van het gebruik van restwarmte, zodat de algehele energie-efficiëntie in industriële processen toeneemt. Maar er zijn nog wel uitdagingen voor onderzoek en technologische ontwikkelingen, zoals de selectie van het werkmiddel met de ideale thermodynamische eigenschappen en de investeringskosten. Deze zijn te vergelijken met die van de warmtepomp.

Bronnen: ref 24-32

4. Discussie

Take aways

Een belangrijk voordeel bij de verduurzaming van de lage temperatuurwarmte is dat al bestaande en bewezen technologie beschikbaar is, om de grootste verbeteringen te maken. De technologie die in dit paper is beschreven, is al op korte termijn toepasbaar. Hier bespreken we een nuttige aanpak bij het kiezen en implementeren van oplossingen, inclusief de uitdagingen.

Voorkeursaanpak

Behoud van exergie

De voorkeursroute voor lage temperatuurwarmte is ten eerste: streven naar optimale interne en externe uitkoppeling. Met warmte-integratie kan warmte zoveel mogelijk direct worden benut, zodat de minste exergie verloren gaat. Als warmte-integratie niet mogelijk is, bieden warmtepompen uitkomst. Hiermee kan veel energie worden teruggewonnen, terwijl relatief weinig energie nodig is.

Lage temperatuurwarmte kan weinig bruikbare arbeid verrichten. Dat beperkt de inzetmogelijkheden. We moeten dus voorkomen dat hoogwaardige energiedragers onnodig worden omgezet in laagwaardigere energiedragers. Dit gaat gepaard met verlies van exergie, wat uit systeemperspectief suboptimaal is. Dit gebeurt bij het gebruik van elektriciteit voor productie van lage temperaturen, bijvoorbeeld in elektrische boilers. Bij inzet van elektriciteit voor productie van hogere temperaturen, bijvoorbeeld bij elektrische fornuizen, blijft een groter deel van de exergie behouden.

Flexibiliteit, opslag en import

- De industrie gaat door de voortschrijdende rol van elektrificatie en hernieuwbare energie, anders om met de levering van energie: Flexibiliteit versus baseload: Door de fluctuaties in hernieuwbare elektriciteitsopwek zal baseload energie duur worden of op tijden zelfs niet beschikbaar zijn. Daarom is onderzoek nodig naar mogelijkheden van grotere flexibiliteit.
- Opslag van energie: In de toekomst is er veel opslag nodig voor warmtelevering aan de industrie. Opslag dempt de fluctuaties enigszins, maar voor volledige dekking is een grote opslagcapaciteit nodig. Hiervoor zijn verschillende oplossingen mogelijk, met voor- en nadelen. Elektrochemische opslag in batterijen is energie-efficiënt, maar kost veel geld en ruimte. Opslag in de vorm van moleculen vergt minder ruimte, bijvoorbeeld als waterstof in zoutcavernes, maar levert energieverlies op bij de omzetting. Afwegingen zijn specifiek per toepassingsgebied.
- Import van hernieuwbare energie, via verschillende energiedragers. Dit levert meer flexibiliteit op in termen van bronnen en dragers. Opties zijn waterstofdragers en synthetische brandstoffen. Maar deze ketens zijn nog niet op schaal aanwezig. Ook liggen momenteel de kosten (nog) een stuk hoger dan bij de fossiele alternatieven.

- Samenwerking over de supply chain: Stabiliserende maatregelen verdelen over de hele energie supply chain. Dit zal een samenspel vereisen tussen gebruikers en transporteurs van energie waarbij diverse interne opslagvormen en externe opslag en/of import uit het buitenland een grote rol speelt.

Stappenplan flexibiliteit

Voor het bereiken van deze nieuwe situatie zijn dus veranderingen en verdergaande samenwerking nodig. Hierbij zijn de volgende stappen aan te raden:

- Verbeteren van energie-efficiëntie door lager energieverbruik in het productieproces, alternatieve concepten en inzet van bijvoorbeeld warmtepompen.
- Samenwerking tussen bedrijven, energieleveranciers en netbeheerders in de spreiding van stabiliseringslasten. Korte termijn opslag (uren/dagen) kan door bedrijven zelf, of in collectief, worden ondervangen, terwijl langere termijn opslag extern wordt geregeld.
- Collectieve realisatie van energie-hubs, met daarin verregaande energiebesparing, energie-uitwisseling en collectieve opslag. Dit is mogelijk door het energiesysteem kritisch te evalueren, warmte maximaal te hergebruiken en alternatieve lokale bronnen, zoals geothermie, aan te spreken.
- Flexibele industriële productie, om de energiebehoefte te verminderen bij lager aanbod van duurzame elektriciteit. Dit vereist specifieke kennis en aanpassingen van de supply chain. Overheden kunnen de genomen maatregelen en risico's belonen met incentives in de prijs van elektriciteit en/of afroepbare flexibiliteit.

Uitdagingen voor toepassing

De beschreven oplossingen zijn over het algemeen technisch bewezen. Wel zijn nog technische en economische innovaties nodig, voordat ze breed toepasbaar zijn.

Beschikbaarheid restwarmte in de toekomst

Het is te verwachten dat tijdens de transitie een groot deel van de bestaande processen nog door warmte gedreven blijft. Een deel van de processen kan worden vervangen door niet warmtegedreven processen, zoals directe elektrificatie. De verwachting is wel dat er altijd een industriële warmtevraag zal bestaan.

Lage temperaturen

Bij lagere temperaturen is de bruikbaarheid van de energie voor verwarming of aandrijving sterk verlaagd. Een belangrijk werkgebied voor innovatieve oplossingen is om deze industriële warmte toch terug te winnen, zowel voor intern gebruik als eventuele externe levering.

Inpassing apparatuur

De technische inpassing van apparatuur voor warmte-integratie is een punt van aandacht. De traditionele operatie wordt aangevuld met extra apparatuur die beneden het pinch point warmte ophaalt en deze boven het pinch point weer afgeeft. Dit maakt het complexer.

Warmtenetten

Warmte met een te lage temperatuur voor intern gebruik is wellicht geschikt voor warmtenetten. Hierbij ligt de uitdaging vooral bij het beheersen van de operationele risico's, kosten van winning, vraag en aanbodprofielen, contracten, verplichtingen en wetgeving. Er moeten genoeg uitkoppelbare bronnen zijn en de transportafstand moet niet te groot zijn. Het ontsluiten van de warmte is een zoektocht per fabriek. Hierbij biedt de 80/20 regel een goed handvat, om met relatief weinig moeite de grootste hoeveelheden warmte te ontsluiten.

Warmtevraag en -aanbod

De warmtevraag van diverse sectoren (zoals gebouwde omgeving en tuinbouw) is sterk seizoenafhankelijk. Daardoor is de afname niet gegarandeerd en moet de industrie nog steeds, en met name in de zomer, warmte aan de omgeving afstaan. Hierdoor blijven koelinstallaties nodig. Bepaalde vormen van warmteopslag kunnen de seizoenen overbruggen. Dit gaat om grote capaciteiten. Voorbeelden zijn bassins met koelwater. Voor een mismatch tussen de beschikbare en gevraagde temperatuur, zijn er grootschalige (> 10 MW) warmtepompen (zowel centraal als ook decentraal). Dit vereist een systeemperspectief, lokaal maatwerk, en grote investeringen.

Procesoperatie

Door verregaande integratie kan de operatie van processen moeilijker worden. Dit heeft mogelijk impact op productkwaliteit en productievolumes, warmtewisseling en vervuilingprocessen. Daarom verdienen ook operabiliteit en onderhoud de aandacht bij het implementeren van plannen voor warmte-integratie.

Conceptueel begrip van de techniek

Bij de uitvoering van verduurzaming is conceptueel begrip van de techniek nuttig. Relevante onderwerpen zijn o.a.:

- Pinchanalyse en warmte-integratie;
- Warmtepompen;
- Industriële flexibiliteit;
- Energieopslag.

Op de website van TKI E&I verschijnen in de toekomst regelmatig artikelen en rapporten over deze technische onderwerpen. Deze hebben als doel kennis te verbreden en te zorgen dat bedrijven elkaar weten te vinden.

Doorkruisende thema's

Naast de oplossingen voor het verminderen van energiegebruik, die in verschillende pilaren zijn in te delen, is een aantal doorkruisende thema's aan te wijzen. Deze overschrijden de verschillende pilaren. Dit zijn onder meer:

- Digitalisering
- Human capital agenda en learning communities
- Maatschappelijk Verantwoord Ondernemen

Op de website van TKI E&I staan ook artikelen en rapporten over deze doorkruisende thema's.

Aanpak voor innovatie en implementatie

Ontwikkeling en demonstratie van betrouwbare systemen

Een analyse van de risico's is belangrijk, voor de toepassing van nieuwe energiesystemen. Dit is, naast een terugverdientijd van een project, een belangrijke factor voor bedrijven. Het moet bewezen zijn dat systemen werken, ter voorkoming van veiligheids- of betrouwbaarheidsincidenten.

Testen en demonstratie van systemen is dus nodig. Hiervoor bestaan innovatie- en demonstratiesubsidies. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de beschikbare subsidies. TKI E&I kent het subsidielandschap en de mogelijkheden. Relevant is bijvoorbeeld de MOOI subsidie (Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatiesubsidie) van de RVO. Deze ondersteunt brede, multidisciplinaire samenwerkingsverbanden rondom onderzoek en ontwikkeling van integrale oplossingen voor innovatie-uitdagingen.

De beschikbaarheid van (gedeelde) testfaciliteiten helpt ook bij het versnellen van de implementatie van innovatieve technieken. TKI E&I stelt zich op als matchmaker en kan ook hierin de weg wijzen.

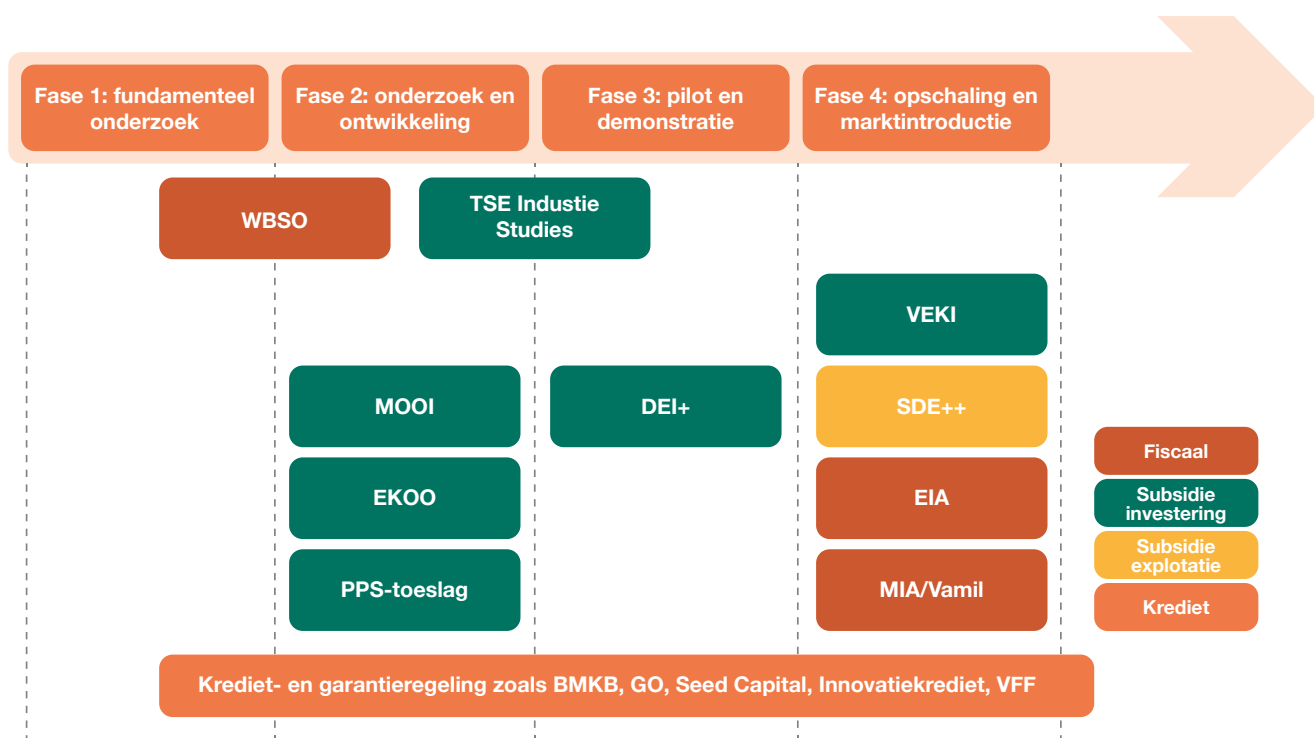
Zekerheid business cases

Technische barrières bij verduurzaming van lage-temperatuurwarmte zijn meestal op te lossen. Voor snelle implementatie is vooral nodig:

- Het mitigeren van risico's;
- Stimuleren van actie en belonen van koplopers;
- Het bieden van (lange termijn) zekerheid voor leveranciers en gebruikers van de warmte;
- Afdoende compensatie van het effect op CO₂-emissiereductie, voor het ontwikkelen van een acceptabele business case.

Voorkomen van fossiele lock-in

De rol van de industrie in een duurzaam warmtesysteem staat soms ter discussie, omdat de warmte een fossiele oorsprong heeft. Hierdoor bestaat kans op een (gedeeltelijke) lock-in bij deze fossiele manier van produceren. De mogelijkheid om restwarmte op deze manier te gebruiken is echter niet



Figuur 7: Overzicht subsidies van RVO.

per definitie tijdelijk. In de toekomst produceert de industrie namelijk, bij gebruik van deze hernieuwbare bronnen, nog steeds restwarmte. Deze zal steeds meer een hernieuwbare oorsprong hebben. Dit betreft dan wel kleinere hoeveelheden en warmte van gemiddeld lagere temperatuur. Om lock-in en wegvallen van bronnen te voorkomen is diversificatie van bronnen nodig.

Toepassing van lage temperatuurtechnieken in hoger temperatuurbereik

De meeste oplossingen in dit paper zijn toepasbaar in het gebied tot ca. 200 à 300 °C. Maar er zijn al initiatieven die de technieken bij hogere temperaturen toepassen, tussen de 300 °C en 400 °C. Dit biedt kansen omdat hiermee in sommige gevallen misschien een complete ombouw van het productieproces niet nodig is. Tot nu toe is er echter nog maar weinig kennis op dit gebied. Daarom bevelen we aan om te onderzoeken of de technieken voor lage temperaturen ook voor hoge temperaturen toe te passen zijn.

Integraal perspectief en samenwerking

Fossiele energiedragers worden uiteindelijk vervangen door CO2-vrije energie, met een grote rol voor elektrificatie. Hierbij is samenwerking (tussen bedrijven onderling en spelers binnen de hele elektriciteitsketen), flexibiliteit in de procesvoering en diverse energie-opslagvormen essentieel.

Naast de beschikbaarheid van betrouwbare technologie vereist de aanpak een integraal perspectief, zowel op het energiesysteem binnen de fabriekspoort als de mogelijke interactie met fabrieken in de nabije omgeving en zelfs andere sectoren (zoals tuinbouw en bebouwde omgeving).

Zo'n samenwerking zijn bedrijven niet gewend. Het vraagt om aanpassingen in de bedrijfsvoering. Het integrale perspectief is niet altijd aanwezig bij individuele bedrijven. Ook is samenwerking op verschillende terreinen rond energie niet gebruikelijk. Kennisvergaring en nieuwe relaties zijn nodig voor het succesvol realiseren van de transitie en het omgaan met de uitdagingen die erbij komen kijken. Daarbij moet op diverse schalen worden gedacht, met overbrugging van bedrijfsgrenzen of sectoren.

Actieagenda

In de komende jaren is voor het spoedig en gedegen uitvoeren van de verduurzaming van lage-temperatuur warmte een aantal zaken nodig. Belangrijk is op te merken dat industriële partijen niet alleen voor deze opgave staan, en dat deze activiteiten vaak in aanmerking komen voor subsidie. Er is onder meer nodig dat:

- er (meer integrale) plannen worden ontwikkeld voor de verduurzaming van lage-temperatuur warmte, door de implementatie van de technieken zoals besproken in dit paper en in MMIP 7. Dit is een taakstelling voor verschillende partijen; industriële bedrijven en clusters, overheden, kennisinstellingen, aanbieders van infrastructuur, energie en voorzieningen.
- kennis wordt overgedragen over welke technologieën waar het meest effectief toepasbaar zijn;
- partijen starten met het opdoen van ervaring met concrete (demonstratie)projecten, ook al hebben deze een kleinere schaal dan de uiteindelijke toepassing;
- nieuwe samenwerkingen tot stand komen; tussen branchegeenoten, verschillende bedrijven en instellingen, tussen sectoren, en over de waardeketens van elektriciteit en energie - ook waar dit niet gebruikelijk is;
- intensievere kennisoverdracht over opgedane ervaringen en mogelijkheden plaatsvindt, in wederzijds belang;
- meer gebruik wordt gemaakt van subsidies en ondersteuning (door betere bekendheid met het subsidielandschap);
- ervaringen uit de gedane demonstraties en opgedane ervaring beter beschikbaar is;
- partijen informatie over innovatieve mogelijkheden beter weten te vinden door matchmaking en beter bewustzijn;
- projecten opstarten op basis van reeds beschikbare technologie, waarvoor de mogelijkheden er al zijn.
- er meer inzicht komt in het belang van energie-efficiënte versus flexibiliteit, en de impact daarvan op de benodigde proceswijzigingen (en bijbehorende investeringen).
Investerings in energie-besparing zijn namelijk doorgaans een achteruitgang in flexibiliteit. En flexibele processen zijn vaak niet energie-efficiënt.

Hierdoor kan de implementatie van technologie versnellen, om de doelen uit MMIP 7 en het Klimaatakkoord te bereiken.

Om dit aan te jagen en hierin de weg te wijzen, is TKI E&I een aangewezen partner. TKI E&I is te benaderen voor advies, het delen van kennis, matchmaking en verwijzing naar relevante kennispartners

Blijf op de hoogte via onze website. Hierop publiceren we de komende tijd deep dives over verschillende effectieve technieken.

5. Conclusie

In het kader van het Klimaatakkoord ligt er een opgave om het gebruik van lage temperatuurwarmte in de industrie te verminderen en te verduurzamen. Hoewel het einddoel voor 2050 is gesteld, zijn er voor 2030 al belangrijke stappen te zetten. Lage-temperatuurwarmte is een aantrekkelijk gebied voor verduurzaming op korte termijn. Technisch gezien zijn veel van de oplossingen al mogelijk en het potentieel voor vermindering van CO₂-uitstoot is groot.

Binnen het Missiegedreven Innovatiebeleid is verduurzaming van lage-temperatuurwarmte onderdeel van MMIP 7, met als einddoel een CO₂-vrije industriële energiehuishouding in 2050. Dit whitepaper biedt handvatten bij de interpretatie van MMIP 7. Het geeft oplossingen voor de verduurzaming van het segment van industriële warmte tot ca. 200 à 300 °C in de periode tot 2030. Ook biedt het inzicht in een aantal beschikbare oplossingen, uitdagingen bij de toepassing en de benodigde acties om realisatie ervan te versnellen. Dit whitepaper is vanzelfsprekend niet volledig in alle beschikbare oplossingen.

Het optimaliseren van het gebruik van lage temperatuurwarmte kan overkomen als een complexe opgave. Er bestaan onderlinge afhankelijkheden. Het is daarom nuttig om oplossingen in een bepaalde volgorde toe te passen. Deze voorkeursaanpak volgt zoveel mogelijk het behoud van exergie. Daarvoor is in dit paper de volgende indeling gemaakt:

Reduce & Reuse	Replace	Repurpose
<ul style="list-style-type: none"> Energiebesparing en -hergebruik Warmte-integratie tussen procesonderdelen (pinch-analyse) Warmtepompen 	<ul style="list-style-type: none"> Geothermie Elektrificatie Duurzame brandstoffen Opslag Industriële flexibiliteit 	<ul style="list-style-type: none"> Uitkoppeling (warmtenetten) Opwek van elektriciteit (Organic Rankine Cycle)
Systeemintegratie en digitale technieken		

Veel van de oplossingen zijn op technisch vlak al gedemonstreerd en bewezen. De uitdaging ligt vooral in het verhogen van de betrouwbaarheid van de systemen en het opdoen van (praktijk)ervaring. Veel oplossingen zijn nog relatief kostbaar, hoewel ze uiteindelijk energiebesparing opleveren. Daarom is ook kostenreductie belangrijk. Ten slotte vraagt de aard van veel oplossingen om nieuwe samenwerkingen, in de keten en cross-sectoraal.

In de komende jaren vraagt de verduurzaming van lage-temperatuur industriële warmte onder meer om:

- plannen om de verduurzaming van lage-temperatuur warmte op een meer integrale wijze vorm te geven, en oplossingen in onderling verband te zien;
- te starten met het opdoen van ervaring met concrete (demonstratie)projecten;
- nieuwe samenwerkingen, tussen branchegenoten, verschillende bedrijven en instellingen, en tussen sectoren, ook waar dit niet gebruikelijk is;
- verbeterde kennisoverdracht en het delen van ervaringen uit demonstratieprojecten;
- het efficiënter aanspreken van subsidies en ondersteuning;
- het beter vinden en benutten van informatie over innovatieve mogelijkheden; het opstarten van projecten op basis van albeschikbare technologie, waarvoor mogelijkheden al voorhanden zijn.

TKI E&I kan hierbij helpen met advies, het delen van kennis, matchmaking en kan verwijzen naar relevante kennispartners.

Ook zal TKI E&I meer informatie publiceren over verduurzaming van lage temperatuur industriële warmte. Enerzijds voor conceptueel en technisch begrip over bijvoorbeeld warmte-integratie en pinchanalyse, warmtepompen, industriële flexibiliteit en energieopslag. Anderzijds zijn er doorkruisende thema's zoals digitalisering, human capital agenda, learning communities en maatschappelijk verantwoord ondernemen. Blijf op de hoogte via onze website en artikelen voor verdere verdieping.

6. Referenties

1. Herijking MMIP 7. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/beleidsnotas/2023/07/11/beslisnota-kamerbrief-evaluatie-energie-innovatie-instrumentarium-en-herijking-mmip-s>
2. Routekaart Elektrificatie in de Industrie
3. Rijksoverheid (2018). Klimaatakkoord, gepubliceerd door de Rijksoverheid in oktober 2018, <https://www.klimaatakkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>
4. Warmtestudie Botlek (Rotterdam) - <https://www.deltalinqs.nl/cms/showpage.aspx?id=5715>
5. de Raad, Brendon, et al. "Exploring impacts of deployment sequences of industrial mitigation measures on their combined CO2 reduction potential." Available at SSRN 4081796 (2023).
6. de Raad, Brendon, et al. "Improving Plant-Level Heat Pump Performance Through Process Modifications." Available at SSRN 4582860 (2023.)
7. J.M. Smith. HC van Ness, MM Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 7th edition, 2005
8. Bron: Voorbeelden vanuit "The Heat is On" platform voor voor ontwateren, drogen en warmte integratie. <https://ispt.eu/projects/the-heat-is-on/>
9. Electrified. Inter-universiteits project om energie te besparen in droogprocessen. <https://www.wur.nl/en/newsarticle/electric-technology-to-save-energy-in-drying-processes.htm>
10. Infantes Feriera, C.A.
11. Kemp, I.C. (2006). Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, 2nd edition. Includes spreadsheet software. Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-8260-4. (1st edition: Linnhoff et al., 1982).
12. Kemp, I.C. and Lim, J.S. (2020). Pinch Analysis for Energy and Carbon Footprint Reduction: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, 3rd edition. Includes spreadsheet software. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-102536-9.
13. Linnhoff, B., D.W. Townsend, D. Boland, G.F. Hewitt, B.E.A. Thomas, A.R. Guy and R.H. Marsland, (1982) A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. IChemE, UK.
14. Shenoy, U.V. (1995). Heat Exchanger Network Synthesis: Process Optimization by Energy and Resource Analysis. Includes two computer disks. Gulf Publishing Company, Houston, TX, USA. ISBN 0-88415-391-6.
15. international energie agentschap (IEA) <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/> .
16. Kansenkaart geothermie: <https://www.nationaalgeoregister.nl/geonetwork/srv/api/records/8975c895-385c-45fd-ae68-d82a834b85fa?language=all>.
17. Eavor concept: <https://www.eavor.com>
18. National Actieplan Energieopslag 2019 - <https://www.energystoragenl.nl/wp-content/uploads/2019/03/ESNL-NAPEOC-2019-web.pdf>
19. Internet search: Energy Nest. <https://energy-nest.com/thermal-battery/#:~:text=Standardized%20modular%20thermal%20energy%20storage%20technology&text=A%2020ft%20module%20can%20store,module%20up%20to%203%20MWh>.
20. Internet seach: Tesla Megapack <https://www.tesla.com/megapack>
21. Ironfuel technology (<https://www.ironfueltechnology.com>)
22. Een goed voorbeeld van dit laatste is de recente warmtepompontwikkeling van Eneco bij Utrecht en Nieuwegein van 27 MW warmte – goed voor 20.000 woningen in het geval van 6000 uur per jaar operatie. (<https://www.eneco.nl/over-ons/wat-we-doen/grootste-warmtepomp/>).
23. Internationaal kijkend, het stadsverwarmingssysteem in Stockholm, heeft een maximale capaciteit van 215 MW – met in totaal zeven warmtepompen, twee 40 MW en vijf 27 MW-apparaten. (<https://www.bbc.com/news/business-65321487#:~:text=Take%20the%20district%20heating%20system,energy%20provider%20Stockholm%20Exergi%20explains>).
24. [1] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/organic-rankine-cycle>
25. [2] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217340286>
26. [3] <https://orc-world-map.org/docs/WorldOverview2017.pdf>
27. [4] <https://www.exergy-orc.com/technology/orc/>
28. [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle
29. [6] <https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zentren/iefe/PDFs/orc-final-paper-wec2011-2011-07-30.pdf>
30. [7] <https://www.durr.com/en/products/decentral-power-generation/cyplan-orc>
31. [8] <https://www.durr.com/en/products/decentral-power-generation/cyplan-orc>
32. [9] <https://www.alfalaval.nl/nl/industrieen/energie-en-nutsvoorzieningen/duurzame-oplossingen/duurzame-oplossingen/energy-efficientie/terugwinnen-van-restwarmte/orc/>
33. Bijvoorbeeld <https://celsiuscity.eu/thermal-energy-storage/>
34. Bijvoorbeeld <https://rechargebatteries.org/>
35. TKI Energie en Industrie (2022). Whitepaper industriële flexibiliteit <https://topsectorenergie.nl/nl/kennisbank/whitepaper-industriele-flexibiliteit/>



tki energie & industrie
topsector energie