

**Energy**

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
Postbus 15  
1755 ZG Petten

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 50 65

**TNO-rapport****TNO 2019 R10915****Sustainable Steam production in industry  
(STEPS)****Openbare eindrapportage**

Datum	24 juni 2019
Auteur(s)	S. Spoelstra
Exemplaarnummer	-
Oplage	-
Aantal pagina's	14 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	STEPS
Projectnummer	060.33679

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Uitgangspunten en doelstelling .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten .....</b>	<b>6</b>
3.1	Tweetraps compressiewarmtepomp.....	6
3.2	Enkeltraps thermo-akoestische warmtepomp .....	7
3.3	Veldtest simulatie.....	9
3.4	Business cases.....	9
<b>4</b>	<b>Bijdrage aan doelstelling van de regeling .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Spin off .....</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Openbare publicaties .....</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>14</b>

# 1 Inleiding

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## Gegevens project

Projectnummer	TEE1115010
Projecttitel	Sustainable steam production for industry (STEPS)
Penvoerder en medeaanvragers	ECN part of TNO, AkzoNobel, Bronswerk Heat Transfer, DOW, DSM, Huntsman, Heineken, IBK, IF Technology, Lamb-Weston Meijer, SmurfitKappa, Warmtebedrijf Rotterdam
Projectperiode	01/10/2015 – 31/03/2019

## Contact en verkrijgbaarheid rapport

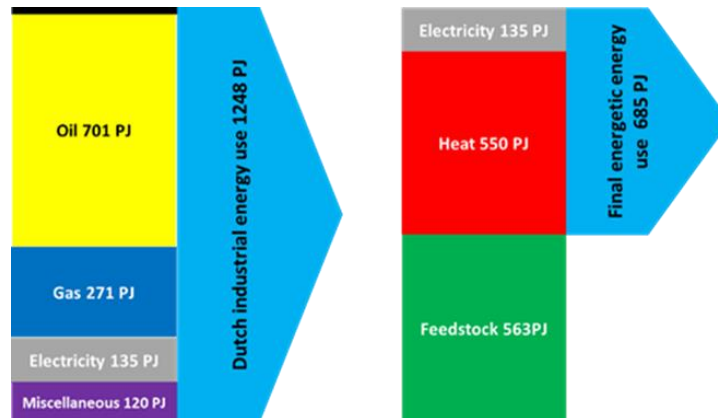
Exemplaren van dit rapport zijn te verkrijgen via de repository van openbare TNO-rapporten: <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

Contactpersoon voor dit project is

S. Spoelstra  
E-mail: [simon.spoelstra@tno.nl](mailto:simon.spoelstra@tno.nl)  
Tel: 06 5100 2828

## 2 Uitgangspunten en doelstelling

Het totale energiegebruik in Nederland in 2017 bedroeg 3131 PJ. Het gebruik van warmte heeft daar een groot aandeel in. Dit geldt in nog versterkte mate voor de Nederlandse industrie. Figuur 1 toont het energiegebruik van de Nederlandse industrie in 2016. Het finale energetische gebruik bedraagt 685 PJ, waarvan 550 PJ (80%) de behoefte aan warmte weergeeft.



Figuur 1 Nederlands industrieel energiegebruik in 2016

Terwijl het elektriciteitssysteem in toenemende mate wordt verduurzaamd door de inzet van hernieuwbare bronnen (wind, zon PV, biomassa), wordt de productie van warmte voor het grootste deel verzorgd door fossiele bronnen. De voorliggende vraag is dus hoe de duurzaamheid van de productie en gebruik van warmte in de industrie kan worden verhoogd. Twee oplosrichtingen worden hier beschouwd.

- Warmteproductie uit hernieuwbare bronnen (geothermie)
- Hergebruik van industriële restwarmte

Inzet van (ultra)diepe geothermie voor industriële processen vergt dat het temperatuurniveau van de bron voldoende hoog is (circa 200°C) en dat stoom kan worden aangemaakt op het gewenste drukniveau. De warmte uit een geothermie bron komt beschikbaar in de vorm van voelbare warmte in water op temperatuurniveau 's tussen 90°C en 200°C (afhankelijk van diepte). Hiermee kan een deel van de gewenste warmte worden gedekt. Echter, bij onttrekking van warmte uit een dergelijke stroom, zal de stroom afkoelen (glide) tot temperaturen onder het gewenste stoomniveau. Zonder aanvullende maatregelen kan daarom slechts een beperkt deel van de geothermische bron worden gebruikt.

In het geval van industriële restwarmte is het temperatuurniveau per definitie te laag om te worden toegepast. Ook hier kan de restwarmtestroom bestaan uit voelbare warmte, waarbij de stroom afkoelt zodra er warmte aan wordt onttrokken.

Beide bronnen van (rest)warmte zijn gebaat bij warmtepomp technologie welke goed kan omgaan met de afkoeling van de bronwarmte. Conventionele warmtepomptechnologie pompt warmte vanaf het laagste temperatuurniveau naar het hoogste temperatuurniveau. In genoemde voorbeelden leidt dit tot een groot temperatuurverschil en daarmee een laag rendement. Daarom is er behoefte aan warmtepompconcepten die onder hiervoor beschreven condities (uitkoelende

restwarmtestroom) in staat zijn om op economische wijze warmte te leveren op het gewenste temperatuurniveau en capaciteit.

#### *Doelstelling*

De overall doelstelling is om op economisch haalbare wijze stoom te produceren in het temperatuurgebied 120-200°C op basis van een geothermie of restwarmte bron. De productiekosten van stoom moeten gunstig uitvallen ten opzichte van conventionele stoomproductie zodanig dat er een positieve business case ontstaat voor de eindgebruiker. Dat wil zeggen dat de terugverdientijd in ieder geval < 5 jaar moet zijn.

Specifieke doelstelling van dit project is het valideren en vaststellen van de technische en economische haalbaarheid van een tweetal warmtepomp concepten, te weten een tweetraps compressiewarmtepomp en een enkeltraps thermo-akoestische warmtepomp. In beide gevallen gaat het om opwaarderen van een uitkoelende warmtestroom naar stoomniveaus. Daarbij wordt met de compressiewarmtepomp beoogd om stoomniveaus van 150°C te bereiken, terwijl voor het thermo-akoestische systeem wordt beoogd om het werkingsprincipe met een uitkoelende stroom vast te stellen.

In de oorspronkelijke doelstellingen was ook een veldtest van 1000 uur in een papierfabriek opgenomen. Deze is echter komen te vervallen en vervangen door een simulatie op basis van meetgegevens en berekeningen.

Voor elk van de eindgebruikers wordt een business case evaluatie uitgevoerd, inclusief een korte quick scan van de mogelijkheden van geothermie voor betreffende locatie.

## 3 Resultaten

### 3.1 Tweetraps compressiewarmtepomp

Op basis van informatie verkregen van eindgebruikers en de mogelijkheden van de compressie-warmtepomp, is een testprogramma opgesteld waarbij het werkingsgebied van de tweetraps compressiewarmtepomp wordt verkend. In feite bestaat het meetprogramma uit 3 meetseries.

- Eén verdamper, één compressor  
Hierbij worden twee verdampertemperaturen beoogd, zijnde 52°C en 97°C. De beoogde stoomtemperatuur varieert tussen 120°C en 150°C.
- Eén verdamper, twee compressoren  
Ook hierbij worden twee verdampertemperaturen beoogd, zijnde 52°C en 97°C. De gewenste stoomtemperaturen variëren tussen 120°C en 150°C.
- Twee verdampers, twee compressoren  
De temperatuur op de laagste verdamper varieert 52°C en 97°C. De temperatuur van de tweede verdamper varieert tussen 97°C en 111°C, afhankelijk uiteraard van de temperatuur van de andere verdamper. Ook hier is de gewenste stoomtemperatuur tussen 120°C en 150°C.

De ééntraps butaan warmtepomp die oorspronkelijk in het CATCH-IT project is getest bij SmurfitKappa Roermond is omgebouwd naar een tweetraps compressiesysteem met twee compressoren en twee verdampers. Daarnaast is butaan vervangen door pentaan.

Om deze warmtepomp te kunnen beproeven onder verschillende condities is een test rig ontworpen en gebouwd door BHT.

Beide systemen zijn aan elkaar gekoppeld middels een 6-tal leidingen en elektriciteitsvoorziening. Tevens is alle instrumentatie van de test rig verbonden met de meetcomputer van de warmtepomp. De warmtepomp is voorzien van een 150 kW elektriciteitsverbinding met een naastgelegen gebouw. In Figuur 2 is de samenbouw van de warmtepomp en de test rig te zien. De opstelling is in de buitenlucht geplaatst, zowel vanwege beschikbare ruimte als om de aanwezigheid van een brandbaar werkmedium (pentaan). De warmtepomp is conform ATEX regels opgeleverd.



Figuur 2 Samenstel van warmtepomp en test rig

Van de oorspronkelijke geplande 3 meetseries zijn er uiteindelijk 2 series uitgevoerd. De meetserie waarbij er 1 verdampers wordt gebruikt met 2 compressoren in serie heeft niet tot een stabiele situatie geleid waarbij een meting mogelijk was.

Tabel 1 geeft alle meetresultaten weer die zijn verkregen met de compressiewarmtepomp. De resultaten laten zien dat stoomproductie van 150°C mogelijk is vanuit een restwarmtebron van 65°C. De prestaties van de warmtepomp blijven achter bij de verwachtingen.

Tabel 1 Meetresultaten aan de tweetraps compressiewarmtepomp.

LT verdampers		LP compr	MT verdampers		HP compr	Stoom		Warmteverliezen		COP	Fractie Carnot
T (°C)	Q (kW)	P (kW)	T (°C)	Q (kW)	P (kW)	T (°C)	Q (kW)	Oil (kW)	Lucht (kW)	(-)	%
60,0	95,8	21,5	100,0	35	46,8	133,6	166	13,8	11,3	2,4	38
64,9	72,1	17,3	105	45,7	52,7	150,4	144	14,0	12,1	2,1	35
			94,3	91,5	41,6	140,9	110	8,9	13	2,6	29
			105	109	49,0	150,5	132	11,2	12,1	2,7	29
			85	78,3	36,3	130,6	97,5	5,3	10,3	2,7	31

De gemeten toestanden van pentaan zijn in een simulatiemodel ingevoerd om de cyclus verder te kunnen analyseren. Op basis van de pentaan cyclus berekeningen wordt de mechanisch vermogens berekend die aan het gas zijn toegevoerd. De werkelijk toegevoerde elektrische vermogens zijn veel groter. Dit is met name het geval voor de hoge-druk compressor. Dit kan liggen aan het isentrope rendement van de compressor of aan het rendement van de elektromotor die deze compressor aandrijft. Op basis van de toestandcondities van het pentaan voor en na de compressor wordt een isentropie rendement van 82% berekend. Dit is een gebruikelijke waarde. De enige andere logische verklaring is dat de elektromotor een slecht rendement heeft. Normaal gesproken heeft een elektromotor een rendement van 90-95%, maar in dit geval lijkt dit slechts 60% te bedragen. Daarnaast is er sprake van enige luchtinlek in het systeem, waardoor er grotere temperatuurverschillen over de warmtewisselaars optreden dan er normaal gesproken nodig is voor warmteoverdracht.

Op basis van het simulatiemodel is nagegaan wat het rendement had kunnen zijn indien bovenstaande zaken (elektromotor, luchtinlek) worden verholpen. Op basis van deze, relatief eenvoudige, veranderingen stijgt het rendement naar circa 55% van Carnot. Dit is conform verwachtingen.

### 3.2 Enkeltraps thermo-akoestische warmtepomp

Een foto van het gebruikte thermo-akoestische systeem is weergegeven in Figuur 3. De rechterzijde laat de warmtepomp zien, terwijl de linker de randapparatuur weergeeft die zorgt voor het aanbod en afname van warmte. De warmtepomp bestaat uit actief deel op de voorgrond en een passief deel (de resonator) op de achtergrond. De warmtepomp is opgebouwd uit een regeneratorunit met bijbehorende warmtewisselaars. De aandrijving van de warmtepomp vindt plaats

door middel van een zuigercompressor die in het vaatje helemaal op de voorgrond is geplaatst.



Figuur 3 Thermo-akoestische warmtepomp gebruikt voor glide metingen

Omwille van de eenvoud van de experimenten is voor zowel de lage temperatuurzijde als de hoge temperatuurzijde een vergelijkbare temperatuur van circa 50°C gekozen. Twee meetseries zijn uitgevoerd. De eerste meetserie gebruikt debieten die dermate groot zijn dat er in geringe mate sprake is van afkoeling en opwarming van die stromen. Deze situatie representeert dus de 'no glide' situatie. De tweede meetserie gebruikt een lager debiet aan de lage temperatuurzijde, waardoor deze stroom sterk afkoelt en er dus een 'glide' ontstaat. Beide meetseries worden vergeleken om het effect van glide vast te stellen. In de regenerator zijn een negental temperatuursensoren aangebracht die in detail de temperatuurverdeling meten. Op basis van deze metingen kan worden vastgesteld of een thermo-akoestische warmtepomp zich inderdaad als een serie parallelle warmtepompen gedraagt.

In de analyse van de testresultaten is gebruik gemaakt van de gemeten regenerator (interne warmtepomp) temperaturen. De testresultaten voor een meting met en zonder glide zijn in Tabel 2 vergeleken. De lift is hier het temperatuurverschil van de gemiddelde regenerator temperatuur aan de warme en koude zijde van de regenerator. Het geleverde vermogen  $Q_{\text{pumped}}$  is het thermische vermogen richting de warme kant. De Carnot factor (of Carnot efficiency) is berekend met de Carnot COP op basis van gemiddelde regenerator temperaturen. De Carnot factor is vrijwel onafhankelijk van de grootte van de glide omdat beide metingen vrijwel dezelfde Carnot factor laten zien. Dit toont aan dat COP niet wordt bepaald door de laagste temperatuur in de regenerator maar wordt bepaald door de gemiddelde temperatuur in de regenerator. De laatste kolom geeft de verhoging van de COP ten opzichte van de COP op basis van de laagste temperatuur van de glide. Dit getal geeft dus het voordeel aan van dit type warmtepomp ten opzichte van een warmtepomp waarbij de warmte van het laagste niveau naar het hoogste niveau moet worden gepompt.



Tabel 2 Meetresultaten voor glide en no-glide metingen aan thermo-akoestische warmtepomp

	$T_{\text{laag,gem}}$ (°C)	Glide (°C)	$T_{\text{hoog,gem}}$ (°C)	Lift (°C)	$Q_{\text{pumped}}$ (W)	CO (-)	Carnot_eff (-)	Voordeel (%)
Glide	-20	-29	67,3	87,2	3702	1,6	0,41	17
No-glide	1	-8	72,1	71,3	4428	1,9	0,40	6

De metingen aan de TA warmtepomp laten zien dat deze technologie zeer geschikt is om aan met een uitkoelende stroom als restwarmtebron om te gaan en tegelijkertijd een constante temperatuur te produceren aan de proceswarmtekant. Een TA warmtepomp gedraagt zich in die zin als een aantal parallelle warmtepompen die elk een eigen temperatuurlift hebben. Daarmee wordt de lift beperkt tot het hoogst noodzakelijke. Bij de in de experimenten toegepaste temperatuurglide van 33°C bedraagt het voordeel van dit systeem 17% ten opzichte van een systeem dat alle warmte vanaf het laagste niveau naar het hoogste niveau moet pompen. Bij grotere temperatuurglides zal dit voordeel toenemen.

### 3.3 Veldtest simulatie

Voor de maand november 2018 heeft Smurfit Kappa de procesdata van de PM2 beschikbaar gemaakt als input voor rendementsberekeningen van de warmtepomp. De procesdata bevat de afzuig luchtcondities en de stoomdrukken van de voor- en nadroogpartij. De stoomdrukken geven de temperaturen van de te leveren van proceswarmte, de afzuiglucht de temperaturen van de bronwarmte. De condities van de proceswarmte en bronwarmte worden eerst besproken. Hierbij wordt typisch naar het verloop gedurende 1 dag gekeken.

De droogsectie van de PM2 kent een voordroogpartij, gevolgd door een nadroogpartij. De nadroogpartij kent flinke fluctuaties in stoomdruk. Over het dynamische gedrag van de warmtepomp is op dit moment nog niet veel bekend, om uitspraken over de prestaties van de warmtepomp te kunnen doen hebben meer stationaire bedrijfscondities, zoals die voorkomen bij de voordroogpartij, daarom de voorkeur. De gewenste stoomtemperaturen in de voordroogpartij variëren van 133°C tot 164°C, afhankelijk van het type papier. Als bronwarmte wordt warmte uit de ventilatielucht van de droogpartij benut. Deze lucht heeft een vrij constante dauwpunt temperatuur van 65°C.

Uit de analyses blijkt dat ondanks de grote temperatuurliften toch nog redelijke COP waarden (2,5 – 3) worden verkregen. De grootste COP wordt verkregen voor het laagste gramgewicht omdat de droogtemperatuur hiervoor het laagst is. De prestaties van de warmtepomp kunnen sterk worden verbeterd indien het lukt om de bronwarmte op een hogere temperatuur beschikbaar te krijgen. Hiervoor zou het papierproductieproces moeten worden aangepast om met veel minder ventilatielucht te werken.

### 3.4 Business cases

Voor zowel de geothermie case als de restwarmte case zijn per bedrijf de benodigde investeringen in kaart gebracht, inclusief opslagkosten. Op basis van de prestaties van de geothermiebron, de (compressie)warmtepomp, de energieprijzen (elektriciteit, stoom) en CO<sub>2</sub> prijzen, zijn de operationele kosten vastgesteld. Grote onbekende in dit verhaal, zijn de integratiekosten. In dit project zijn simpele

terugverdientijden berekend op de investeringskosten in de warmtepomp of de combinatie geothermie+warmtepomp.

De geanalyseerde business cases laten zien dat de terugverdientijden voor alleen de warmtepomp tussen de 1,9 en 5,1 jaar liggen indien er gebruik wordt gemaakt van vrij beschikbare restwarmte. Hoe groter het temperatuurverschil is tussen restwarmte en proceswarmte, hoe lager de prestatie van de warmtepomp is en dus hoe langer de TVT wordt. Indien de bronwarmte van de warmtepomp niet 'gratis' is, wordt de TVT fors hoger. De TVT moet nog worden gecorrigeerd voor de integratiekosten, die in dezelfde orde als de warmtepomp investering kunnen liggen.

Indien geothermie wordt gebruikt als bron voor de warmtepomp, zijn de investeringen en ook de inkomsten hoger. TVT zijn in vrijwel alle gevallen langer dan in de restwarmte case, met uitzondering van de situatie waarbij er geen 'gratis' restwarmte aanwezig is.

Kostendaling van de warmtepomp blijft een belangrijk aandachtspunt voor de verdere ontwikkeling van industriële warmtepompen om de implementatie te versnellen.

## 4 Bijdrage aan doelstelling van de regeling

### *Duurzame energiehuishouding*

De beoogde markt voor de technologie zoals die is ontwikkeld binnen het STEPS project is de industriële warmtebehoefte in het temperatuurinterval 100-200°C. Daarbij wordt met name gekeken naar de sectoren chemie, raffinage, voeding & papier. De warmtebehoefte in genoemd temperatuurinterval binnen deze sectoren in Nederland bedraagt circa 140 PJ/jaar.

Besparingen op deze warmtebehoefte, die nu door fossiele energiedragers wordt ingevuld, door toepassing van warmtepompen is vastgesteld voor 2 scenario's. Het eerste scenario gaat uit van maximaal gebruik van een geothermiebron. Eerdere studies geven aan dat geothermie toepasbaar is in 65% van de industriële processen met een warmtebehoefte tussen 100-200°C. Bij de overige 35% wordt in dit scenario alleen restwarmte als bron ingezet. Het tweede scenario negeert geothermie en gebruikt alleen restwarmte als bron voor een warmtepomp.

Analyses laten zien dat toepassing van warmtepompen in combinatie met geothermie tot 75% op primaire energie kan worden bespaard. Wanneer alleen van een restwarmtebron wordt uitgegaan, is de besparing gemiddeld 50% bedraagt. Voor geothermie is uitgegaan van ultradiepe geothermie, waardoor warmte van 160°C beschikbaar is. Deze hoge brontemperatuur leidt tot een hogere efficiency voor de warmtepomp en daarmee hogere besparingen.

Wanneer het maximale potentieel aan geothermie wordt benut, in combinatie met warmtepompen, wordt een besparingspotentieel van 94 PJ/jaar berekend. Wanneer alleen restwarmtebronnen worden gebruikt, zakt dit potentieel naar 72 PJ/jaar. Deze primaire energiebesparingsgetallen zijn gebaseerd op het huidige energiesysteem, met het huidige primaire energiegebruik dat nodig is voor elektriciteitsproductie. Indien het elektriciteitssysteem volledig duurzaam zou zijn, wordt in beide scenario's voor 140 PJ/jaar aan fossiele brandstof vermeden.

### *Kennispositie*

Het STEPS project heeft, ondanks alle technische problemen, tot significante kennisopbouw geleid met betrekking tot ontwikkeling van hoge-temperatuur warmtepompen en toepassing van warmtepompen bij uitkoelende stromen.

Het werk aan de tweetraps compressiewarmtepomp heeft tot veel praktische ervaring geleid met betrekking tot het ontwerp en bedrijven van tweetraps systemen. Het werk biedt ook voldoende aanknopingspunten voor verder onderzoek en ontwikkeling van deze systemen, zodanig dat een betrouwbaar, efficiënt en economisch rendabel systeem kan worden verkregen.

Het werk aan de thermo-akoestische warmtepomp bevestigt de theoretische inzichten en leidt daarmee ook tot een verder versteviging van de kennispositie op dit terrein.

## 5 Spin off

Al voor de afloop van dit project heeft dit project geresulteerd in meerdere follow-up projecten.

- CRUISE. Al vroeg in het STEPS project was duidelijk dat de kostprijs van warmtepompen te hoog lag voor een gunstige business case. Het TKI-JIP CRUISE project (TEEI116085) is specifiek gericht op kostenreductie van industriële warmtepompen.
- LOW CAPEX. Kennis uit het STEPS project is ook gebruikt voor het opzetten van het TKI-JIP project LOW-CAPEX (TEEI117006), waarbij het doel is om op industriële schaal en tegen lage kostprijs stoom te produceren van 120°C. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een synthetisch werkmedium.
- FUSE. Het TKI-JIP project FUSE (TEEI118008) bouwt voort op het tweetraps concept zoals dat binnen STEPS is ontwikkeld voor hoge temperaturen. Doelstelling is verdere opschaling en vereenvoudiging in het ontwerp. Tevens wordt een natuurlijk koudemiddel toegepast.
- COMTA. De thermo-akoestische activiteiten worden vervolgd in het TKI-JIP project COMTA (TEEI118003) waarbij een compact thermo-akoestisch systeem, met perspectief op significante kostendaling wordt ontwikkeld.
- ENCORE. De ontwikkeling naar warmteproductie voor hogere temperaturen, zoals die binnen STEPS in gang is gezet, wordt voortgezet in het TKI-JIP project ENCORE (TEEI118001). Doelstelling hier is om minimaal 180°C warmte te kunnen produceren met een compressiewarmtepomp op basis van nieuwe werkmedia. Tevens worden alternatieve concepten voor prestatieverbetering en kostendaling beproefd.

## 6 Openbare publicaties

*Elektrische warmtepomp voor stoomproductie*  
Utilities, nummer 02 maart 2016

*Onderzoek tilt warmtepomp naar hoger plan*  
Petrochem , nr 3 – 2016

*Inspiratie voor innovatie*  
Chemie Magazine, mei 2016

## 7 Ondertekening

Petten, 25 juni 2019

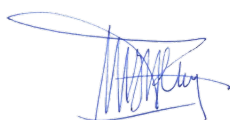


S. Spoelstra  
Auteur

ECN part of TNO



A.K. Wemmers  
Reviewer



M.H.F. Overwijk  
Research Manager