

Sustainable Process Heating

TNO 2024 R10884 – 6 mei 2024

Sustainable Process Heating

Auteurs	S. Spoelstra
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	37 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	SPOT
Projectnummer	060.40290

Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Achtergrond en doelstellingen	5
3 Resultaten	7
3.1 Koolstofvrije brandstof voor hoge-temperatuur industriële toepassingen	7
3.2 Warmtekrachtkoppeling gebaseerd op brandstofcellen	13
3.3 Warmteterugwinning en -opslag op hoge temperatuur	19
3.4 Stoomcompressie	23
3.5 Toekomstige industriële verwarmingstechnologieën en integratie in het energiesysteem	29
4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector	32
5 Spin-off	35
6 Publicaties	36
Ondertekening	37

1 Inleiding

Dit project is uitgevoerd met behulp van subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, landelijke regeling EZ-subsidies, Topsector Energie, uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

Gegevens project

Project nummer	TEEI119018
Project titel	Sustainable Process Heat (SPOT)
Coördinator en partners	TNO, Recoy, KWA, BlueTerra, ISPT, BHT
Project periode	01/01/2020 – 31/12/2023

Contact- en beschikbaarheidsrapport

Kopieën van dit rapport zijn verkrijgbaar via de repository van openbare TNO-rapporten:

[Zoeken | TNO](#)

Contactpersoon voor dit project is

S. Spoelstra

E-mail: simon.spoelstra@tno.nl

2 Achtergrond en doelstellingen

Achtergrond

Om de overheidsdoelstellingen op het gebied van energiebesparing, duurzame energie en CO₂-emissiereductie te realiseren, is een sterke focus op de productie en het gebruik van warmte nodig. Het energieverbruik in Nederland wordt gedomineerd door het gebruik van warmte. Terwijl het elektriciteitssysteem snel verduurzaamt met 40% van al het elektriciteitsverbruik in 2022 afkomstig uit een duurzame bron in Nederland, blijft het warmtesysteem achter met slechts 9% in 2017. Het aandeel warmte voor de industriële sector is groter dan 80% van het uiteindelijke industriële energieverbruik. Het gebruik van warmte in de industrie (inclusief de raffinagesector) bedroeg in 2017 circa 560 PJ/jaar, waarvan slechts een zeer klein deel afkomstig is uit een duurzame bron. Een transitie naar een duurzaam energiesysteem kan niet zonder verduurzaming van het warmtesysteem. Er ligt een grote uitdaging voor ons om dit te realiseren. Industriële warmte heeft een aantal typische kenmerken die het een zeer moeilijk onderwerp maken om te beheersen.

Daarnaast zijn bedrijven steeds meer op zoek naar verduurzaming van hun processen. Dit wordt gedreven door regelgeving, de vraag van consumenten naar duurzamere producten en kostenbesparingen. Nederland heeft een relatief grote energie-intensieve basisindustrie met veel gebruik van warmte (chemie, raffinage, staal, voeding, papier). Nederland en deze industrie hebben groot belang bij het vergroten van het concurrentievermogen & innovatiekracht door het industrieel energiegebruik te verduurzamen door de afhankelijkheid van fossiele energiedragers te verminderen. Daarnaast profiteert de Nederlandse kenniseconomie van de ontwikkeling van innovatieve producten met exportpotentieel door technologieleveranciers.

Probleemstelling

- Het productieproces van de industrie is hun core business. De industrie investeert in hun core business (productieproces, ontwikkeling van nieuwe producten) met een langetermijnvisie. Energie dient als een noodzakelijke hulpbron voor het uitvoeren van deze processen. Energiebesparing is alleen relevant als dit de industrie een concurrentievoordeel oplevert, hetzij in kosten, hetzij in de marketing van hun producten. Energie-efficiëntie is niet hun kernactiviteit en investeringen op dit gebied worden beoordeeld met een kortetermijnvisie.
- Daarnaast wordt de ontwikkeling van energiezuinige apparatuur beschouwd als de core business van fabrikanten van apparatuur en niet van de industriële eindgebruikers. Terwijl industriële eindgebruikers meestal de middelen hebben om langetermijninvesteringen te doen, is dit vaak niet het geval bij de (MKB) fabrikanten van apparatuur.
- Er is een gebrek aan kennis en (generieke) technologiemogelijkheden bij industriële eindgebruikers om hun processen te verduurzamen, zowel op korte als op lange termijn. Bovendien ontbreekt het fabrikanten van apparatuur aan kennis over toepassingen en marktomvang.

- Warmte wordt in de industrie gebruikt bij een grote verscheidenheid aan processen en temperaturen en als zodanig heeft het onderwerp geen eigendom. Momenteel is de aanpak op dit gebied erg gefragmenteerd en ontbreekt het aan een programmatische visie op sector-breed niveau.

Doelstelling

Het algemene doel van een innovatieprogramma Industriële Warmtetechnologie is te komen tot een samenhangend en consistent programma dat leidt tot een forse reductie van het gebruik van fossiele energiedragers in de industrie. Het doel is om het fossiele energiegebruik voor industriële warmte in 2030 met 100 PJ/jaar te verminderen. De daarmee gepaard gaande CO₂-emissiereductie wordt geschat op 6 Mton/jaar. Innovaties binnen een dergelijk programma leiden tot nieuwe producten met exportpotentieel voor technologieleveranciers.

Als eerste stap naar een dergelijk programma worden in dit SPOT-project volgende concrete doelstellingen nagestreefd, waarbij meerdere facetten van een duurzame industriële warmtehuishouding worden onderzocht:

- Beoordeel de haalbaarheid van koolstofvrije brandstoffen voor industriële toepassingen bij hoge temperaturen.
- Aantonen van haalbaarheid van brandstofcellen als nieuwe generatie warmtekrachtkoppelingstechnologie (WKK) voor industriële toepassingen.
- Aantonen haalbaarheid van hoge temperatuur (> 400°C) warmteopslag als afvangtechnologie voor hoge temperatuur restwarmte.
- Aantonen haalbaarheid van stoomcompressietechnologie.
- Bepaal de technologiebehoeften voor een CO₂-neutraal industrieel warmtesysteem.

3 Resultaten

3.1 Koolstofvrije brandstof voor hoge-temperatuur industriële toepassingen

Indien gebruik wordt gemaakt van (variërende) koolstofvrije elektriciteit om in de (min of meer continue) industriële warmtebehoefte te voldoen, kan dit niet 1 op 1 worden gekoppeld. Het doel van dit werkpakket is het vergelijken van technologieketens tussen de productie van hernieuwbare elektriciteit en de industriële vraag naar warmte in 2050 en met name te beoordelen op totale investering die moet worden gedaan om dit te realiseren. Om dit te kunnen doen moeten eerst de mogelijke vraag en aanbod in 2050 worden vastgesteld. Als basis hiervoor zijn de Berenschot-Kalavasta 2050-scenario's gebruikt².

Industriële warmtevraag

Om de industriële warmtevraag in 2050 voor deze studie vast te stellen, zijn de volgende wijzigingen aangebracht ten opzichte van het uitgangsscenario:

- Er wordt alleen koolstofvrije elektriciteit toegepast een geen CCS;
- Industriële elektriciteitsvraag is verwijderd;
- Niet-energetisch energiegebruik is toegevoegd aan het sector gebruik indien er momenteel sprake is van niet-energetische CO₂-emissies;
- Bij de warmtevraag is onderscheid gemaakt in het temperatuurniveau van de warmte omdat invloed heeft op type technologie dat kan worden toegepast.

Het resultaat van deze exercitie staat in Tabel 3.1. De gespecificeerde elektriciteitsvraag heeft betrekking op de elektrochemische reductie voor productie van metalen (staal, aluminium en 'andere metalen'), terwijl de gespecificeerde waterstof gerelateerd is aan de kunstmestproductie en productie van staal onder waterstof.

Tabel 3.1 Industriële warmtevraag in 2050

Vraag	Regionale sturing (PJ/a)	Nationale sturing (PJ/a)	Europese CO ₂ sturing (PJ/a)	Internationale sturing (PJ/a)
Warmte < 200°C	100	150	187	202
Warmte > 200°C	149	209	282	284
Elektriciteit	10	18	29	29
Waterstof	32	64	122	153
Totaal	291	442	620	668

CO₂-vrije elektriciteitslevering

Voor de levering van duurzame elektriciteit zijn dezelfde scenario's als uitgangspunt gehanteerd. Echter, wordt het aanbod volledig verzorgd door wind onshore/offshore en zonne-

² Den Ouden et al. (2020), Klimaatneutrale energiescenario's 2050 - Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050, rapport Berenschot en Kalavasta

energie, met kernenergie als aanvullend scenario². Tabel 3.2 presenteert het totaal geïnstalleerd vermogen per bron en per scenario voor Nederland. De tijdsafhankelijkheid van de geleverde elektriciteit is gebaseerd op historische opwekkingspatronen voor Nederland voor 2018 voor zon en wind onshore en offshore, zoals aangeleverd door het ENTSO-E transparantieplatform³.

Tabel 3.2 Aanbod van CO₂-vrije elektriciteit in 2050

Aanbod	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese CO ₂ sturing	Internationale sturing	Europese CO ₂ sturing + nucleair
Zon PV (GW)	125	106	59	53	59
Wind onshore (GW)	20	20	10	10	10
Wind offshore (GW)	43	72	42	38	42
Nucleair (GW)	0	0	0	0	9
Totaal (GW)	188	198	111	101	120

Binnen deze studie wordt het gecombineerde geïnstalleerde (duurzame) vermogen zodanig geschaald dat de productie gemiddeld over het jaar precies aansluit bij de industriële vraag over het jaar afhankelijk van de geanalyseerde technologieketen. De nucleaire optie wordt op dezelfde manier geschaald, maar heeft een constant vermogen gedurende het jaar. De industriële warmtevraag wordt verondersteld constant te zijn gedurende een jaar. Dit is uiteraard een benadering die echter voor de meeste grootschalige, energie-intensieve processen acceptabel is. Vanwege de tijdsafhankelijkheid van het aanbod en de constantheid van de vraag zal er in iedere technologieketen een opslagschakel aanwezig zijn.

Technologie ketens

Er zijn verschillende Power-to-Heat ketens gecreëerd en per scenario beoordeeld op ketenefficiëntie en kosten. Elke technologieketen begint met de (hernieuwbare) elektriciteitsproductie en eindigt met het voldoen aan de industriële warmtevraag. Er zijn verschillende schakels mogelijk die daartussen passen, waaronder infrastructuur en opslagtechnologie. Omdat opslagtechnologie een essentieel onderdeel is van elke keten, kunnen ketens opgebouwd worden rond verschillende categorieën opslagtechnologie:

- Mechanische opslag (waterbassin, perslucht, vliegwiel, ...)
- Elektrochemische opslag (batterijen, redox, ...)
- Thermische opslag (voelbaar, latent, sorptie/thermochemisch)
- Chemische opslag (waterstof, ammoniak, metaal, ...)

Van een groot aantal mogelijke technologieketen is een shortlist van 23 ketens:

- Thermische opslag
 - Warmtevraag < 200°C: warmtepomp (gemiddelde COP = 3.28⁴) + water/PCM/TCM opslag 3 ketens
 - Warmtevraag > 200°C: elektrische verwarming + steen/gesmolten zout 2 ketens
- Elektrochemische opslag
 - Warmtevraag < 200°C: warmtepomp + Li-ion/NaS/Redox 3 ketens

² Kerkhoven, J., et al, Systeemeffecten van nucleaire centrales, in Klimaatneutrale Energiescenario's 2050, Berenschot, 8 april 2020

³ <https://transparency.entsoe.eu/>

⁴ Marina, A., et al, An estimation of the European industrial heat pump market potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 139, April 2021.

- Warmtevraag > 200°C: elektrische verwarming + Li-ion/NaS/Redox 3 ketens
 - ACAES/LAES/PHP (compressed air, liquid air, pumped hydro)
- Mechanische opslag
 - Warmtevraag < 200°C: warmtepomp + ACAES/LAES/PHP 3 ketens
 - Warmtevraag > 200°C: elektrische verwarming + ACAES/LAES/PHP 3 ketens
- Chemische opslag
 - Waterstofopslag: zout caverne/Gecomprimeerde H₂/Vloeibare H₂/LOHC 4 ketens
 - Metaalbrandstofopslag: metaalbrandstof 1 keten
 - Ammoniakopslag: NH₃ 1 keten

Resultaten

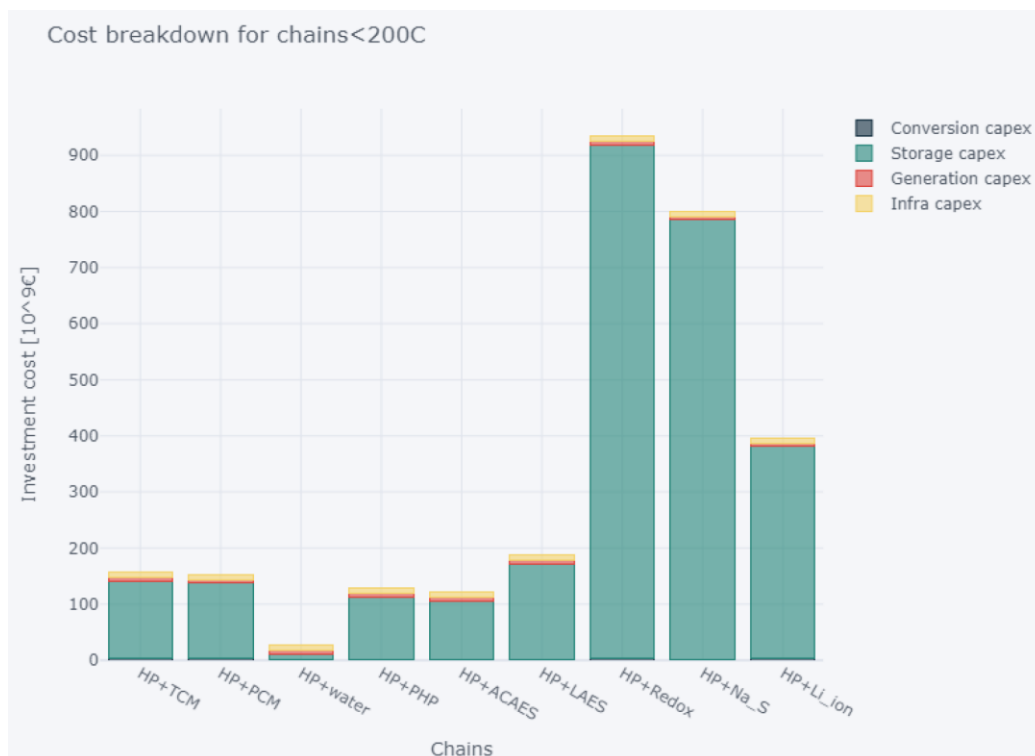
Voor het scenario Regionale sturing worden hieronder de totale investeringskosten berekend en weergegeven in Figuur 3.1, Figuur 3.2 en Figuur 3.3 die nodig zijn om Power-to-Heat-ketens te bouwen. Er is onderscheid gemaakt voor de processen die warmte nodig hebben onder de 200°C en boven de 200°C, waar elektrische verwarming de verwarmingsmethode is. De derde categorie ketens betreft chemische ketens waarmee een breder temperatuurbereik kan worden afgedekt en waarbij de elektriciteit eerst via elektrolyse wordt omgezet in H₂. Elke keten bevat een generatiecomponent (Generation capex), een infrastructuur component (Infra capex), een opslag component (Storage capex) en een conversie component die de uiteindelijke warmte genereert (Conversion capex). De kosten voor diverse opties zijn uit verschillende bronnen gehaald, zoals PNNL⁵, BVES, EASE⁶ and HyChain⁷. Indien meerdere bronnen verschillende kentallen hanteren voor dezelfde technologie, is het gemiddelde van deze bronnen genomen.

De goedkoopste keten in de categorie <200°C is een warmtepomp met wateropslag, waarvoor investeringskosten van 27 miljard euro nodig zijn om aan de vraag te voldoen. Voor de categorie >200°C is elektrische verwarming + opslag in gesteente de goedkoopste optie met een investeringsvereiste van 70 miljard euro. Voor chemische ketens lijkt de H₂-verbranding + zoutcaverne met 74 miljard euro investeringskosten het meest gunstig.

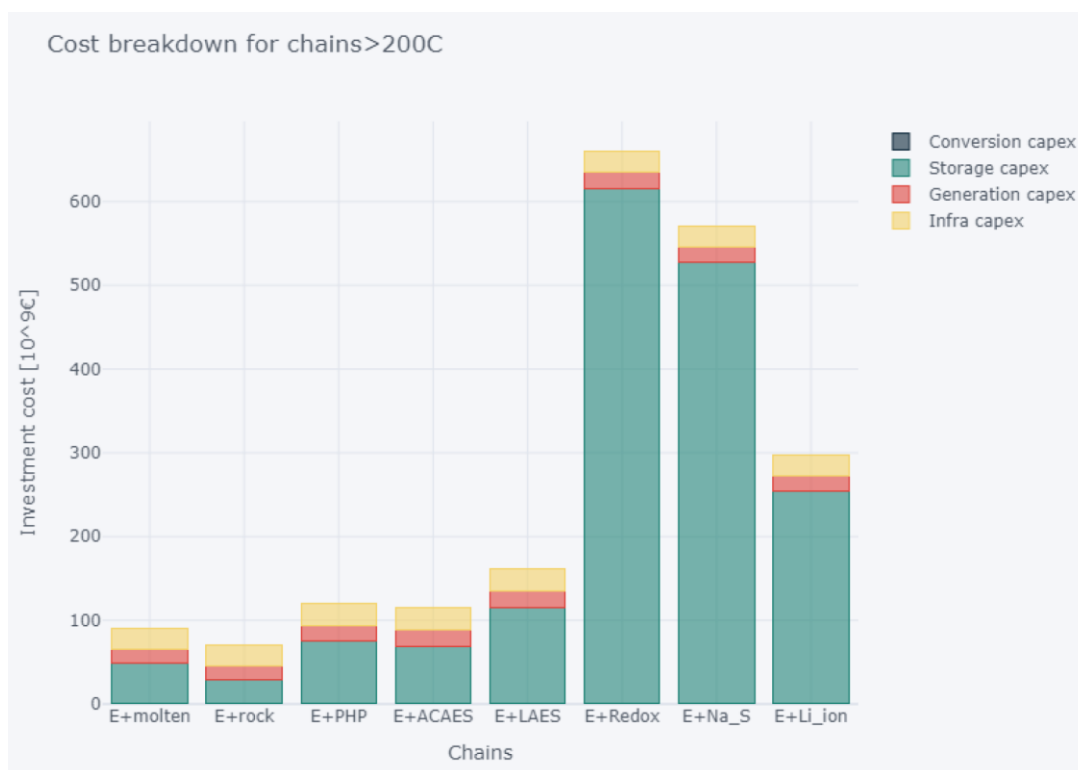
⁵ [Energy Storage Subsystems and Definitions | PNNL](#)

⁶ [Technologies | EASE: Why Energy Storage? | EASE \(ease-storage.eu\)](#)

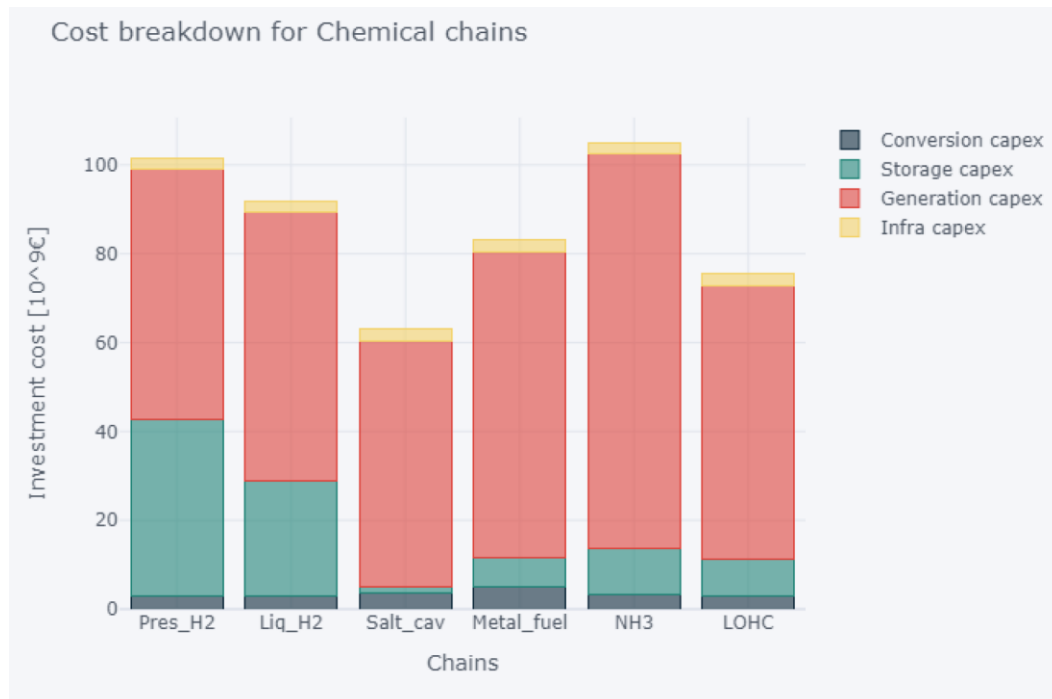
⁷ <https://ispt.eu/projects/hychain/>



Figuur 3.1 Totale investeringskosten voor technologieketens voor warmtelevering < 200°C in het Regionale Sturing scenario



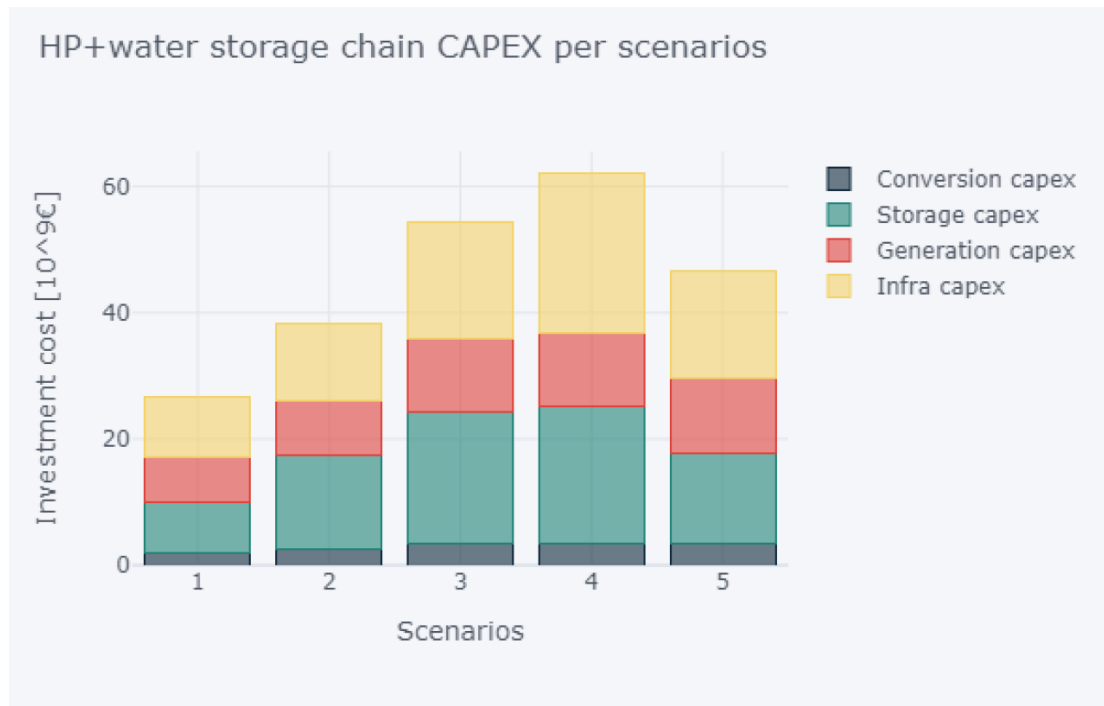
Figuur 3.2 Totale investeringskosten voor technologieketens voor warmtelevering > 200°C in het Regionale Sturing scenario



Figuur 3.3 Totale investeringskosten voor warmtelevering met chemische energieopslag in het Regionale Sturing scenario

Bij de ketens met de combinatie warmtepomp en elektrische verwarming domineren de opslagkosten in de totale kostenverdeling. Omdat opslag in water en in gesteente de goedkoopste opslagopties zijn, komen deze keten als goedkoopste uit de bus in hun categorie. Daarnaast wordt voor de chemische ketens ervan uitgegaan dat elektrolyse centraal in wind- of zonneparken plaatsvindt en de opgewekte waterstof centraal wordt opgeslagen en vervolgens via deels nieuwe en deels omgebouwde H₂-leidingen naar de fabriek wordt getransporteerd.

Om het effect van nucleaire elektriciteit te onderzoeken, is het 5^e scenario toegevoegd. Dit is een variant op scenario 3. Figuur 3.4 geeft voor 1 technologieketen de kosten per scenario. Scenario 3 en 5 zijn vergelijkbaar met dezelfde jaarlijkse industriële vraag, met als enige verschil de toevoeging van kernenergie in S5. Voor warmtepomp + wateropslag zijn de totale investeringskosten voor Scenario 5 lager dan voor scenario 3, wat te wijten is aan de toevoeging van kernenergie als must-run optie. Hoewel de generatiekosten hoger zijn in het nucleaire scenario, zijn de opslagkosten significant lager vanwege de lagere opslagbehoefte.



Figuur 3.4 Totale investeringskosten voor de warmtepomp + warmteopslag in water keten voor diverse scenario's

Curtailment

Afhankelijk van de verhouding tussen de generatiekosten en de opslagkosten kan het zin hebben om meer generatiecapaciteit (zon, wind onshore/offshore, nucleair) neer te zetten om zo te besparen op opslagcapaciteit. Het effect van meer generatiecapaciteit is dat een deel van het jaar deze capaciteit, hoewel beschikbaar, niet zal worden gebruikt. Het verhogen van de generatiecapaciteit kan nooit de behoefte aan opslag wegnemen. Dat betekent dat er een optimum is waarboven het geen zin meer heeft extra capaciteit neer te zetten. Uit de analyses blijkt dat voor die ketens waarbij de opslag component dominant in de kosten is, een overcapaciteit van 15% tot lagere totaalkosten leidt. Bij keten met relatief lage opslagkosten, zoals de zoutcavernes, leidt extra generatiecapaciteit alleen maar tot hogere systeemkosten.

Conclusies

Een van de belangrijkste bevindingen van het werkpakket is dat de behoefte aan energieopslag tot grote kosten leidt in alle elektriciteitsketens. De kosten van deze ketens worden gedomineerd door energieopslag. Wanneer energie in chemische vorm kan worden opgeslagen, kunnen de opslagkosten veel lager zijn.

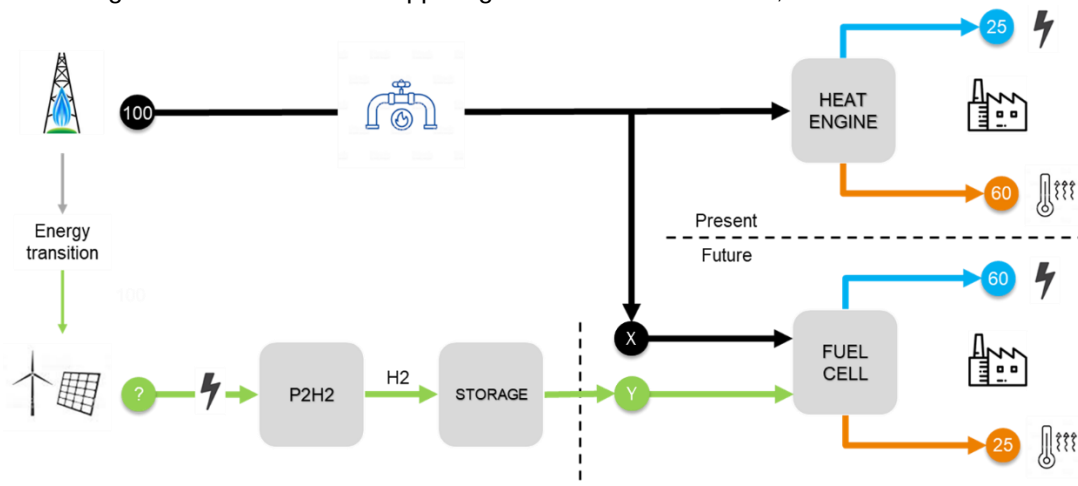
Een warmtepomp met warmteopslag in water is de meest aantrekkelijke keten voor processen lager dan 200°C, terwijl een zoutcaverne H₂-opslag met elektrolyser en H₂-brander de best presterende keten is voor processen met hoge temperaturen.

Deze analyses zijn zeer gevoelig voor de invoercijfers die voor alle technologieën worden gebruikt. Het hebben van een actueel overzicht van deze parameters is de sleutel tot een waardevolle analyse. Niettemin bieden de analyses in dit rapport waardevol inzicht in toekomstige energiesystemen, die draaien op hernieuwbare/koolstofvrije elektriciteit.

Opgemerkt moet worden dat de gepresenteerde resultaten uitsluitend voor de industriële sector zijn uitgevoerd. Wanneer het totale Nederlandse energiesysteem, inclusief alle sectoren, zouden worden geanalyseerd, kunnen er verschillende resultaten ontstaan.

3.2 Warmtekrachtkoppeling gebaseerd op brandstofcellen

De huidige warmtekrachtkoppelingstechnologieën zoals zuigermotoren, gas- of stoomturbines zijn motoren die (meestal) aardgas omzetten in warmte en kracht. Deze motoren hebben een intrinsiek beperkt rendement en hun warmte/krachtverhouding is meer gericht op het opwekken van warmte dan op elektriciteit. Momenteel wordt er steeds meer duurzame elektriciteit geproduceerd. Overtollige elektriciteit kan worden omgezet in alternatieve energiedragers zoals waterstof (H_2) en worden geleverd aan het aardgasnet (zie Figuur 3.5). Het toenemende H_2 -gehalte in het aardgasnet introduceert echter problemen voor de verbrandingsprocessen in motoren als gevolg van de verandering in de calorische waarde en de dichtheid van de brandstof. Dit schept kansen voor een robuuste transitietechnologie voor warmtekrachtkoppeling met twee brandstoffen, zoals brandstofcellen.



Figuur 3.5 Mogelijke impact van de transitie van huidige (zwart) naar toekomstige (groen) cogeneratie

Brandstofcellen zijn in staat aardgas, mengsels van aardgas en H_2 en zuivere H_2 direct om te zetten in warmte en elektriciteit. Het rendement naar elektriciteit is in brandstofcellen hoger dan bij conventionele motoren waardoor de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit wordt verhoogd met dezelfde input van brandstof. Dit biedt een nieuw perspectief voor de industrie op de wijze waarop zij hun processen van warmte en elektriciteit kunnen voorzien.

Warmte/kracht markt

Er is een overzicht gemaakt van het decentrale WKK-gebruik in Nederland. Tabel 3.3 geeft een overzicht per sector. Grootste aantallen WKKs zijn te vinden in land- en tuinbouw en in ziekenhuizen. Dit zijn over het algemeen kleinere installaties. De grote WKKs zijn de vinden in de industrie, met name in chemie, raffinage en papier.

Tabel 3.3 Kenmerken van decentrale WKs in Nederland

sector	Gemiddelde primair energiegebruik (TJ/a)	Gemiddelde geïnstalleerd vermogen (MWe)	Electrisch rendement (%)	Thermisch rendement (%)	Totaal rendement (%)	W/K ratio (-)
Land- en tuinbouw	35.7	1.1	40	48	88	0.83
AVIs	1,741.4	14.9	18	28	46	0.64
Chemie	2,050.5	48.1	31	50	81	0.62
Raffinage	2,425	31.9	28	39	67	0.72
Voeding	315	5.3	25	59	84	0.42
Papier	582.6	12.4	23	56	79	0.41
Distributie	124.2	3.8	24	49	72	0.49
Overig	100.4	2.4	16	66	82	0.24
Ziekenhuizen	4.6	0.3	36	41	77	0.86
Rest	6.7	0.3	35	35	69	1.00

Technology beoordeling

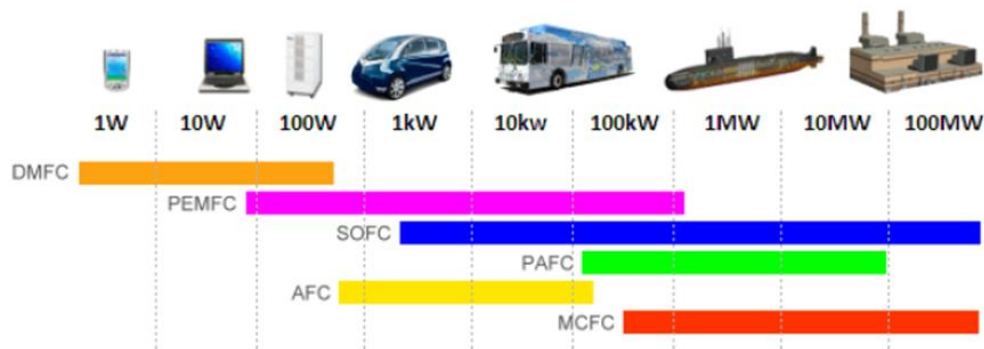
Brandstofcellen kunnen worden gebruikt als een schone, efficiënte, betrouwbare en stille bron van warmte en kracht. In een brandstofcel worden waterstof en zuurstof gecombineerd om elektriciteit op te wekken, samen met warmte en water als bijproduct. Waterstof kan worden verkregen door het chemische omzetten van een verscheidenheid aan brandstoffen, zoals aardgas, methaan, LNG, ammoniak, of waterelektrolyse. Er zijn verschillende typen brandstofcellen. Onderscheid tussen typen wordt bepaald door het chemische conversieproces en de aard van hun elektrolyt. Tabel 3.4 geeft de belangrijkste typen weer en hun kenmerken.

Tabel 3.4 Belangrijkste eigenschappen van huidige brandstofcel technologieën⁸

Fuel cell	Electrolyte and ionic transport	Operating temperature (°C)	Efficiency (%)	Fuel	Oxidising agent
PEFC	Polymer electrolyte, proton H ⁺	50–100	45–55	H ₂ (hydrogen)	O ₂ (oxygen), air
DMFC	Polymer electrolyte, proton H ⁺	40–130	20–35	CH ₃ OH (methanol)	O ₂ , air
AFC	Potassium hydroxide (KOH) solution, hydroxyl ion OH ⁻	40–90	50–60	H ₂	O ₂
PAFC	Phosphoric acid, proton H ⁺	160–220	55	Natural gas, biogas, H ₂	O ₂ , air
MCFC	Molten mixture of alkali metal carbonates, carbonate ion CO ₃ ²⁻	550–650	55	Natural gas, biogas, coal gas, H ₂	O ₂ , air
SOFC	Oxide ion conducting ceramic, O ₂ ⁻	600–950	~50–60	Natural gas, biogas, coal gas, H ₂	O ₂ , air

Tot nu toe worden commercieel verkrijgbare brandstofcellen op beperkte schaal gebruikt voor zowel mobiele als stationaire toepassingen, zoals te zien is in Figuur 3.6.

⁸ Steinberger-Wilckens, Robert et al. The role of Hydrogen and Fuel Cells in delivering Energy Security for the UK. A H2FC SUPERGEN White Paper, 2017, 10.13140/RG.2.2.12112.92161.



Figuur 3.6 Toepassing en vermogensrange van brandstofcel technologieën boven TRL6⁹

De techno-economische criteria voor een brandstofcel-WKK (FC-WKK)-systeem voor industrieel gebruik zoals gedefinieerd binnen dit project zijn:

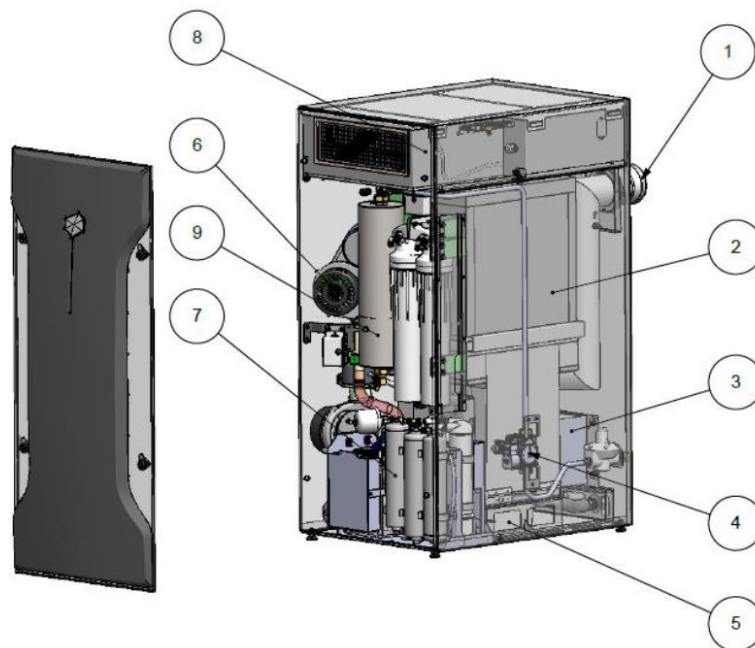
- Geschikt voor meerdere brandstoffen (aardgas en waterstof)
- Elektrisch rendement > 50%
- Thermisch rendement > 30%
- Stoomproductie van minimaal 180°C (10 bara)
- Capaciteit van ongeveer 10 MW brandstofinput
- Concurrerende kostenniveaus

PEMFC, DMFC en AFC voldoen niet aan deze criteria omdat ze een lage bedrijfstemperatuur en elektrisch vermogen hebben en minder flexibel zijn wat betreft brandstofinvoer. Naast PEMFC worden ze vooral gebruikt voor draagbare/mobiele toepassingen in plaats van stationaire toepassingen. Op basis van de belangrijkste kenmerken zijn SOFC en MCFC de meest veelbelovende technologieën voor gebruik als WKK in de industrie. Stationaire hogetemperatuur-SOFC en MCFC hebben het voordeel dat ze de meest brandstofflexibele technologieën zijn en voldoende vermogen bieden voor de industrie. Stoom kan worden gegenereerd uit het uitlaatgas met hoge temperatuur, nadat het is gebruikt voor recuperatieve warmte-uitwisseling met de inlaatprocesgassen.

Meetprogramma

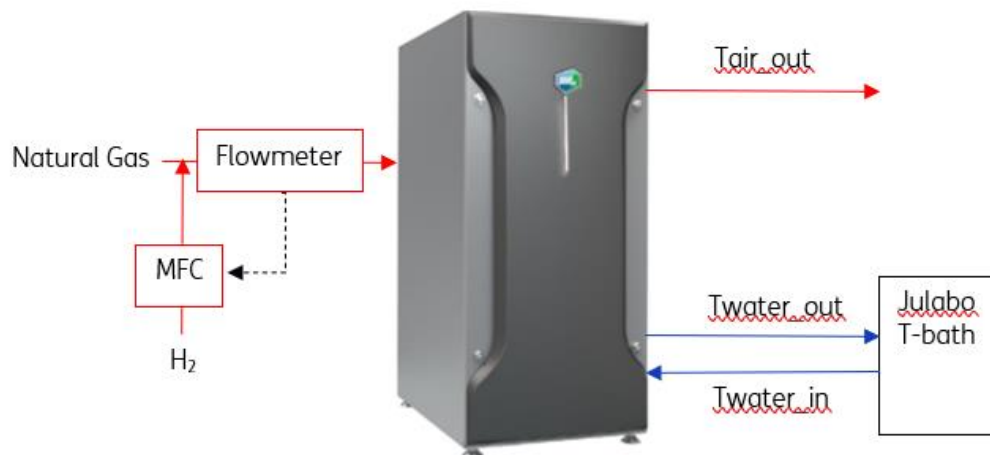
Om meer zicht te krijgen op de prestaties van een brandstofcel WKK en de brandstof flexibiliteit is er een meetprogramma uitgevoerd op laboratoriumschaal. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een SolydEra BlueGEN BG15 micro-WKK SOFC-systeem. De unit bestaat uit een brandstofcel met een maximaal vermogen van 1500 W elektriciteit, een warmtewisselaar voor de warmwatervoorziening en een stoomreformer voor werking op aardgas (zie Figuur 3.7).

⁹ http://www.antig.com/technology/technology_fuel_cell_types.htm



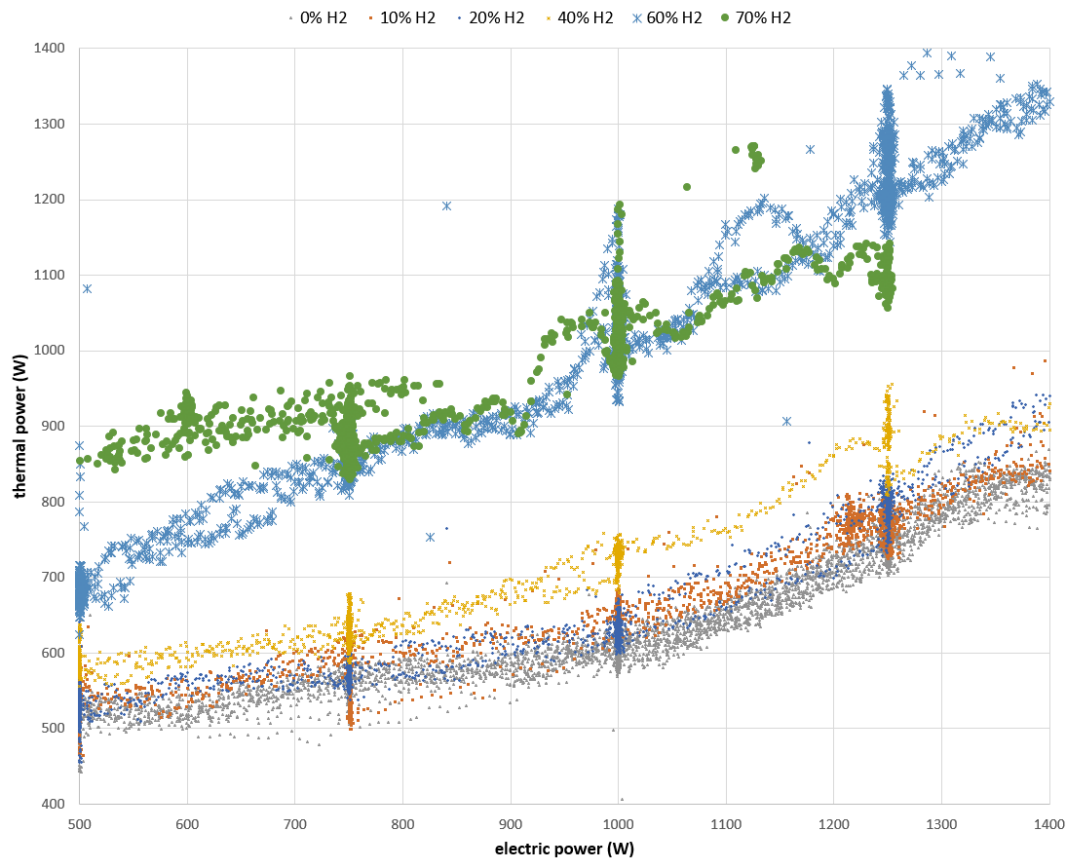
Figuur 3.7 BlueGEN componenten: 1. Uitlaat, 2. Brandstof cell module, 3. Warmte terugwinunit, 4. Gaskleppen, 5. Condensaat tank, 6. Lucht systeem, 7. Water behandelingsysteem, 8. Vermogenssysteem, 9. Gas ontzwaveling

Op de BlueGEN-unit wordt een Julabo thermostatisch bad aangesloten om de hoeveelheid onttrokken warmte bij 20°C te meten. Met behulp van een massastroomregelaar kan de hoeveelheid waterstof worden geregeld als fractie van het gebruikte aardgas. De opstelling is schematisch weergegeven in Figuur 3.8.



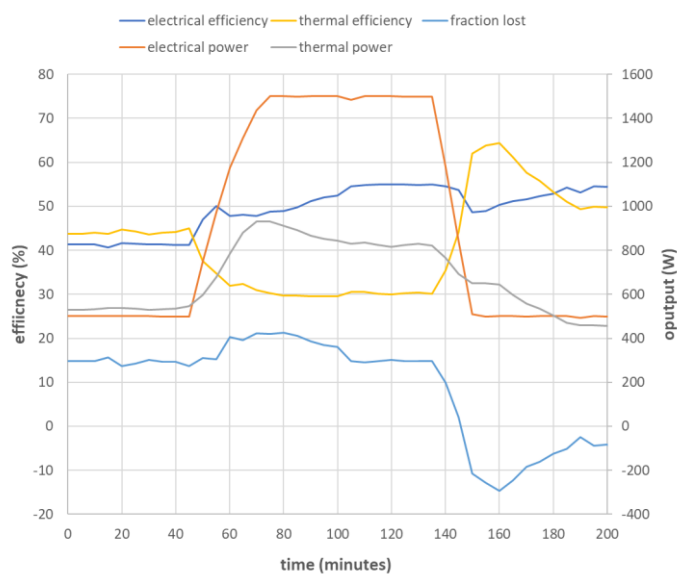
Figuur 3.8 Experimentele setup met de BlueGEN BG15 unit, waar een mass flow controller (MFC) de samenstelling van de toegevoerde brandstof bepaalt

Het experimentele programma bestond uit steady-state en dynamische metingen aan aardgas en mengsels van aardgas met waterstof in verschillende verhoudingen. Figuur 2.24 toont de relatie tussen het thermische en elektrische vermogen voor alle metingen die zijn uitgevoerd met gasmengsels variërend van 100% aardgas tot 30% aardgas met 70% waterstof.



Figuur 3.9 Thermisch vermogen als functie van het elektrisch vermogen bij verschillende mengsels

Figuur 3.10 toont het dynamische gedrag van de BG15 (100% aardgas) bij het snel veranderen van de vermogensinstelling van 1500 W naar 500 W en omgekeerd. Uit deze figuur blijkt dat het ongeveer 30 minuten duurt om het uitgangsvermogen te veranderen van 500 W naar 1500 W en ongeveer 15 minuten om te dalen van 1500 W naar 500 W. Het elektrisch rendement vertoont geen extreme variaties en blijft tussen 50 en 60%.



Figuur 3.10 Dynamisch gedrag van de BG15: Vermogens output en efficiency als functie van de tijd

Algemene meetresultaten laten een goede herhaalbaarheid van de prestaties zien bij gebruik van 100% aardgas. Het verhogen van de fractie waterstof van 0% naar uiteindelijk 70%, resulteert in een toename van de beschikbare warmte. Dit komt hoogstwaarschijnlijk door de verminderde warmtevraag voor de omzetting van aardgas naar waterstof.

De BG15 kan binnen een half uur overschakelen van minimale naar maximale belasting (500 W tot 1500 W elektrisch vermogen). Dit zorgt voor voldoende flexibiliteit om veranderingen in de duurzame elektriciteitsproductie uit wind- en zonne-energie te volgen en voor de mogelijkheid om te profiteren van de variatie in elektriciteitsprijzen. De daarmee gepaard gaande afname van het elektrische rendement bij minimale belasting is acceptabel, aangezien deze instelling alleen wordt gebruikt in perioden met lage elektriciteitsprijzen.

De haalbaarheid van de BG15 om met verschillende gasmengsels te werken, een hoog elektrisch rendement te bereiken (> 50%) en de vermogensinstelling snel te wijzigen (binnen een half uur), geeft aan dat SOFC een veelbelovende toekomstbestendige technologie zou kunnen zijn voor toepassing als WKK-eenheid voor industriële toepassingen die 24/7 werking vereisen. Met behulp van SOFC-technologie kan het elektrisch vermogen worden aangepast aan de vraag en het aanbod van elektriciteit, zowel ter plaatse als op de elektriciteitsmarkt. Bij gebruik van waterstof (of mengsels van aardgas en waterstof) kan de CO₂-voetafdruk van het industriële proces worden verminderd of zelfs geminimaliseerd zonder afhankelijk te zijn van een fluctuerend elektriciteitsaanbod uit hernieuwbare bronnen.

Techno-economische analyse

Om de techno-economische haalbaarheid van een volledige SOFC-brandstofcel gebaseerde WKK voor de industrie te bepalen, wordt rekening gehouden met de OPEX voor 7 verschillende topologieën voor warmte en elektriciteit met 5 verschillende kostprijs-scenario's. De vijf scenario's gaan allen uit van 4000 uur dure stroom en 4000u goedkope stroom. De hoogte verschilt per scenario en ook de prijs ten opzichte van de gasprijs varieert. Tabel 3.5 geeft de scenario's weer.

Tabel 3.5 Kostprijs scenario's

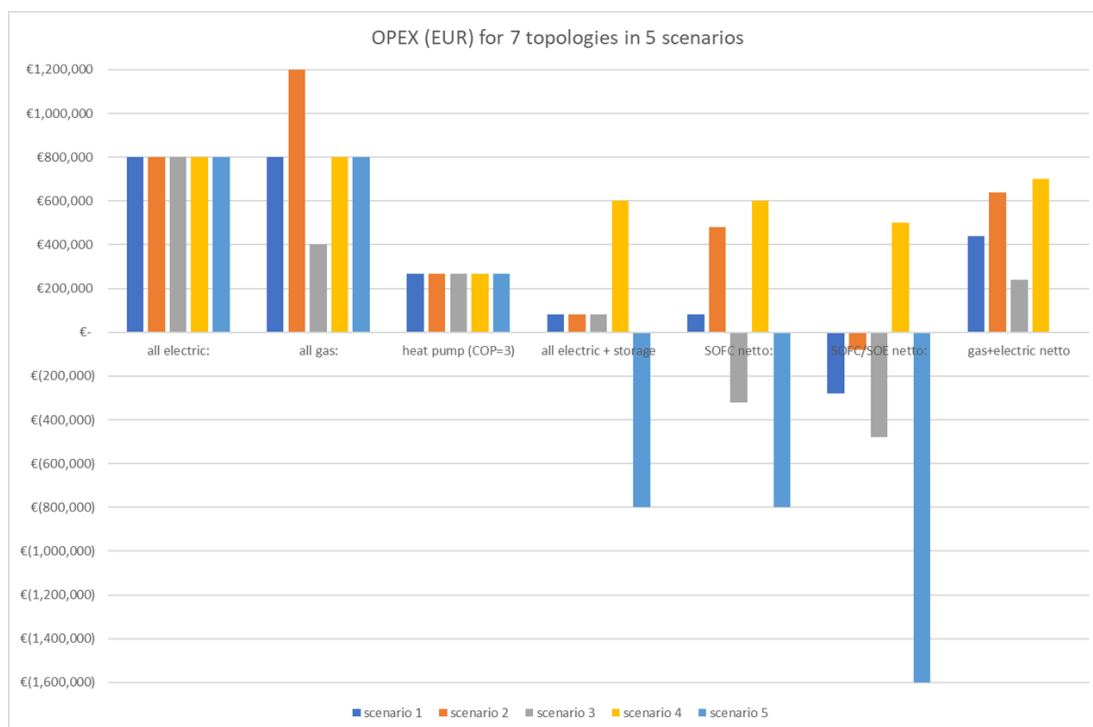
Scenario:	1	2	3	4	5	
prijs gas	100	150	50	100	100	EUR/MWh
prijs elektriciteit laag	10	10	10	75	-100	EUR/MWh
prijs elektriciteit hoog	190	190	190	125	300	EUR/MWh

De zeven topologieën waarmee rekening wordt gehouden zijn: 1) volledig gas, 2) volledig elektrisch, 3) gecombineerd gas/elektrisch (wat het goedkoopste is, wordt gebruikt), 4) warmtepomp (aangenomen COP = 3), 5) warmteopslag gecombineerd met volledig elektrisch (=aannahme dat alle warmte gegenereerd op laagste prijs), 6) SOFC en 7) SOFC gecombineerd met SOE. Voor de brandstofcelprestaties wordt uitgegaan van een conversie van 50% naar elektriciteit en 50% proceswarmte. Voor topologie 7 wordt uitgegaan van een omkeerbare brandstofcel met 50% conversie-rendement en 50% warmte.

Er worden aannames gemaakt met betrekking tot de toekomstige kosten van elektriciteit en gas (aardgas, waterstof of anderszins). Momenteel hebben de meeste EU-landen elektriciteitsprijzen die aanzienlijk hoger liggen dan de gasprijzen, maar de verwachting (en trends) zijn dat deze prijzen meer op elkaar zullen gaan lijken. Daarom is er in de gemaakte analyse van uitgegaan dat de gas- en elektriciteitsprijzen (grotendeels) identiek zijn, maar waar de gasprijzen constant zijn, zijn de elektriciteitsprijzen volatiel en de helft van de tijd lager en de helft van de tijd hoger dan de gasprijzen. Alleen in scenario 2 en 3 wijkt de

gasprijs af van de gemiddelde elektriciteitsprijs. Scenario 4 en 5 laten steeds meer volatiliteit in de elektriciteitsprijzen zien.

De resultaten van de eenvoudige OPEX-berekening worden weergegeven in Figuur 3.11. Uit de resultaten blijkt dat SOFC vooral interessant is in het geval van goedkoop gas (scenario 3) en/of grote volatiliteit in elektriciteitsprijzen (scenario 5). Het combineren van SOFC met SOE is in meer scenario's een aantrekkelijke optie en dus een veelzijdigere technologie als je het economische potentieel ervan in ogenschouw neemt.



Figuur 3.11 Techno-economische evaluatie van SOFC: kosten in EUR/MW_{th} voor 5 prijs scenario's (gas, elektriciteit hoog en laag).

Voor het bepalen van de business case is een meer gedetailleerde kostenanalyse nodig. Niet alleen CAPEX- en OPEX-berekeningen en -optimalisaties, inclusief dynamische elektriciteitsprijzen, zijn nodig om de economische haalbaarheid te bepalen. Deze analyse zou ook een vergelijking moeten omvatten met andere technologieën die het aanbod en/of de vraag naar elektriciteit kunnen verschuiven, zoals grote (batterij)energieopslag, om te bepalen of SOFC een aantrekkelijke technologie is voor een duurzamere industrie.

3.3 Warmteterugwinning en -opslag op hoge temperatuur

Het hoofddoel van dit werkpakket is het onderzoeken van de haalbaarheid van toepassingen voor warmteterugwinning, opslag en hergebruik op basis van gesmolten zout bij hoge temperaturen in industriële processen. Om dit te doen, wordt een toepassing voor warmteterugwinning en hergebruik in de staalproductie geïdentificeerd, wordt in een breder kader naar hoge-temperatuur warmteopslag gekeken en is een experimentele opstelling ontworpen, gebouwd en een testprogramma uitgevoerd.

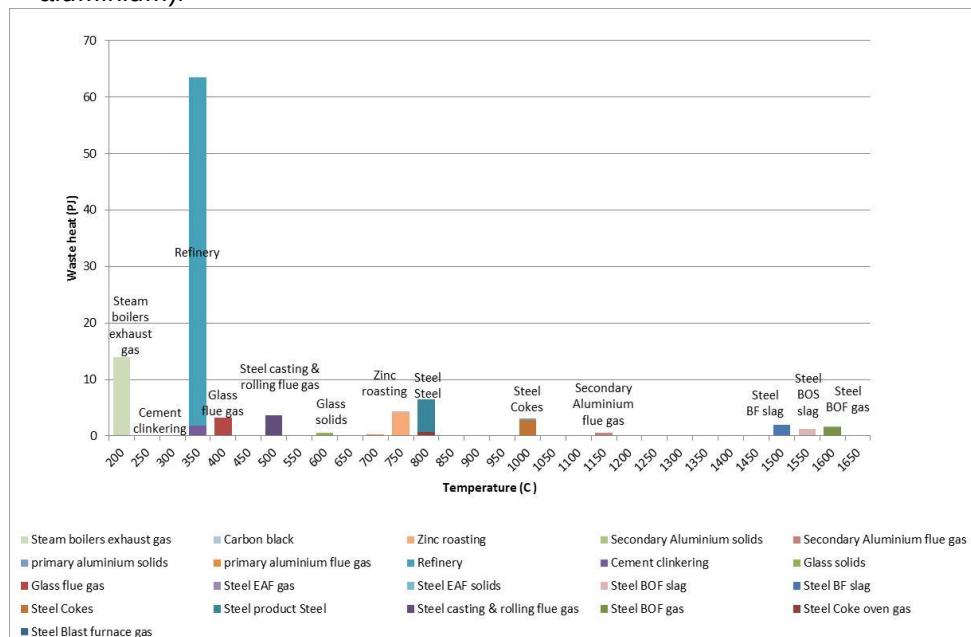
Toepassing

In het staalproductieproces wordt in de zogenoemde Direct Sheet Plant (DSP) het vloeibare staal gevormd tot rollen warmgewalst staal. De DSP heeft een grote tunneloven om de temperatuur tijdens het walsproces te regelen. De rookgassen van deze oven zijn circa 600°C en deze warmte wordt momenteel niet teruggewonnen. De restwarmte heeft een sterk fluctuerende karakteristiek tussen 74 en 3500 kW winbare warmte, met een gemiddeld vermogen van 676 kW. Terugwinnen van deze warmte op een stabiele wijze zal leiden tot een vermindering van de gasvraag voor verbrandingsprocessen.

Potentieel

Wordt in algemene zin naar het toepassen van hoge-temperatuur warmteopslag gekeken, dan kan het volgende onderscheid worden gemaakt.

- Terugwinning van industriële afvalwarmte
Hieronder valt de hierboven genoemde case van de staalproductie. Een wat bredere studie naar restwarmte bij $T > 200^{\circ}\text{C}$ heeft een kwantificering opgeleverd van beschikbare industriële restwarmte, zie Figuur 3.11. De meeste restwarmte is beschikbaar bij raffinaderijen, stoomketels en staalproductie. In totaal werd een restwarmtepotentieel van ongeveer 105 PJ vastgesteld $> 200^{\circ}\text{C}$. Hiervan wordt 91 PJ uitgestoten als uitlaatgasstromen en 14 PJ wordt vastgehouden in vaste stoffen (staal, slakken, cokes, aluminium).



Figuur 3.11 Overzicht van de beschikbaarheid van restwarmte $> 200^{\circ}\text{C}$ in verschillende processen

- Inzet van warmteopslag bij elektrificatie van de warmtevoorziening
Elektrificatie van processen door gebruik te maken van hernieuwbare elektriciteit wordt beschouwd als een belangrijk middel om het gebruik van fossiele energie te verminderen. In combinatie met thermische energieopslag op hoge temperatuur wordt extra flexibiliteit toegevoegd aan het energiesysteem, waardoor de ongelijktijdigheid van (duurzame) elektriciteitsproductie en warmtevraag kan worden opgelost.

De roadmap elektrificatie in de industrie ¹⁰ raamt voor NL een potentieel voor industriële elektrificatie van 190 TWh (~680 PJ) tegen 2050. Rondom **50 TWh** (180 PJ) van dit elektrificatiepotentieel wordt toegewezen aan e-boilers die industriële warmte leveren in het bereik van 200-400°C. Dit temperatuurbereik is potentieel geschikt voor power-to-heat-technologieën in combinatie met thermische opslag op hoge temperatuur. De ontwikkeling door het Noorse bedrijf Kyoto is gebaseerd op power-to-heat-technologie in combinatie met thermische energieopslag met gesmolten zout. Hun technologie kan specifiek worden gebruikt voor power-to-heat-toepassingen tot 500°C. In hun marktanalyse door Aurora¹¹ wordt de NL-marktomvang geschat op **43 TWh** (150 PJ), in redelijke overeenstemming met de Nederlandse roadmap-studie.

- **Energieopslag**
Bij de overgang naar het geplande hogere aandeel (70-90%) van hernieuwbare energiebronnen in de komende tien jaar, zal er een toenemende behoefte ontstaan aan energieopslag van langere duur, die een periode van enkele dagen tot een week bestrijkt. Voor deze langere looptijden zijn alternatieve, goedkopere energieopslagopties nodig. Wanneer het uiteindelijke gebruik van energie in de vorm van warmte is, zoals voor veel industriële processen, kunnen technologieën voor thermische energieopslag goedkoper zijn in vergelijking met elektrochemische (Li-ion) energieopslag. Dit maakt het mogelijk om de elektrificatie van industriële warmte te combineren met thermische energieopslag van langere duur als een middel om grotere hoeveelheden mismatch tussen vraag en aanbod in het elektriciteitssysteem in evenwicht te brengen, terwijl het aandeel koolstofvrije warmte voor de industrie wordt vergroot.

Mix van energieopslag opties

Het daadwerkelijke gebruik van energieopslag is sterk afhankelijk van de dynamiek van de vraag- en aanbodpatronen, de mate van directe overlap en dus directe warmtelevering, en de hoeveelheid warmteaanbod die uit de opslag moet komen.

Uit een studie van het JRC¹² over de flexibiliteitsbehoeften op de elektriciteitsmarkt blijkt dat er behoefte is aan energieflexibiliteit op verschillende tijdschalen, voor dagelijkse, wekelijkse en maandelijkse flexibiliteits- en opslagbehoeften. Op vergelijkbare wijze moet de duur van de thermische opslag voor industriële verwarmingssystemen ook de mismatches in vraag en aanbod over de verschillende tijdschalen dekken.

Verwacht mag worden dat TES-technologieën die de kortere looptijden bestrijken en een groter aantal laad-ontlaadcycli gedurende hun levensduur verkrijgen, vanuit economisch oogpunt het aantrekkelijkst zijn¹³.

Experimentele verificatie (proof of concept)

Om ervaring op te doen met het gebruik van gesmolten zouten is een testopstelling ontworpen en gebouwd, die wordt getoond in Figuur 3.12. Belangrijke vraag hierbij is hoe gesmolten zouten zich gedragen en wat de warmteoverdracht van dit medium is, gekoppeld aan een proces.

¹⁰ [Routekaart Elektrificatie in de Industrie | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)

¹¹ [Aurora Energy Research Report \(kyotogroup.no\)](#)

¹² Koolen, D., De Felice, M. en Busch, S., Flexibiliteitseisen en de rol van opslag in toekomstige Europese energiesystemen, EUR 31239 EN, Bureau voor publicaties van de Europese Unie, Luxemburg, 2023, ISBN 978-92-76-57363-0, doi:10.2760/384443, JRC130519.

¹³ [IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29 – Een eenvoudig instrument voor de economische evaluatie van thermische energieopslag \(sciencedirectassets.com\)](#)



Figuur 3.12 Experimentele opstelling voor de gesmolten zout experimenten

De opstelling bestaat uit 3 delen:

1. Hete lucht circulatie

In dit gedeelte wordt hete lucht gebruikt om industriële gassen zoals rookgassen te simuleren. Hiervoor wordt omgevingslucht verwarmd tot 900°C en wordt het debiet geregeld door een ventilator.

2. Gesmolten zoutcirculatiesysteem

Dit systeem bestaat uit 2 tanks. De onderste tank wordt gebruikt voor het opslaan, smelten en circuleren van het zout. In de bovenste tank wordt het zout opgevangen na het passeren van de warmtewisselaar. Het zout stroomt onder invloed van zwaartekracht weer terug naar de onderste tank.

Het zout dat in deze opstelling wordt gebruikt is een eutectisch nitraatzout met de volgende samenstelling in gewichts%: 42% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 43% KNO_3 – 15% NaNO_3 . Dit zout is in vaste toestand bij omgevingstemperatuur, heeft een smeltpunt van 131°C en blijft vloeibaar en thermisch stabiel totdat het de ontledingstemperatuur van 500°C bereikt. De gemiddelde thermofysische eigenschappen zijn als volgt:

- Viscositeit: 5,41 mPa s
- Soortelijke warmtecapaciteit: 1430 J (kg K)⁻¹
- Dichtheid: 2011 Kg m⁻³
- Thermische geleidbaarheid: 0,55 W (m K)⁻¹

3. Buis in buis warmtewisselaar

De warmtewisselaar bestaat uit 4 parallelle concentrische buizen waarbij hete lucht door de binnenbuis stroomt en gesmolten zout in de annulaire ruimte tussen binnen- en buitenbuis. Beide media stromen in de warmtewisselaar in een tegenstroomconfiguratie. De afmetingen van de warmtewisselaar zijn hieronder weergegeven.

Binnendiameter binnenbuis:	34	mm
Buitendiameter binnenbuis	38	mm
Binnendiameter buitenbuis	43	mm
Buitendiameter buitenbuis	48	mm

Lengte	1,9 m
Aantal buizen	4

Er zijn metingen uitgevoerd met verschillende debieten en temperaturen aan beide zijden. De minimum- en maximumtemperatuur van het gesmolten zout zijn gekozen tussen de smelt- en ontledingstemperatuur van het zout. De stroming van hete lucht is turbulent, terwijl het gesmolten zout zich in het laminaire regime bevindt.

Uit de experimentele data zijn de luchtzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt h_A en de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de zoutzijde h_{MS} bepaald. De metingen laten zien dat het warmteverlies zeer groot is. Ook de foutenmarge op de bepaalde warmteoverdracht coëfficiënten is zeer groot. De gemiddelde bepaalde waarden zijn $h_{MS} = 479 \text{ W (m}^2\text{K)}^{-1}$ en $h_A = 47 \text{ W (m}^2\text{K)}^{-1}$. De warmteweerstand zit dus vooral aan de luchtzijde. Dat maakt het ook lastig om h_{MS} nauwkeurig te bepalen aangezien deze waarde weinig invloed heeft op de overall warmteoverdracht.

Om een concept voor warmteterugwinning, -opslag en -hergebruik op hoge temperatuur op basis van gesmolten zout verder te ontwikkelen, worden de volgende stappen aanbevolen:

- Verder kijken naar warmteterugwinningswarmtewisselaars voor rookgas, die een hogere warmteoverdracht leveren in combinatie met een lage drukval.
- Bestudeer en definieer de bovenste T-limieten van de thermische stabiliteit van gesmolten zouten om verslechtering of verandering in de samenstelling van de zouten te voorkomen, met name bij de terugwinning van afvalwarmte bij zeer hoge temperatuur.
- Kijk naar systeemconcepten die combinaties van warmteterugwinning en elektrificatie van warmte mogelijk maken om voordelen te behalen bij het verhogen van de proces-efficiëntie en het koolstofvrij maken van de warmte-inbreng, terwijl de procesflexibiliteit wordt vergroot.

Aan de experimentele kant worden de volgende stappen aanbevolen

- Het uitvoeren van nieuwe experimenten rond de waarden van een hoog gesmolten zout massadebiet en het creëren van een groot temperatuurverschil tussen beide stromen om resultaten te verkrijgen met minder warmteverlies en algehele fouten in de warmteoverdrachtscoëfficiënt.
- Verbeter de thermische isolatie van de warmtewisselaar
- Verbeteren en inspecteren van meetapparatuur om meetfouten te verminderen
- Vervang hete lucht door een andere vloeistof die de relatieve warmteoverdrachtswaarde van het gesmolten zout in het systeem verhoogt om de h_{MS} te kunnen bepalen.
- Maak meer diepgaande modellen om rekening te houden met warmteverlies en bepaal meer informatie over de warmteoverdrachtseigenschappen van het gesmolten zout.

3.4 Stoomcompressie

Binnen dit werkpakket is het marktpotentieel van stoomcompressie onderzocht, zijn case studies geanalyseerd alsmede experimenten aan een stoomcompressor uitgevoerd. Daarnaast zijn vervolgstappen in kaart gebracht.

Marktpotentieel

Het toepassingspotentieel voor stoomcompressiewarmtepompen kan worden afgeleid uit een gedetailleerd onderzoek naar het marktpotentieel¹⁴ in van de EU28-warmtepompen. In dit onderzoek is een bottom-up analyse gemaakt van de proceswarmtebehoefte tot 200°C en de beschikbaarheid van restwarmte voor de sectoren voeding, papier, chemie en raffinaderij, waarbij potentiële toepassingen van warmtepompen in kaart zijn gebracht. In principe kunnen stoomcompressiewarmtepompen onder dezelfde condities zelfs tot hogere temperaturen van 250°C. Stoomcompressie zal normaal gesproken niet de eerste optie zijn voor brontemperaturen onder de 100°C, omdat deze onder lager dan atmosferische omstandigheden werken en dus hoge volume flows ten gevolge heeft. Normaal gesproken resulteert dit in grote machines met een hoge investering.

Het resulterende aantal warmtepompeenheden per capaciteitsbereik wordt gegeven in Figuur 3.13, ontleend aan hetzelfde onderzoek als hierboven vermeld. Het geeft aan dat het grootste aantal (3675, 88,0%) warmtepompunits te vinden is voor verwarmingscapaciteiten <10 MW

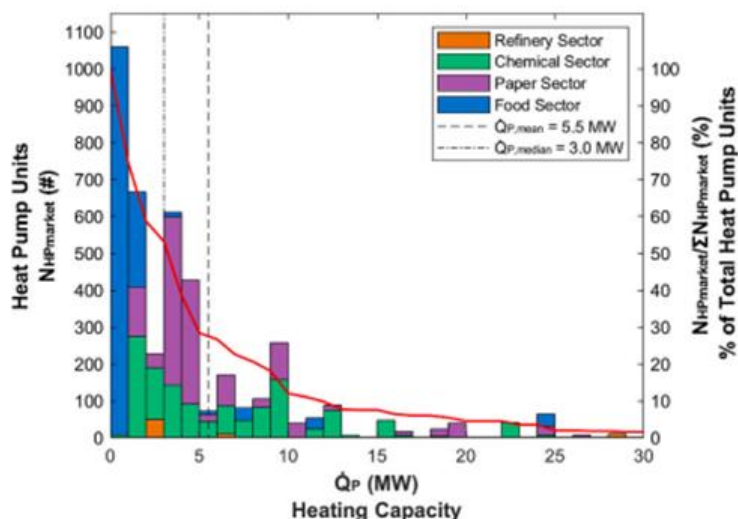


Fig. 10. Distribution of the heating capacity (<30 MW) for the heat pump units which make up the EU28 industrial heat pump market.

Figuur 3.13 Overzicht warmtepompcapaciteiten

Besparingspotentieel voor energie en CO₂-uitstoot

Op basis van de efficiëntieverbetering die wordt behaald door de implementatie van industriële warmtepompen, kan het energiegebruik in de vier beschouwde sectoren in de EU-28 met 528 PJ/jaar kunnen worden verminderd. De daarmee gepaarde gaande CO₂-emissiereductie die kan worden bereikt varieert van 37-53 Mton/j, afhankelijk CO₂ emissies van het elektriciteitssysteem. De hoogste besparing wordt bereikt met een volledig koolstofvrij elektriciteitssysteem.

In een top-down benadering van de industriële warmtevraag, dus voor alle industriële sectoren, wordt geschat dat warmtepomptechnologie 37% van de industriële warmtevraag kan leveren, het deel van de industriële warmte tot 200°C. Dit leidt tot een potentiële

¹⁴ An estimation of the European industrial heat pump market potential, Marina et al, 2021
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>

besparing op de CO₂-uitstoot van 146 Mton/j. Voor de Nederlandse procesindustrie worden de besparingen door toepassing van stoomrecompressie geschat op 25 PJ/j en 1,3 Mton/j.

Recent is er een demonstratieproject van grootschalige stoomcompressie op de site van DOW Terneuzen afgerond. De succesvolle integratie en werking van de tweetraps stoomcompressor die 12 ton/uur overtollige stoom opwaardeert van 3 naar 12 bar, met een COP van 8, resulteerde in een CO₂-emissiereductie van bijna 13 kton/jaar, en tegelijkertijd tot het verlagen van de energiekosten.

Stoomcompressie-integratiestudies

Er zijn twee cases geanalyseerd, voor respectievelijk de papierproductie en een biochemisch proces.

Voor een papierfabriek is een situatie geanalyseerd waarbij condensaat na de droogsectie wordt geflasht tot stoom van circa 1 bara, waarna deze stoom wordt opgewaardeerd tot circa 5 bara voor gebruik in de droogcilinders. De hier onderzochte integratie levert geen directe energiebesparing op. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de restwarmte van het condensaat niet echt restwarmte is. Het geflashte condensaat, dat een lagere massastroom heeft, bereikt de ketel ook op een lagere temperatuur, waardoor er extra vermogen nodig is om opnieuw te worden verwarmd. De potentiële energiebesparing door de integratie van de stoomcompressor zal indirect plaatsvinden bij de gasgestookte ketel, die nu door de verdere afkoeling van de rookgassen een hoger totaalrendement kan behalen. Deze besparingen op de ketel kunnen een eerste stap zijn om de integratie van MVR te rechtvaardigen. Daarvoor zou een verdere kwantificering van de besparing van de ketel moeten worden gemaakt. Om een aanzienlijk energiebesparingspotentieel te ontsluiten met stoomcompressie, is het belangrijk om te kijken naar het benutten van de restwarmte uit de drooglucht. Deze luchtstroom, afkomstig uit de droogsectie, is de belangrijkste restwarmtebron in dit proces. Door de warmte uit deze lucht terug te winnen en op te waarden tot het temperatuur-niveau van 100°C van het nieuwe flashvat, ontstaat er een veel grotere hoeveelheid restwarmte die in het proces kan worden hergebruikt. Op die manier wordt de capaciteit sterk vergroot en kan het vermogen van de ketel dienovereenkomstig worden verminderd.

Voor het biochemisch proces zijn generieke oplossingen onderzocht om restwarmte uit processen rond de 50°C terug te winnen en deze te gebruiken voor opwaardering om stoom tussen 120°C en 140°C te produceren. De benodigde thermische vermogens liggen doorgaans onder de 10 MW. Hiervoor werden zowel stand-alone stoomcompressie als de combinatie van een gesloten cyclus warmtepomp met een stoomcompressiestap daar bovenop onderzocht. Deze configuraties zijn geanalyseerd op hun economische haalbaarheid, waarbij de restwarmtetemperatuur is gevarieerd tussen de 80-30°C en de stoomtemperatuur tussen de 120-140°C. Daarnaast is rekening gehouden met verschillende thermische vermogens 1-10 MW.

De hier uitgevoerde analyses geven aan de terugverdientijd van het stand-alone concept onder alle temperaturomstandigheden altijd hoger is dan de gecombineerde oplossing. Dit heeft met name te maken met het feit dat de aanvangsdruk van de stoom in het stand-alone concept subatmosferisch is waardoor hoge volumetrische flows nodig zijn, leidend tot hoge compressorkosten. De trends in de resultaten geven aan dat de economische aantrekkelijkheid toeneemt naarmate de warmtepompcapaciteit toeneemt en de temperatuurstijging kleiner is. De terugverdientijd voor het gecombineerde concept varieerde tussen de 2-5 jaar.

Onzekerheden in de berekeningen vloeien voort uit de modellen die worden gebruikt om de kosten van de warmtepompen en specifiek van de compressor te schatten. Omdat er

beperkte informatie beschikbaar is over de stoomcompressorkosten voor de specifieke toepassingen, zijn er aanzienlijke onzekerheden in de kostenmodellen die voor deze systemen worden toegepast. Wanneer het aantal toepassingen van MVR-systemen toeneemt, wordt het ten zeerste aanbevolen om kosten- en prestatie-informatie uit deze toepassingen te extraheren om de kostenmodellen verder te verfijnen. Een andere manier om onzekerheden in de kostenmodellering te verminderen is het opvragen van offertes bij meerdere leveranciers.

Stoomcompressor testen

De testopstelling om metingen uit te voeren aan een stoomcompressiewarmtepomp bestaat uit twee units. De eerste unit is de testopstelling die de randvoorwaarden bepaalt waaronder de stoomcompressiewarmtepomp functioneert. Dit betekent dat zowel restwarmtetemperatuur als stoomdruk/temperatuur vanuit deze unit wordt opgelegd aan de warmtepomp. De tweede unit is de eigenlijke stoomcompressorwarmtepomp.

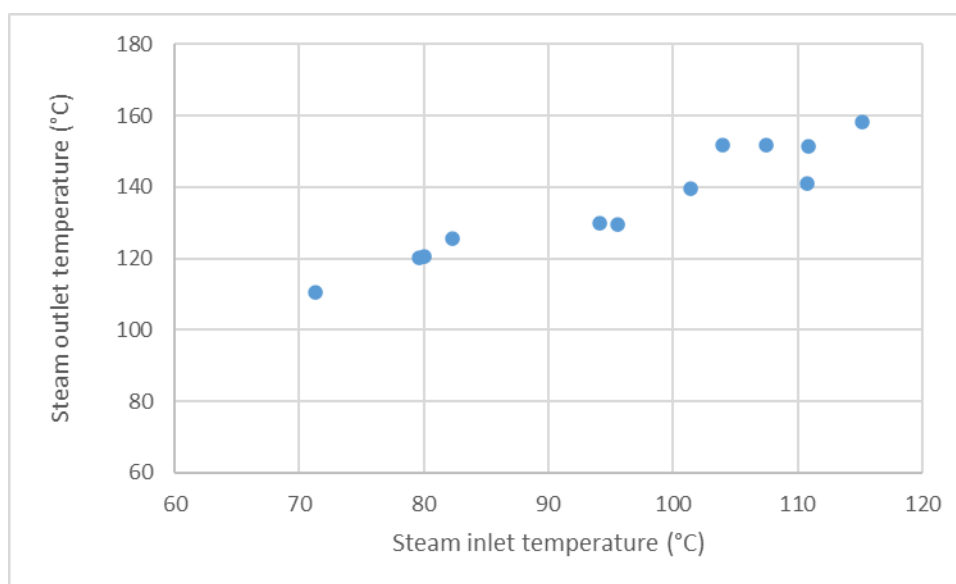
De testopstelling is ontworpen voor warmtepompen met een maximaal thermisch vermogen van circa 200 kWth. De testopstelling kan gesloten cyclus warmtepompen, semi-open warmtepompcycli en mechanische damprecompressiesystemen testen. Het systeem bestaat uit een buffertank die de restwarmte op de gewenste temperatuur levert en het voedingswater voor de stoomproductie. De stoom die door de warmtepomp wordt geproduceerd, wordt naar een stoomvat gevoerd en de geproduceerde stoom wordt teruggeleid naar de buffertank. Eventuele overtollige warmte wordt met een koeler uit de buffertank verwijderd.

De geteste stoomcompressiewarmtepomp is een zogenaamde semi-open cycluswarmtepomp. Een stoomcompressiewarmtepomp met open cyclus zou lagedrukstoom uit een industrieel proces gebruiken en deze rechtstreeks comprimeren tot stoom onder hogere druk en deze terugvoeren in het proces. Een halfopen cyclus gebruikt restwarmte (meestal in de vorm van een vloeistof) om stoom onder zeer lage druk (vacuüm) te produceren in een warmtewisselaar/ketel. Deze stoom wordt vervolgens tot een hogere druk gecomprimeerd en teruggeleid. Figuur 3.14 toont twee foto's van de stoomcompressor unit die in dit project is getest.

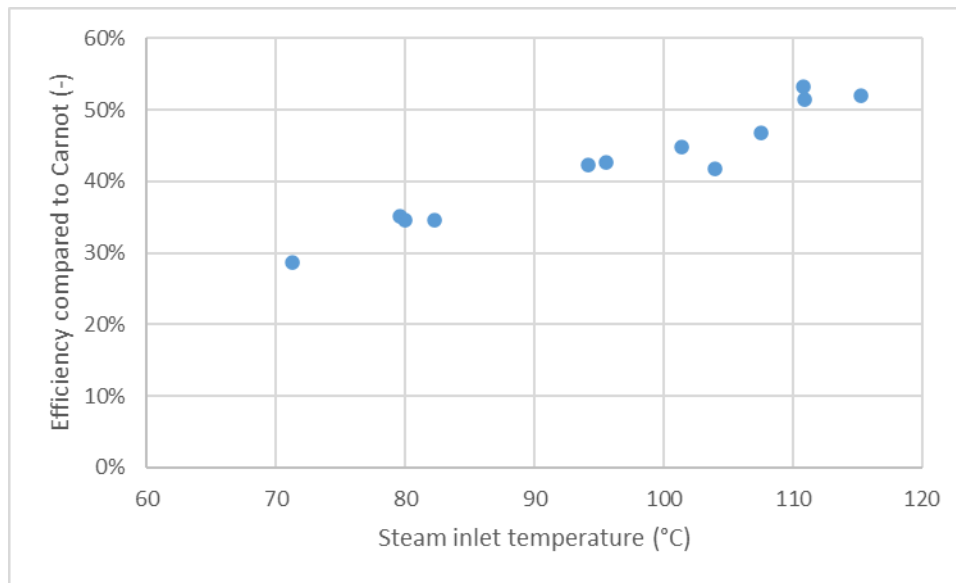
Binnen het meetprogramma is de stoomtemperatuur aan de inlaat van de compressor is gevarieerd tussen 70-115°C. De stoomtemperatuur na de compressor wordt gevarieerd tussen 110-160°C. Figuur 3.15 geeft de experimentele omstandigheden weer die zijn getest. Omdat de temperatuurcondities sterk uiteenlopen, wordt de prestatie van de stoomcompressor uitgedrukt als fractie van het theoretisch maximaal Carnot rendement. Dit is weergegeven in Figuur 3.16. Hieruit blijkt dat de subatmosferische compressor een relatief rendement van 30-35% laat zien, terwijl de andere compressor een relatief rendement van 40-50% laat zien. Algemene conclusies zijn dat het compressorrendement lijkt toe te nemen bij toenemende druk/dichtheid van de binnenkomende stoom. De verkregen rendementen zijn zeer bemoedigend voor een eerste prototype.



Figuur 3.14 Foto van experimentele stoomcompressor unit



Figuur 3.15 Stoom inlaat- en uitlaattemperaturen voor de uitgevoerde metingen



Figuur 3.16 COP van stoomcompressor vergeleken met Carnot rendement als functie van de inlaattemperatuur.

Pilotprojecten

De SPOT projectactiviteiten op het gebied van stoomcompressie hebben geleid tot twee initiatieven voor verdere ontwikkelings-, test- en demonstratieactiviteiten op het gebied van stoomcompressie.

- Een demonstratieproject in de papierfabriek SmurfitKappa in Tsjechië, als onderdeel van het SPIRIT-project onder het HEU R&D-programma. In deze demo wordt flashstoom van 2 bara, 800 kg/uur opgewaardeerd naar 6,1 bara door middel van een zuigercompressor van de firma Spilling.
- Er zal een pilotsysteem worden gebouwd en getest dat de stoomcompressietechnologie van StandardFasel combineert met PCM-thermische energieopslagtechnologie. Deze combinatie moet fluctuaties in de warmtevraag kunnen opvangen, specifiek voor batch-processen. Dit project is in de voorstelfase.

Innovatiebehoeften

Stoomsystemen vereisen een goed beheer van de kwaliteit van het voedingswater van de ketel om vervuiling en corrosieproblemen in het stoomsysteem te voorkomen. De integratie van compressortechnologieën gaat dus gepaard met strenge eisen op het gebied van olieverontreiniging of lekkage naar het stoomsysteem. Olivrije compressoren (en lagers) zijn een oplossing om problemen met stoomverontreiniging te voorkomen.

In retrofitsituaties van stoomcompressoren in bestaande stoomsystemen moet de stoomcompressor samenwerken met de bestaande stoomboilers. Vooral in dynamische procesomstandigheden heeft het aspect van procesintegratie en -controle aandacht nodig om dit gecombineerde systeem optimaal te laten werken. Dit vergt een goed begrip van het gedrag en de prestaties van een stoomcompressor in dynamische bedrijfsomstandigheden.

Voor de kleinschaligere toepassingen (< 10 MWth) moeten modulaire ontwerpconcepten en kant-en-klare oplossingen voor stoomcompressiesystemen worden ontwikkeld, die het mogelijk maken de kapitaalkosten te verlagen, de engineeringinspanningen te verminderen, plug-and-play-integratiestappen mogelijk te maken en procesuitval te verminderen.

Verbeterde en uitgebreide kostenmodellen voor stoomcompressortechnologieën moeten worden ontwikkeld om betrouwbaardere techno-economische haalbaarheidsstudies van deze technologie mogelijk te maken.

3.5 Toekomstige industriële verwarmingstechnologieën en integratie in het energiesysteem

Binnen dit werkpakket is gekeken naar (toekomstige) technologieën voor de industriële warmtehuishouding, de toepasbaarheid hiervan in industriële processen en wat dit betekent voor het nationale energiesysteem.

Toekomstige verwarmingstechnologieën

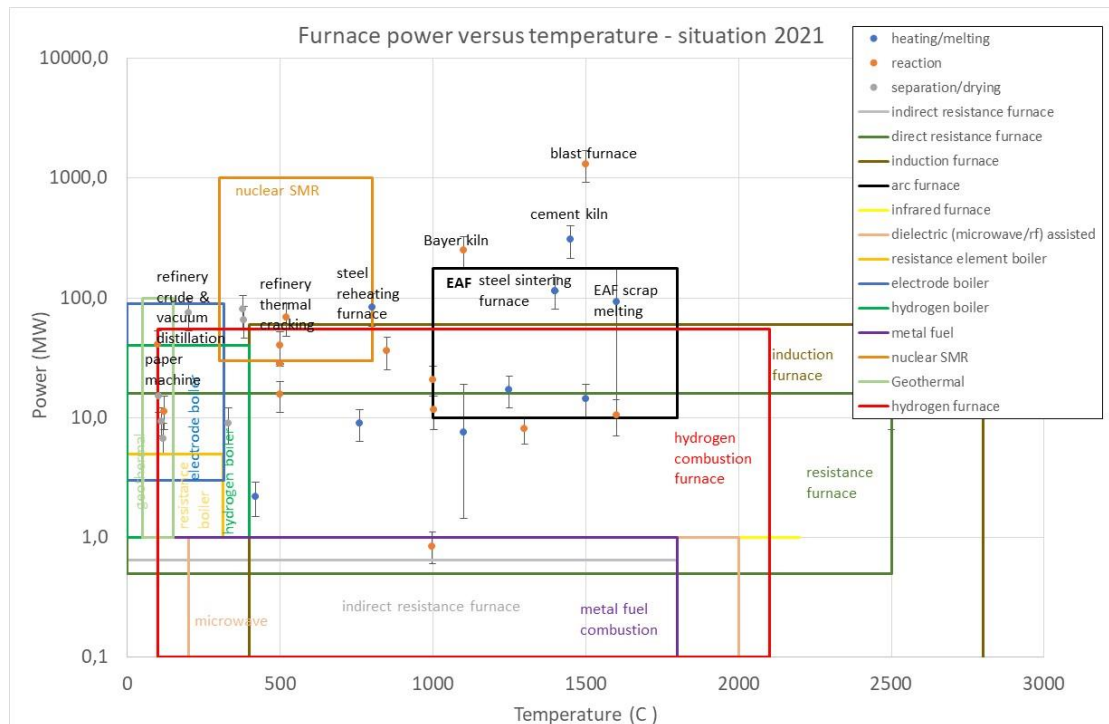
De zoektocht heeft geresulteerd in een longlist van technologieën. Na het toepassen van selectiecriteria zoals TRL, temperatuurniveau, energiedrager, verminderde CO₂-voetafdruk ontstond een shortlist. Voor warmteproductie resulteerde dit in meer technologieën voor elektrificatie dan voor het gebruik van koolstofvrije brandstof (H₂, metaalbrandstof). De volgende lijst met technologieën wordt geïdentificeerd, onderverdeeld in twee temperatuur bereiken: < 200°C en > 200°C. Dit is gedaan omdat de temperatuur mede bepalend is voor de toepasbaarheid van een technologie. Technologieën die hoge temperaturen kunnen genereren, zijn uiteraard ook toepasbaar voor het lagere temperatuurbereik. Tabel 3.5 geeft een overzicht van geïdentificeerde technologieën.

Tabel 3.5 Toekomstige koolstofvrije verwarmingstechnologieën

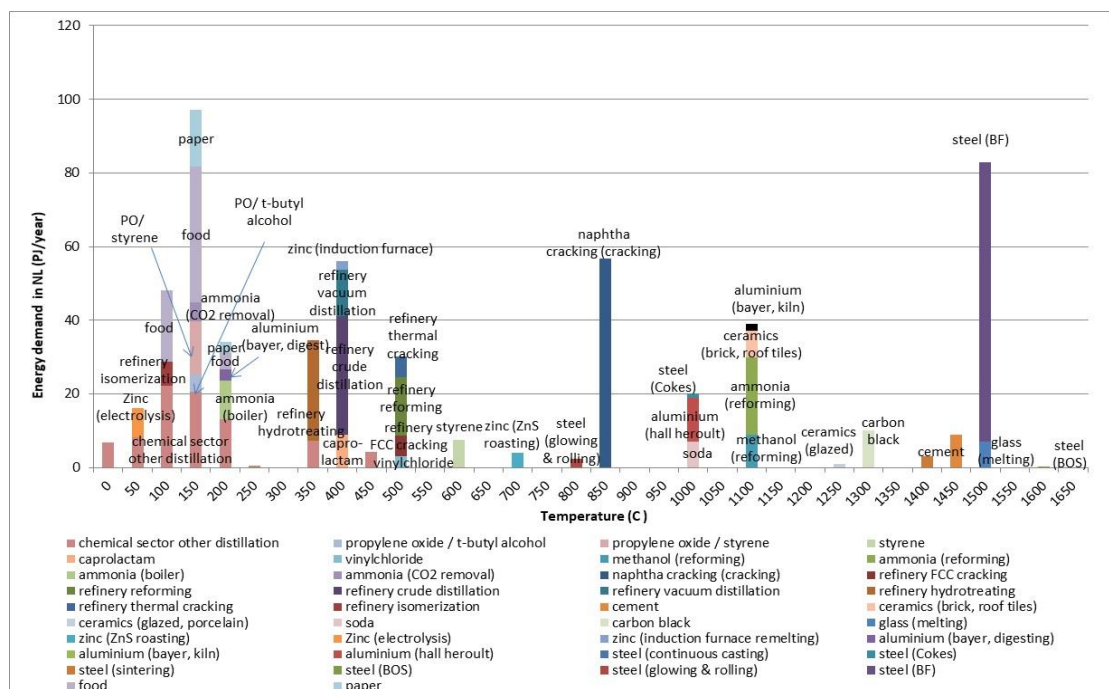
< 200°C (stoom/heet water productie)	> 200°C
Elektrisch weerstandselement	Elektrisch weerstands fornuis
Electrode boiler	Electric arc fornuis
Hybride (brandstof + elektrisch) boiler	Elektrisch inductie fornuis
Waterstof boiler	Infrarood fornuis
Multifuel (gas, vloeistof, H ₂) boiler	Microgolf/radio frequentie fornuis
Geothermie	Hybride (brandstof+elektrisch) fornuis
	Waterstof fornuis
	Multifuel (gas, vloeistof, H ₂) fornuis
	Metaal brandstof fornuis
	Small Modular Reactor (nuclear)

Toepasbaarheid op industriële processen

Vervolgens is gekeken naar de toepasbaarheid van de hierboven geïdentificeerde technologieën in industriële processen. Deze match wordt gemaakt door het temperatuur- en vermogensniveau van de technologie te beoordelen in vergelijking met die van het industriële proces. Figuur 3.17 geeft de vergelijking weer voor 2021. In de meeste gevallen is er een match te maken tussen technologie en toepassing met uitzondering van enkele zeer grootschalige processen in de staal- en cementindustrie. Meer gedetailleerde informatie over het vereiste temperatuurniveau van industriële processen wordt gegeven in Figuur 3.18.



Figuur 3.17 Match tussen warmteproductie technologieën en industriële toepassingen



Figuur 3.18 Energievraag van Nederlandse industrie als functie van temperatuurniveau

Warmtetransitie in het nationale energiesysteem

Welke technologie uiteindelijk zal worden toegepast hangt sterk af van het type energiedrager dat de voorkeur geniet en de infrastructuur die hier bijpast. Daarom is gekeken naar twee mogelijke hoofdroutes: de elektrificatieroute en de waterstofroute. Welke van deze twee routes in de toekomst het meest dominant zal zijn, is nog niet

duidelijk; Hoewel de elektrificatieroute een hogere efficiëntie heeft, heeft deze ook hogere netwerkkosten en problematische energieopslag op de middellange en lange termijn. De waterstofroute kent lage netkosten (het gasnetwerk is herbruikbaar) en kent uitstekende opslagmogelijkheden voor de lange termijn (zoutcavernes), echter de omzetting van elektriciteit naar waterstof kent een rendement van zo'n 70% waardoor de kosten voor duurzame opwekking stijgen.

Tabel 3.6 geeft voor beide routes weer welke technologieën een rol gaan spelen in die route. Er zit weinig overlap in beide routes, inhoudende dat weinig geïdentificeerde technologieën onafhankelijk van de gekozen route toekomstbestendig dan wel robuust zijn. Energiebesparing (hier onder Generiek gevoegd) zal in alle gevallen een belangrijke bijdrage leveren aan de verduurzamen van de warmtehuishouding van de industrie.

Tabel 3.6 Voorkeurstechologieën voor 2 routes naar een koolstofvrije industrie

	Electrification route	Hydrogen route
Generation technology	Wind turbines Solar PV Nuclear	Wind turbines Solar PV Nuclear Electrolysers
Conversion technology	• Electric furnaces (resistance, induction, electromagnetic wave, electric arc) • Electric steam boilers • Electric heat pumps • Hybrid steam boilers (hydrogen backup) • Hybrid furnaces (hydrogen backup)	• Hydrogen furnaces • Hydrogen steam boilers • Hybrid steam boilers (el cost low) • Hybrid furnaces (el cost low) • Fuel cells (preferably reversible) • Thermally driven heat pumps
Non-energetic energy	• Electrowinning • Electrolysers for hydrogen as feedstock	• Hydrogen reduction • Hydrogen as feedstock (NH₃, refineries,...)
Network	Enhanced electricity network: • International connections • Wind & solar infeed • Large industrial users	Hydrogen network • International hydrogen trade • Compact hydrogen carriers
Additional storage (if needed)	• Pressurized water/PCM heat storage (for steam applications) • Carnot batteries • Battery storage (short term)	Hydrogen storage: • Salt caverns • Empty gas fields • Hydrogen carriers
General	• Insulation • Heat recovery from products • Electrically/mechanically driven separation • Electric drive (e.g. compressors) • Heat integration • Recycling	• Insulation • Heat recovery from products • Heat recovery from flue gasses • Heat integration • Recycling

4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector

De Topsector Energie heeft twee doelstellingen: bijdragen aan de transitie naar een CO₂-arme energiesysteem en versterken van de internationale concurrentiepositie.

Duurzame energiehuishouding

Alle uitgevoerde activiteiten in dit project passen perfect in “Deelprogramma 2: Re-use energie” als “Deelprogramma 3: Replace energiedragers” van het TKI E&I MMIP 7 programma ten aanzien van een CO₂-vrije industriële energiehuishouding.

De opties die in dit project zijn onderzocht hebben betrekking op zowel warmteleverings-opties als opties voor warmtehergebruik. Mogelijkheden voor hergebruik van warmte zijn energiebesparende maatregelen die leiden tot minder energieverbruik en minder CO₂-uitstoot. Tegelijkertijd leiden deze opties tot een lagere behoefte aan warmtelevering. Opties voor warmtevoorziening leiden niet noodzakelijkerwijs tot een lager energieverbruik, maar leveren CO₂-besparingen op wanneer fossiele input wordt vervangen door hernieuwbare input. Beide wegen zijn binnen dit project bewandeld.

De energiebesparingen voor elk van de technologieën uit de werkpakketten worden onafhankelijk van elkaar bepaald en voor zowel het huidige energiesysteem als het toekomstige energiesysteem bruto primaire energie op te leveren.

- **Koolstofvrije brandstof:** De vervanging van een fossiele brandstof door een koolstofvrije brandstof als zodanig zal niet leiden tot besparingen op primaire energie, aangezien dezelfde hoeveelheid primaire energie wordt gebruikt om het proces aan te drijven. Wel zal bij volledig gebruik van een duurzame bron het eindgebruik ook volledig duurzaam zijn. Belangrijk hierbij is nog steeds prioriteit te geven aan het terugdringen van het eindgebruik aangezien dit tot veel lagere systeemkosten leidt.
- **Warmtekrachtkoppeling:** Momenteel levert warmtekrachtkoppeling ongeveer 100 PJ/jaar warmte aan de industrie. Warmtekrachtkoppeling met brandstofcellen zou een hoger elektrisch rendement opleveren en toch aanzienlijke energiebesparingen opleveren in het huidige elektriciteitssysteem. We gaan ervan uit dat 50 PJ van de industriële warmtevraag (25% van de warmtevraag onder 200°C) zou worden gedekt door FC WKK, en dat het elektrisch en thermisch rendement van FC respectievelijk 60% en 30% is. Samen met 50 PJ zal de brandstofcel 100 PJ elektriciteit produceren uit 167 PJ brandstof. Gescheiden productie van 50 PJ warmte en 100 PJ elektriciteit kost met het huidige elektriciteitssysteem 233 PJ aan brandstof. De besparing is daarom berekend op 67 PJ/jr. De CO₂-emissie wordt met 5,9 Mton/jr verminderd ten opzichte van de gescheiden productie van warmte en elektriciteit in het huidige systeem.
- **Warmteopslag op hoge temperatuur:** In dit rapport is circa 90 PJ hoge-temperatuur restwarmte geïdentificeerd. Dit zal echter niet allemaal technisch en economisch winbaar zijn. Een totaal besparingspotentieel van ~20 PJ/jaar wordt geschat door inzet

van hoge-temperatuur warmte terugwintertechnologie. De bijbehorende CO₂-emissiereductie is 1,1 Mton/jr (op basis van verbranding van aardgas).

- Stoom compressie: Stoomcompressie zou worden gebruikt tot temperaturen van 200°C of hoger, soms in combinatie met compressiewarmtepompen met gesloten kringloop als bodemcyclus. De warmtevraag tot 200°C in de Nederlandse industrie bedraagt circa 200 PJ/jr. Wanneer deze warmtevraag wordt gedekt door een combinatie van gesloten kringloop- en stoomcompressiewarmtepompen, wordt de input van aardgas vervangen door de input van elektriciteit. Bij een gemiddelde warmtepomp-COP van 3,5 is voor de productie van 200 PJ warmte 57 PJ elektrische energie nodig. Toepassing van elektrisch aangedreven warmtepompen (zowel gesloten kringloop als stoomcompressie) leidt voor Nederland in de huidige situatie tot een primaire energiereductie van $200 - 105 = 95$ PJ/jaar. De vermeden CO₂-emissie door het niet verbranden van aardgas is 11,3 Mton/jr. De CO₂-emissie veroorzaakt door de elektriciteitsproductie van 57 PJ/jr is 4,3 Mton/jr. De netto CO₂-emissiereductie komt daarmee uit op 7 Mton/jr met het huidige elektriciteitsproductiesysteem. Toenemende verduurzaming van het elektriciteitssysteem zal de emissies verder doen afnemen.

Internationale concurrentiepositie

Dit project richt zich op de gehele industriële warmtemarkt, in Nederland verantwoordelijk voor een energieverbruik van 560 PJ/jaar. Aangezien warmtetechnologie een sector overstijgende technologie is, kunnen ontwikkelingen sector overschrijdend worden gedeeld. Alle sectoren zullen hiervan profiteren, maar in het bijzonder de energie-intensieve sectoren zoals de staal-, chemie-, raffinage-, papier- en voedingsindustrie. De innovatieve oplossingen die binnen dit project zijn ontwikkeld, zullen nieuwe wereldwijde zakelijke kansen creëren voor fabrikanten van apparatuur en technologieleveranciers. Daarnaast zullen deze oplossingen de concurrentiekracht en efficiency van de Nederlandse industrie vergroten.

Een nationaal programma industriële warmte moet bijdragen aan 30% gerealiseerde energiebesparing in 2030. Op basis van het huidige warmtegebruik in de Nederlandse industrie komt dit neer op 168 PJ/jr. Bij een huidige aardgasprijs van circa 8 €/GJ voor grootverbruikers zou dit voor de industrie een kostenbesparing van ongeveer 1,3 miljard euro/jr betekenen. Het is duidelijk dat dit de concurrentiekracht van de Nederlandse industrie zal vergroten. Naast deze kostenbesparingen wordt de ecologische voetafdruk van de Nederlandse industrie verkleind, wat met name van belang is voor consumentenproducten. Bedrijven worden steeds vaker gevraagd om de duurzaamheid van hun producten aan te tonen. Dit zal hen helpen om marktaandeel en werkgelegenheid te behouden of te vergroten.

Een andere bedrijfssector die zal profiteren van de technologie die binnen het programma wordt ontwikkeld, zijn de fabrikanten van apparatuur en technologieleveranciers. Aangezien de ontwikkelde technologie toepasbaar is in een wereldwijde markt, is er een aanzienlijk exportpotentieel.

De business voor de fabrikanten van apparatuur kan worden bepaald op basis van de verwachte kostenbesparingen per industrie. Uitgaande van een terugverdientijd van 5 jaar is de investeringsruimte in de Nederlandse industrie 67000 M€, om zo 1300 M€/jr te besparen. De verwachting is dat richting 2030 warmteleveringsmogelijkheden en ingrijpende nieuwe processen worden ontwikkeld en implementatie daarvan in de jaren 2030 tot 2050 zal leiden tot extra reductie van fossiele energiedragers voor industriële processen. Deze nieuwe technologieën zullen leiden tot extra tewerkstelling van hoogopgeleide arbeidskrachten.

De ontwikkelde warmtepomp moet het eerste levensvatbare product worden voor een Nederlandse fabrikant van industriële warmtepompen. Deze systemen zijn zeer geschikt om warmte op te waarden van ruim onder de 100°C naar stoomniveaus tussen de 2 en 5 bara. Stoomcompressietechnologie is zeer geschikt om stoomniveaus van enkele bara op te waarden tot het vereiste stoomniveau van het proces (5 – 10 bar).

Innovatie

De innovatie zit hem in het bieden van nieuwe mogelijkheden voor warmtelevering op hoge temperatuur op basis van een hernieuwbare brandstof die continu kan worden geleverd aan een industrieel proces. De werkzaamheden die in dit project zijn uitgevoerd geven richtlijnen voor de meest effectieve optie voor de industrie en het Nederlandse energiesysteem.

Innovatie in warmtekrachtkoppeling ligt in de productie van middendrukstoom (10 bara) en elektriciteit met een rendement van 60% of meer. Dit project laat zien dat een brandstofcel een zeer efficiënte en flexibele technologie is die in staat om met verschillende brandstoffen gedurende een transitieperiode robuust te functioneren.

Gesmolten zout thermische opslag is van oudsher specifiek ontwikkeld als oplossing voor de geconcentreerde zonne-energiecentrales en voldoet aan de technische en economische vereisten voor deze toepassing. De innovatie die in dit project heeft plaatsgevonden, is het ontwikkelen van oplossingen voor warmteoverdracht en -opslag die kunnen voldoen aan de vereisten van industriële processen in de staal- en chemische sector.

De uitdaging en innovatie voor stoomcompressie ligt in het ontwikkelen van technologie op wat kleinere schaal (1-10 MW) met een kostenniveau dat concurrerend is en een goede businesscase oplevert. Dit project heeft laten zien dat het technisch zeer goed mogelijk is dit soort concepten te ontwikkelen.

5 Spin-off

Dit project heeft geleid tot een aantal vervolprojecten. Daarnaast geven de resultaten ook aanleiding tot nieuwe onderzoeksonderwerpen.

Op het gebied van gesmolten zouten loopt er een vervolgtraject op het gebied van toepassing van deze technologie binnen een elektrisch kraakproces. Dit project is EmissiOn, zie <https://ispt.eu/projects/emission-mooi-scheme/>

De activiteiten ten aanzien van stoomcompressie zijn vervolgt in het SCHP project, zie <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/steam-compression-heat-pump-34740>. Daarnaast is TNO coördinator van een EU project, getiteld SPIRIT, waarin ook stoomcompressie technologie wordt ontwikkeld, zie <https://spirit-heat.eu/>.

Tenslotte hebben de inzichten uit dit project geleid tot onderzoek waarin met name wordt gekeken naar de mate waarin de industrie zich kan aanpassen/flexibiliseren om een betere match te maken met het fluctuerende aanbod van duurzame energie.

6 Publicaties

- Geest. H.T. van der, Modeling of technology chains providing sustainable high-temperature heat for industry, MSc thesis, TU Eindhoven, April 2021.
- Huseynova, S., *Carbon-free fuel for industrial applications*, PdEng report 2021/035, TU Eindhoven, July 2021.
- Infographic Recoy, <https://www.recoy.com/wp-content/uploads/2022/03/SPOT-infographic.pdf>
- Dynamic use of SOFC for flexible heat & electricity supply in industrial processes, M. van der Pal, R. de Smidt, M. Koppes, Heat Powered Cycles 2023, 3-6 September, Edinburgh, UK
- Dit publieke eindrapport kan worden gedownload uit de TNO bibliotheek, <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

Ondertekening

TNO) Energy & Materials Transition) Petten, 6 mei 2024

S. van Loo
Research Manager

S. Spoelstra
Auteur

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl