

Outshine

Optimal Use of Technologies Supplying Heat to Industry using reNewable Electricity

TNO 2026 R10182 – 29 januari 2026

Outshine

Optimal Use of Technologies Supplying Heat to Industry using reNewable Electricity

Auteurs	S. Spoelstra, R. de Boer
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	20 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	Outshine
Projectnummer	060.53493

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.

© 2026 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1 Inleiding.....	4
2 Achtergrond en doelstellingen	5
3 Resultaten	7
3.1 Rekentool ontwikkeling.....	7
3.2 Experimentele testen.....	8
3.3 Use-cases	13
4 Bijdrage aan de doelstellingen van de Topsector.....	14
5 Spin-off.....	17
6 Publicaties.....	18
Ondertekening.....	20

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	TIND-22-01-03100370
Project titel	Optimal Use of Technologies Supplying Heat to Industry using reNewable Electricity
Coördinator en partners	TNO, Standard Fasel, Trespa, Trinseo
Project periode	01/09/2022- 31/08/2025

Contact- en beschikbaarheid rapport

Kopieën van dit rapport zijn verkrijgbaar via de repository van openbare TNO-rapporten: <https://repository.tno.nl/>.

Contactpersoon voor dit project is:

R. de Boer
E-mail: robert.deboer@tno.nl

2 Achtergrond en doelstellingen

Achtergrond

Rond 80% van het energiegebruik in de industrie bestaat uit warmte, vaak in de vorm van stoom die wordt geproduceerd door aardgas te verbranden. Het opwekken van warmte op andere manieren dan door het verbranden van aardgas is noodzakelijk om de CO₂-uitstoot van industriële warmtesystemen te verminderen. Een effectieve optie om CO₂-emissies te reduceren is elektrificatie van warmteproductie. Twee belangrijke technologieën hiervoor zijn directe elektrische verwarming, zoals elektrische boilers, en (compressie)warmtepompen. Beide maken elektrificatie mogelijk, maar hun eigenschappen verschillen aanzienlijk.

Elektrische boilers zijn relatief goedkoop in aanschaf (lage CAPEX), maar hebben een maximaal rendement van 100%. Daardoor is directe elektrische verwarming alleen financieel aantrekkelijk wanneer elektriciteitsprijzen lager liggen dan gasprijzen.

Warmtepompen daarentegen hebben aanzienlijk hogere investerings- en integratiekosten. De operationele kosten van warmtepompen zijn echter veel lager doordat gebruik wordt gemaakt van restwarmte en er dus veel minder elektriciteit nodig is. Een COP (Coefficient of Performance) van 3 is vaak haalbaar. Een bijkomend voordeel van een hogere COP is dat de benodigde netaansluiting kleiner kan zijn (voor een gegeven stoomproductie), waardoor warmtepompen financieel aantrekkelijk worden bij hogere elektriciteitsprijzen dan elektrische boilers.

De toename van wind- en zonne-energie in de afgelopen jaren heeft geleid tot meer prijschommelingen op de elektriciteitsmarkt, inclusief periodes met negatieve prijzen. Het aandeel duurzame opwekking zal de komende jaren nog verder groeien. Hoewel dit gunstig is voor elektrificatietechnologieën, blijft het een uitdaging om warmte te leveren aan industriële systemen tijdens perioden met beperkte duurzame elektriciteitsproductie. Warmteopslag kan hierbij uitkomst bieden en maakt het mogelijk om industriële processen continu op hernieuwbare energie te laten draaien. Met warmteopslag kan warmte worden geproduceerd en opgeslagen in perioden met lage elektriciteitsprijzen, om vervolgens te worden gebruikt wanneer de elektriciteitsprijzen hoog zijn.

Probleemstelling

Hoewel duidelijk is dat de combinatie van warmteproductie technologieën (zoals e-boilers) en warmteterugwinning (zoals warmtepompen) met warmteopslag toegevoegde waarde creëert, is het bepalen van de optimale configuratie en de impact op de businesscase complex. Dit maakt het moeilijk voor eindgebruikers om de juiste beslissingen te nemen.

Doelstelling

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een rekentool voor eindgebruikers, waarmee zij de impact kunnen beoordelen van verschillende opties en combinaties voor de elektrificatie van hun industriële warmtesystemen. De doelstellingen van het project zijn onder meer:

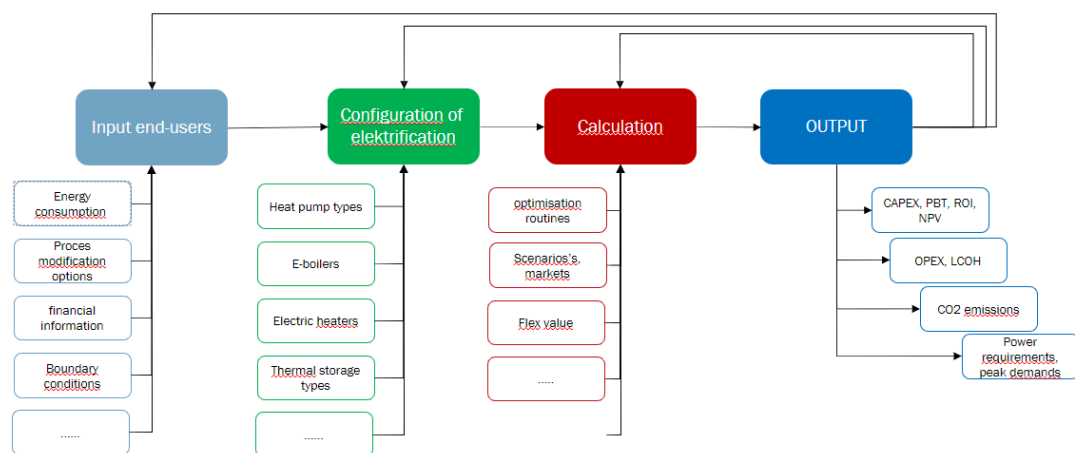
- Het identificeren van de Key Performance Indicators (KPI's) die de rekentool moet opleveren voor industriële elektrificatie.

- ☐ Het bepalen van de belangrijkste invoerparameters die eindgebruikers moeten aanleveren om use-cases te kunnen definiëren.
- ☐ Het verifiëren van de prestaties van elektrificatietechnologieën (warmtepomp, warmteopslag, directe elektrische verwarming) onder dynamische en/of deellastcondities.
- ☐ Het toepassen van de rekentool op meerdere use-cases van industriële eindgebruikers.

3 Resultaten

3.1 Rekentool ontwikkeling

Uit een korte literatuurstudie werd duidelijk dat er geen bestaande tools zijn met de gewenste functionaliteit. Een basisoverzicht van deze functionaliteit is hieronder weergegeven in Figuur 1 hieronder.

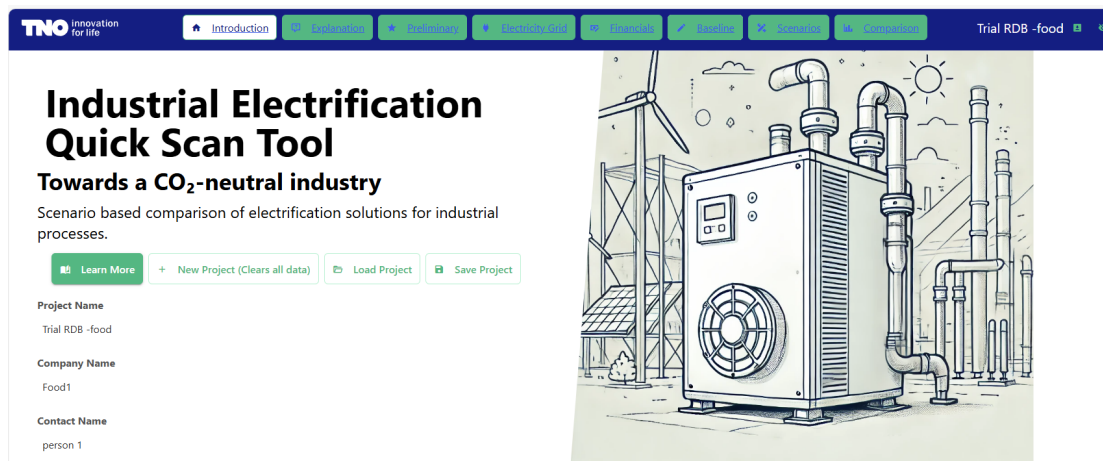


Figuur 1 Flow schema ter ondersteuning van de functionele beschrijving van de rekentool

Het doel van deze tool is om snel inzicht te geven in geschikte elektrificatie-oplossingen voor bestaande of toekomstige industriële processen. Industriële elektrificatie wordt hier gedefinieerd als het omzetten van conventioneel fossiel-gestookte processen naar processen waarbij elektriciteit wordt gebruikt. Hierdoor kunnen de CO₂-emissies worden verlaagd of zelfs volledig worden geëlimineerd (afhankelijk van de CO₂-uitstoot van de elektriciteitsleverancier). De tool streeft naar een balans tussen de kwaliteit van de verkregen inzichten en de hoeveelheid detail die nodig is in de invoergegevens. De uitkomsten van de tool dienen als inspiratie en als basis voor meer gedetailleerde vervolgstudies naar elektrificatie van het betreffende industriële proces.

De reikwijdte van de tool is beperkt tot industriële processen met een relatief lage complexiteit, wat grofweg neerkomt op bedrijven in het MKB-segment. Raffinaderijen en grote chemische sites vallen buiten de scope, omdat daarvoor maatwerk- of zelfs volledig op maat gemaakte analysetools nodig zijn. De tool richt zich op processen zoals drogen, koken, uitharden, scheiden, enzovoort.

De startpagina van de tool, welke via een web interface toegankelijk is, is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Startpagina van de rekentool

De tool begint met een voorlopige beoordeling door de eindgebruiker van het beschikbare detailniveau en de kennis over de warmtevraag in het proces en de typen warmteproductie. Ook wordt gekeken naar de beschikbare informatie over, en de aard en omvang van, maatregelen die al zijn toegepast of overwogen om de procesefficiëntie te verbeteren of CO₂-emissies te reduceren.

De tweede stap betreft informatie over de beschikbare (huidige en/of toekomstige) aansluiting op het elektriciteitsnet, die wordt gebruikt als randvoorwaarde in de elektrificatiescenario's.

Vervolgens moeten de financiële invoerwaarden voor energie- en emissiekosten worden aangeleverd, zodat de tool een basisanalyse kan uitvoeren van kosten (Capex – Opex) en baten. De resultaten van de berekeningen worden weergegeven in een scenariovergelijking, waarin onder meer de volgende aspecten worden uitgelicht:

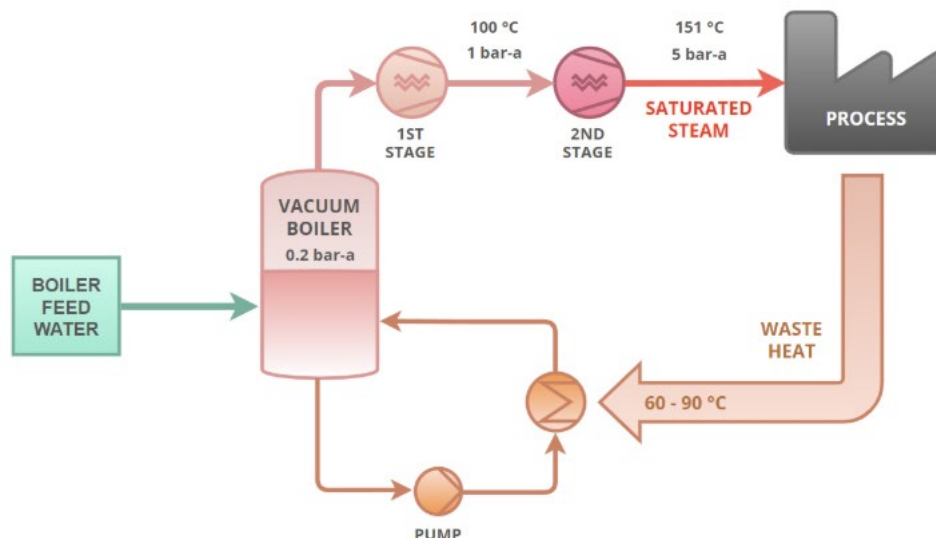
- ☐ De geschatte Capex- en Opex-kosten;
- ☐ De CO₂-emissies;
- ☐ De benutting van de netaansluiting;
- ☐ Het aandeel elektrificatie;
- ☐ Het energieverbruik voor gas en elektriciteit.

3.2 Experimentele testen

In dit deel van het project zijn dynamische testen uitgevoerd aan zowel een (stoomcompressie) warmtepomp als een Phase Change Material (PCM) warmteopslag.

Stoomcompressie warmtepomp

Een stoomcompressiewarmtepomp is een warmtepomp waarbij stoom als werkmedium wordt gebruikt. In dit geval wordt (vacuüm) stoom geproduceerd in een vacuumboiler, waarna de stoom middels een tweetal compressoren op een druk van 5 bara wordt gebracht. Dit schema staat in Figuur 3 weergegeven.



Figuur 3 Schema van de toepassing van een stoomcompressiewarmtepomp

Standard Fasel heeft deze technologie ontwikkeld en een prototype geïnstalleerd in het Carnot lab van TNO. Dit lab heeft de mogelijkheid om industriële condities te simuleren en de warmtepomp onder diverse condities te testen.

Met deze warmtepomp zijn een 4-tal dynamische testen gedaan:

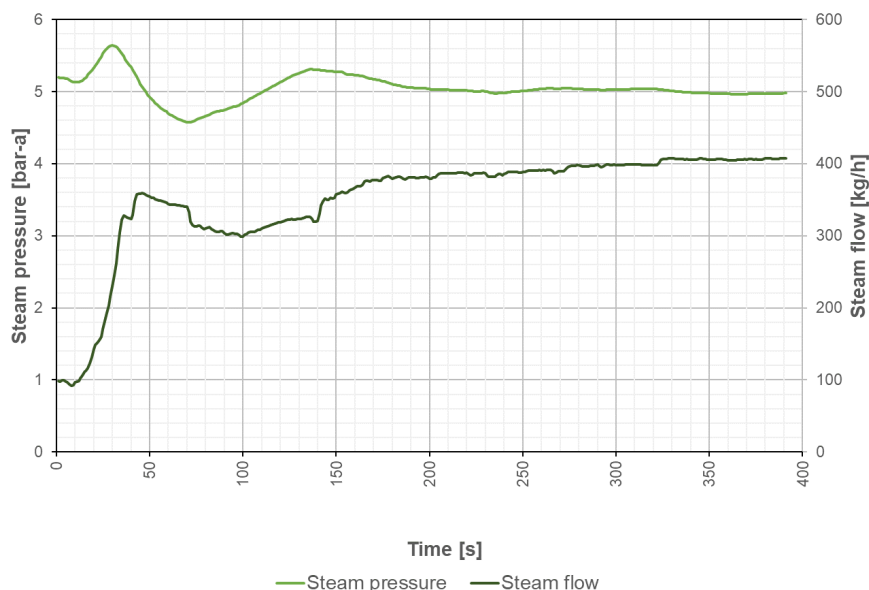
1. Van hot stand-by stand naar volledige belasting;
2. Van volledige belasting naar deelbelasting;
3. Van deel belasting naar volledige belasting;
4. Van volledige belasting naar stilstand.

Testserie 1 geeft aan dat het systeem binnen 6 minuten de gewenste stoomdruk levert. De maximale stoomflow wordt circa 2 minuten later bereikt.

In testserie 2 is het toerental van compressor 2 stapsgewijs verlaagd naar 50% van het maximum in een tijdsbestek van circa 3 minuten. Compressor 1 volgt de andere compressor via een regeling van de druk tussen beide compressoren. De stoomdruk zakt enigszins gedurende deze procedure maar stabiliseert zich binnen 2 minuten weer op de gewenste 5 bara. De stoomflow neemt ook sterk af door de gereduceerde toerental van de compressor en stabiliseert zich op de nieuwe waarden binnen 1 minuut nadat de compressoren op 50% staan. De COP van de warmtepomp vertoont een sterke afname als het toerental van de compressoren beneden de 70% komt. De functionaliteit blijft echter intact.

In testserie 3 is het systeem vanuit de eindcondities van de vorige test weer naar volledige belasting gestuurd. De stoomdruk bleef hierbij constant, terwijl de stoomflow in circa 3 minuten weer de maximale waarde heeft bereikt. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 4.

Testserie 4 laat zien dat het systeem zeer snel kan worden afgeschakeld. In een minuut is het systeem uit.



Figuur 4 Stoomdruk en stoomflow bij het verhogen van het compressor toerental van 50% naar 100%

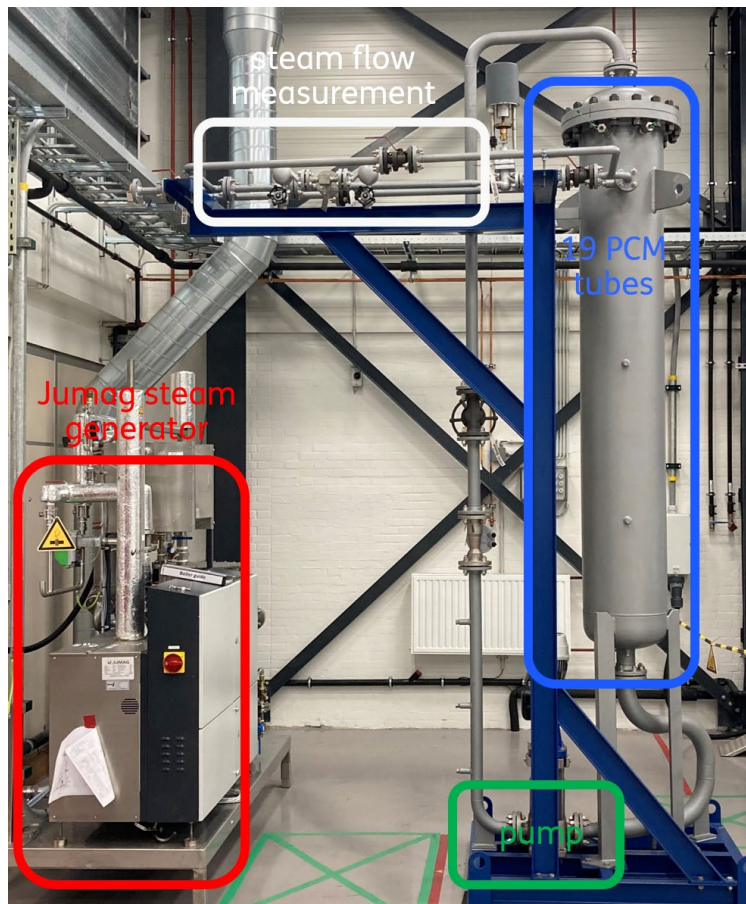
De metingen laten zien dat een (stoomcompressie) warmtepomp snel (minutenbasis) kan reageren op veranderingen in de stoomvraag. Verbetermogelijkheden zijn ook gesignaleerd ten aanzien van de regeling van de drukregelklep van de testopstelling en de toerentalregeling van de compressoren die een snellere respons mogelijk maken. Punt van zorg is de snelle daling in COP bij deellast bedrijf. Dit hoeft bij korte deellast periodes echter geen probleem te zijn.

PCM warmteopslag

PCM-warmteopslag (PCM-TES) heeft het potentieel om warmte met een hoge energiedichtheid op te slaan binnen een klein temperatuurbereik. Hierdoor kan warmte die door warmtepompen wordt geleverd worden opgeslagen zonder dat hun efficiëntie (COP) aanzienlijk afneemt. In de vorige sectie is het dynamische gedrag van een stoomcompressie warmtepomp al onderzocht. Echter, ook het dynamische gedrag van de daarmee gekoppelde warmteopslag is van belang. Daarom zijn experimenten uitgevoerd waarbij de PCM-warmteopslag onder deellastcondities is getest.

Daarbij is gebruik gemaakt van de PCM opstelling weergegeven in Figuur 5. Het opslagvat bevat buizen gevuld met een mengsel van grafiet en adipinezuur. Adipinezuur smelt bij circa 150 °C. Stoom vanuit de stoomgenerator condenseert in het opslagvat, waarbij het adipinezuur smelt (laden). Wanneer in een later stadium water wordt toegevoerd, zal het adipinezuur stollen en de vrijkomende warmte zal het water verdampen en stoom genereren.

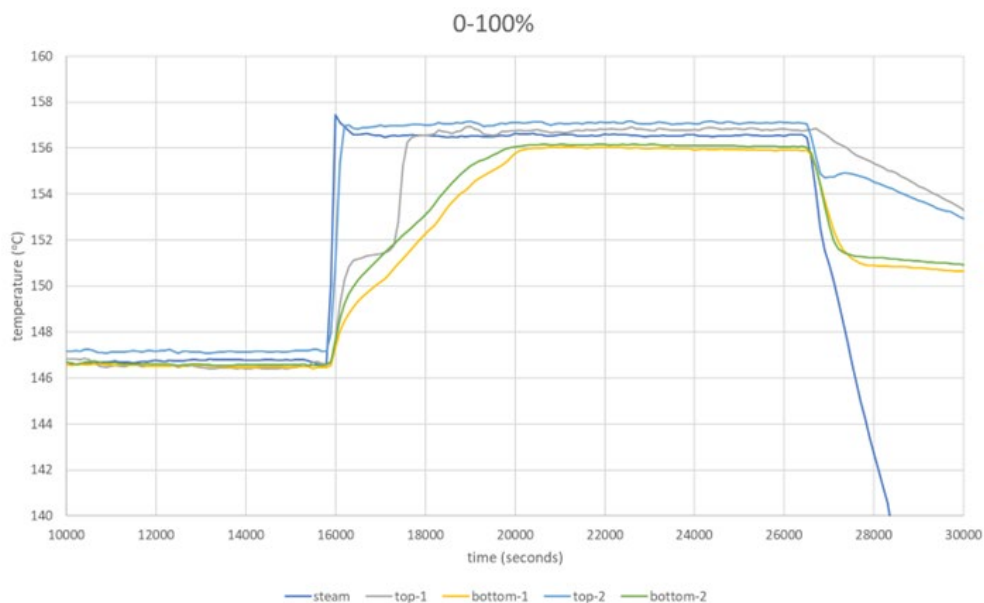
Voorgaande metingen zijn altijd uitgevoerd met volledige belading en volledig ontlading. Daarbij is vastgesteld hoelang het duurt om al het PCM materiaal te smelten, afhankelijk van de aangeboden stoomtemperatuur. Het doel van de hier gepresenteerde metingen is om het effect van deellast-laden te bepalen en te onderzoeken wat dit betekent voor toepassingen in de industrie. Een van de belangrijkste onzekerheden hierbij is het gedrag van het PCM wanneer het zich niet volledig in vaste of vloeibare toestand bevindt.



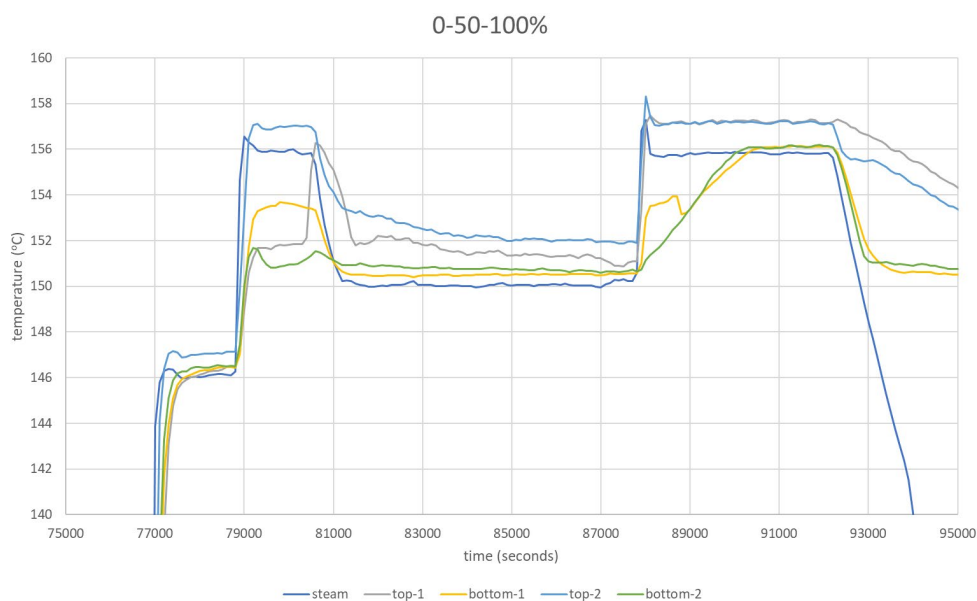
Figuur 5 PCM warmteopslag unit gekoppeld aan stoomgenerator

Binnen dit project zijn een 3-tal experimenten uitgevoerd. Alle experimenten zijn uitgevoerd aan het laden van de warmteopslag omdat de beschikbare meetinstrumentatie de analyse van deze fase beter mogelijk maakt dan het ontladen van de opslag. De 3 experimenten betreffen een volledige (100%) beladingsmeting als referentiemeting en 2 metingen waarbij de opslag eerst tot 50% is opgeladen, gevolgd door een pauze van 2 uur en vervolgens verder opgeladen tot 100%. Er is een duplo meting gedaan om de reproduceerbaarheid te controleren.

Figuur 6 en Figuur 7 geven een aantal gemeten temperaturen weer van het systeem bij de referentiemeting en de meting met pauze. De weergegeven temperaturen betreffen de stoomtemperatuur en top- en bodemtemperaturen voor 2 PCM buizen. De duplo meting laat vergelijkbare resultaten zien.



Figuur 6 Temperaturen als functie van de tijd voor 100% belading



Figuur 7 Temperaturen als functie van de tijd voor 1-50%-100% belading. Pauze tussen 81000 and 88000 seconden.

Met betrekking tot de prestaties onder deellast versus vollast laten de hier gepresenteerde resultaten zien dat er weinig tot geen verschil is tussen deellastladen en vollastladen van het warmteopslagsysteem. Voor een robuustere conclusie is het echter noodzakelijk om de opstelling en instrumentatie aan te passen zodat mogelijk optredende effecten beter zichtbaar worden.

3.3 Use-cases

Dit projectonderdeel richtte zich op het toepassen van de rekentool op use-cases die door de eindgebruikers Trespa en Trinseo werden aangeleverd. Daarbij bleek dat er vanuit Trespa te weinig data beschikbaar was voor een gedetailleerde procesanalyse. Trespa heeft aanvullende meetapparatuur geïnstalleerd die het mogelijk maakten een sluitende energie- en massabalans op te stellen.

Trinseo

Binnen Trinseo zijn al bestaande plannen en studies met betrekking tot warmtepomp toepassingen beschikbaar. De uitkomsten van de rekentool kunnen worden gevalideerd ten opzichte van hun eerdere studies. Deze vergelijking laat zien dat de uitkomsten van de rekentool goed overeenstemmen met de Trinseo studies.

Trespa

Bij Trespa is eveneens een eerder studie uitgevoerd naar de toepassing van een warmtepomp in hun proces. Ook hier geeft de rekentool een goede overeenstemming. De geschatte CAPEX van de tool is aan de lage kant.

De rekentool laat zien dat dit een handig hulpmiddel is om op een snelle wijze verschillende scenario's en technieken met elkaar te vergelijken. Dit kan een opstap zijn naar een meer gedetailleerde analyse.

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

De technologieopties die binnen het OUTSHINE-project zijn geïdentificeerd, ontwikkeld en gepromoot maken decarbonisatie van het energiesysteem mogelijk en leiden tot een vermindering van (de import van) fossiele brandstoffen.

Binnen OUTSHINE, evenals in eerdere TKI E&I / TSE Industry en MOOI-projecten, lag de focus op het toepassen van overkoepelende duurzame warmtetechnologieën die potentieel hebben om de industriële warmtevraag onder 200°C te verduurzamen.

De inschatting van het energie- en CO₂-reductiepotentieel begint met een analyse van het technisch potentieel — in dit geval de warmtevraag onder 200°C in de Nederlandse industrie. Een gangbare top-down-aanpak is de warmtevraag van individuele sectoren op te splitsen naar temperatuurinterval. Op basis van Eurostat gegevens uit 2020 bedroeg de industriële warmtevraag in Nederland in dat jaar 553 PJ (inclusief raffinaderijen). Naar schatting is circa 40% hiervan nodig < 200 °C, gelijk aan 213 PJ. De belangrijkste sectoren hierbij zijn voeding, papier en chemie.

Met het technisch potentieel kan het energie en CO₂ besparingspotentieel worden berekend. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat warmtepompen 80% van de warmtevraag <200°C leveren en e-boilers 20%. Deze vervangen de huidige gasgestookte ketels. De gemiddelde COP van een warmtepomp wordt op 3,3 aangenomen, terwijl de e-boiler een rendement heeft van 100%. De CO₂-factor voor verbranding van aardgas is 56 kg/GJ. De CO₂-factor voor elektriciteit is 0,2 kg/kWh¹.

De CO₂-emissie bij gebruik van gasboilers bedraagt jaarlijks 11.9 Mton. De CO₂-emissie van het warmtepomp deel bedraagt 2.9 Mton, terwijl de e-boilers daarnaast nog 2.4 Mton CO₂-emissie veroorzaken. De reductie van elektrificatie technologieën bedraagt dus 6.6 Mton/jaar. Deze reductie loopt verder op als de CO₂-emissie van het elektriciteitssysteem verder terugloopt door toename van duurzame elektriciteit.

¹ <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2025/49/energie-en-emissiefactoren-elektriciteit-update-2024#:~:text=Bij%20de%20productie%20van%20elektriciteit,Een%20marginale%20methode:%20de%20referentieparkmethode>

Internationale concurrentiepositie

Markt

Zoals eerder aangegeven bestaat de beoogde markt voor deze ontwikkeling met name uit de voedingsmiddelen-, de papier- en de chemische industrie. Omdat de procesvoering van dit type processen overal vergelijkbaar is, geldt dit niet alleen voor deze sectoren in Nederland, maar eveneens voor Europa en wereldwijd. De energiebehoefte in deze sectoren op 200°C bedraagt momenteel 213 PJ/jaar in Nederland. De Europese markt bedraagt naar schatting 2600 PJ. De wereldwijde markt is vanzelfsprekend weer een orde groter. Uitgaande van een gemiddelde systeemgrootte van 5 MW_{th} bestaat de markt in de EU uit meer dan 15.000 systemen.

De huidige markt voor stoombehoefte in de industrie wordt bediend door partijen die zich hebben gespecialiseerd in stoomketels en aanverwante apparatuur (appendages, leidingen etc). Grote partijen zijn uit op het behouden van hun marktpositie en niet genegen tot grote veranderingen. Een warmtepompconcept vereist een andere benadering en een breuk met de gebruikelijke aanpak. Innovatieve, kleinere, bedrijven spelen sneller in op deze ontwikkelingen.

Standard Fasel is een speler die nu wereldwijd actief is op het gebied van heet water en stoomketels. Het bedrijf is daarom goed bekend met de industriële stoommarkt. Middels de ontwikkeling die in dit project wordt beoogd, poogt Standard Fasel zich een positie te verwerven in een markt waarin stoom niet meer wordt geproduceerd met gasketels, maar met warmtepompen. Dit project geeft Standard Fasel de mogelijkheid een belangrijke speler te worden door combinatie van bestaande marktkennis en nieuwe technologie.

Innovatie

Eerdere ontwikkelingen van besluitvormingstools die in staat zijn het beste scenario te bepalen voor de elektrificatie van industriële warmte zijn onderzocht. De resultaten laten zien dat er weliswaar tools op de markt zijn die de energie-vraag op nationale schaal kunnen analyseren. Daarnaast bestaan er tools die zich richten op procesoptimalisatie, die complexe processen en energienetwerken kunnen analyseren en oplossingen kunnen bieden waarin warmtepompen, WKK, zonne-energie, koelmachines, biomassa, boilers en branders worden geïntegreerd in industriële processen. Voor de specifieke toepassing waar OUTSHINE voor bedoeld is, zijn er tot op heden geen vergelijkbare tools bekend op Europees niveau.

Het huidige project omvat de ontwikkeling van een rekeninstrument dat in staat is de optimale combinatie van elektrificatietechnologieën voor industriële processen te bepalen. De opgeleverde resultaten houden rekening met zowel een dynamisch en fluctuerend elektriciteitsaanbod als een intermitterende en dynamische warmtevraag.

De belangrijkste innovatie in dit project is de ontwikkeling van een beslissingsondersteunende tool voor de decarbonisatie van de Nederlandse industrie door het integreren van power-to-heat-technologieën. De operationele eigenschappen en prestaties van de betrokken technologieën maken het mogelijk om zich aan te passen aan zowel het patroon van de industriële warmtevraag als aan de fluctuerende elektriciteitsprijzen. Hierdoor ontstaat een optimalisatiemogelijkheid van het totale systeem met geavanceerde regelstrategieën, gekoppeld aan elektriciteitskosten. Dit vormt een vernieuwend resultaat, dat in de toekomst kan worden gebruikt voor de ontwikkeling van predictieve besturingssoftware.

Het OUTSHINE-project heeft het kennis- en expertiseniveau op het gebied van industriële warmtepompen, directe elektrische verwarming en technologie voor thermische opslag verder verhoogd, met name op het gebied van dynamisch gedrag en prestaties.

Der verwachting is dat met toenemende elektrificering en toenemende volatiliteit van aanbod en prijs van elektriciteit, het dynamisch bedrijven van zowel processen als warmteproducerende installaties een essentieel onderdeel gaat vormen van de bedrijfsvoering. Dit project draagt bij aan verder kennisopbouw rondom dit onderwerp.

5 Spin-off

De activiteiten binnen het OUTSHINE-project tussen Trespa, Standard Fasel en TNO hebben geleid tot een nieuwe internationale samenwerking onder het Clean Energy Transition Partnership (CETP). Dit is het CHASE-project, dat zich richt op de ontwikkeling van gecombineerde warmtepomp- en PCM-warmteopslagsystemen.

Meer informatie is te vinden op: <https://chase4heat.eu/consortium/>

6 Publicaties

Een deel van het werk op het gebied van stoomcompressie is gepresenteerd op de Gustav Lorentzen conferentie in 2024.

Development and testing of a Steam Compression Heat Pump for low-grade waste heat recovery, Miguel RAMIREZ , Gustavo OTERO-RODRIGUEZ , Daan SCHEEPENS, Geert van de WEIJER, Simon SPOELSTRA, 16th Gustav Lorentzen conference on natural refrigerants, 2024, DOI: 10.18462/iir.gl2024.1210
<https://iifiiir.org/en/fridoc/development-and-testing-of-a-steam-compression-heat-pump-for-low-grade-149080>

Acknowledgement

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei,
Regeling nationale EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst
voor Ondernemend Nederland

Ondertekening

TNO) Energy & Materials Transition) Petten, 29 januari 2026

R. de Boer
Author

A.R. Almeida
Deputy Research Manager

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl