

Thermo-akoestische systemen voor het opwaarderen van industriële restwarmte

Openbare eindrapportage EOS-LT04022

S. Spoelstra (ECN)

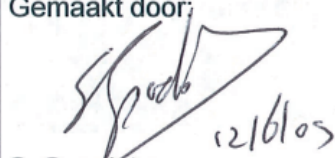
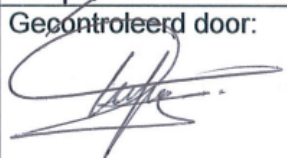
C.M. de Blok (Aster)

J.C.H. Zeegers (TUE)

R.H. Huisman (Huisman Elektrotechniek)

J.A. Lycklama à Nijeholt (NRG)

ECN-E--09-032

Revisie		
A	18 mei 2009; concept versie	
B	10 juni 2009; definitieve versie	
Gemaakt door:	Goedgekeurd door:	ECN Efficiency & Infrastructuur
 S. Spoelstra 12/6/09	 P.T. Alderliesten	
Gecontroleerd door:	Uitgegeven door:	Heat Technology & Systems (HTS)
 H. Tijani	 P.T. Alderliesten 11/6/09	

Verantwoording

Dit document bevat de openbare rapportage van het project ‘Thermo-Akoestische Systemen voor het Opwaarden van Restwarmte (TASOR)’. Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, regeling EOS: Lange Termijn uitgevoerd door SenterNovem. Het project staat bij EOS-LT bekend onder het projectnummer EOSLT04022.

Uitvoering

Het EOS-LT project is gestart per 1 januari 2006 met 5 partners, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) als penvoerder en Aster Thermoakoestische systemen (Aster), TU Eindhoven (TUE), Huisman Elektrotechniek BV (Huisman) en Nuclear Research and consultancy Group (NRG) als overige partners. De consortiumpartners zijn zeer erkentelijk voor de bijdrage van W. Mans (Innoforte) die in opdracht van Huisman de marktstudie heeft uitgevoerd.

Op 31 december 2008 werd het project beëindigd, 3 maanden later dan de oorspronkelijke voorziene einddatum.



Dit rapport vormt de enige openbare rapportage van dit project en is te downloaden vanaf de ECN-website: www.ecn.nl/publicaties.

Inhoud

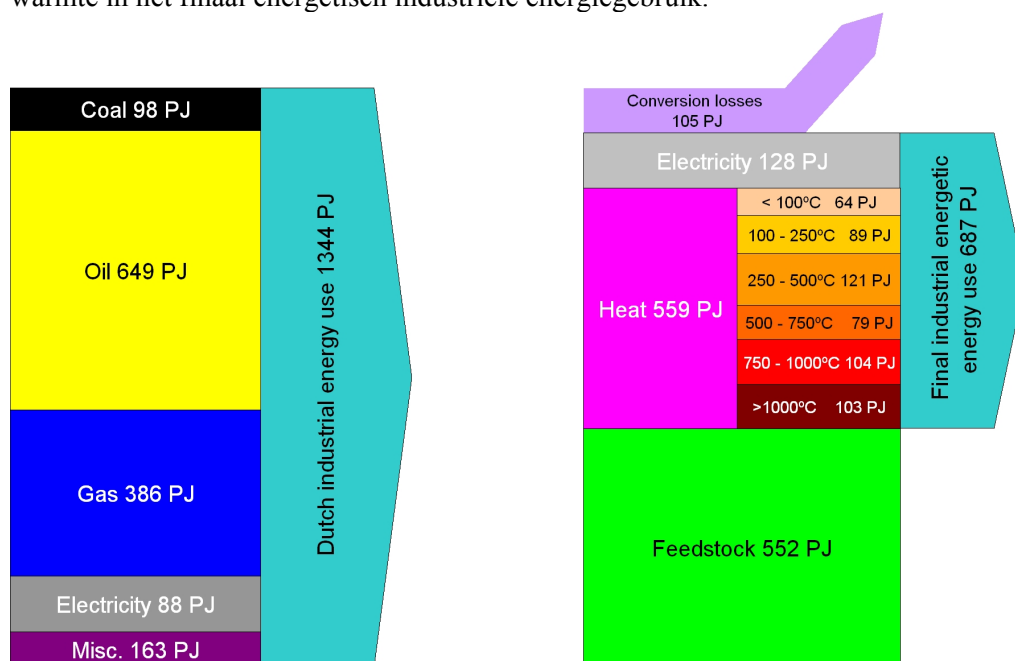
Lijst van figuren	4
1. Achtergrond en doelstelling	5
2. Technologiebeschrijving	7
3. Resultaten	10
4. Bijdrage aan EOS-LT programmadoelstellingen	15
5. Openbare publicaties	17

Lijst van figuren

Figuur 1.1	<i>Nederlands industrieel energiegebruik in 2006 (CBS)</i>	5
Figuur 2.1	<i>Principeschema van een Stirling motor</i>	7
Figuur 2.2	<i>Geweven metaalgaas als regenerator in een thermo-akoestisch systeem. Links zijn een aantal gaasjes te zien, rechts een microscopische opname van een gaas ...</i>	7
Figuur 2.3	<i>Thermodynamische Stirling en thermo-akoestische cyclus</i>	8
Figuur 2.4	<i>Thermo-akoestische warmtetransformator voor het opwaarderen van restwarmte</i>	8
Figuur 2.5	<i>Mogelijke toepassingen van thermo-akoestische systemen in termen van aandrijving en belasting</i>	9
Figuur 3.1	<i>Componentonderzoek binnen het TASOR project</i>	10
Figuur 3.2	<i>Een tweetal onderzocht regeneratormaterialen, metaalgazen(links) en een keramieken honingraat (rechts)</i>	10
Figuur 3.3	<i>Onderzochte motorconfiguraties, torusontwerp met externe heater (linksboven), coaxiaal ontwerp (rechtsboven), torusontwerp met interne heater (linksonder) en een meertrapsmotor met coaxiaal ontwerp (rechtsonder)</i>	11
Figuur 3.4	<i>Resultaten van het resonatoronderzoek, links vergelijking van CFD-berekenings-resultaten (zwart) van akoestische verliezen met meetresultaten (groen), rechts een opstelling van een hybride lopende golf resonator</i>	12
Figuur 3.5	<i>Twee opstellingen voor metingen aan thermo-akoestische warmtepompen, een lineaire motor gedreven koeler (boven) en een brandermotor gedreven warmtepomp (onder)</i>	12
Figuur 3.6	<i>Tijdsgemiddelde snelheidsvelden rondom een thermo-akoestische motor</i>	13

1. Achtergrond en doelstelling

In heel Nederland maar met name in de industrie bestaat het grootste deel van de energiebehoefte uit de behoefte aan warmte. Van het totale eindgebruik aan energie in de industrie komt meer dan 80% voort uit warmtebehoefte in de vorm van stoom op verschillende drukniveaus of voor ondervuring van fornuizen. Cijfers van het CBS voor het jaar 2006 leveren het volgende Sankey diagram op voor het energiegebruik in de industrie. Hieruit blijkt duidelijk het grote aandeel van warmte in het finaal energetisch industriële energiegebruik.



Figuur 1.1 *Nederlands industrieel energiegebruik in 2006 (CBS)*

Het grootste deel van die warmte komt uiteindelijk weer in de omgeving terecht via koelwater en koeltorens en door schoorsteen- en andere warmteverliezen. Deze ‘geloosde’ warmte noemen we Industriële Restwarmte. Theoretisch gezien is dit gelijk aan de totale energietoevoer aan de industrie, zijnde 792 PJ, als de warmte die nodig is of vrijkomt bij chemische omzettingen buiten beschouwing wordt gelaten. Nog afgezien van de thermische belasting op de omgeving die deze restwarmte met zich meebrengt, zou een nuttige bestemming van de geloosde warmte tot grote energiebesparing kunnen leiden.

Een eerste, voor de hand liggende, oplossing voor dit restwarmteprobleem is de vrijkomende warmte te benutten in het eigen proces of op de eigen locatie. Deze warmte-integratie wordt in de Nederlandse industrie reeds op grote schaal toegepast en biedt geen soelaas voor de overblijvende restwarmte. Het probleem met de nog vrijkomende restwarmte is, naast dat het vaak om een veelheid aan bronnen gaat, dat:

- Het temperatuurniveau van de restwarmte is te laag om nog te kunnen worden ingezet.
- De restwarmte komt vrij op een ander moment dan er behoefte aan warmte is.
- De locatie van de restwarmte ligt te ver af van de locatie van warmtebehoefte.

De grootste potentie biedt de oplossing voor het eerste probleem. Toepassing van een warmtepomp kan het temperatuurniveau van de restwarmte verhogen tot een niveau waarbij de warmte nuttig kan worden toegepast. Van belang hierbij is het zogenoemde pinchpunt. Dit pinchpunt volgt uit een procesintegratiestudie en geeft het temperatuurniveau aan waarboven warmte no-

dig is en waaronder warmte vrijkomt die niet kan worden ingezet. Een warmtepomp dient altijd warmte op te waarden van onder het pinchpunt naar boven het pinchpunt.

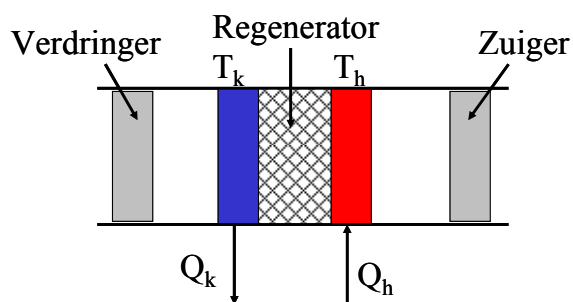
Warmtepompen die tegenwoordig commercieel beschikbaar zijn hebben doorgaans een beperkte temperatuurlift en werken op een relatief lage bedrijfstemperatuur ($< 100^{\circ}\text{C}$). Voor de industriële toepassing die hier wordt beoogd zijn warmtepompen nodig die bij hogere temperatuur werken en een grote temperatuurlift creëren. Voor het opwaarden van restwarmte is een warmtepomp nodig die een temperatuurlift kan genereren van $50\text{-}100^{\circ}\text{C}$ en kan opereren in een breed temperatuurgebied van -160°C tot meer dan 200°C . Een thermo-akoestisch (TA) systeem is hier in principe toe in staat.

Doelstelling

Dit project is er op gericht om de noodzakelijke thermo-akoestische kennis en inzicht te verkrijgen op basis waarvan de ontwikkeling van systemen met de beoogde rendementen in gang kan worden gezet. De technologie biedt uitzicht op een besparingspotentieel van circa 30 PJ/jaar in de Nederlandse industrie en een veelvoud daarvan buiten de industrie en buiten Nederland.

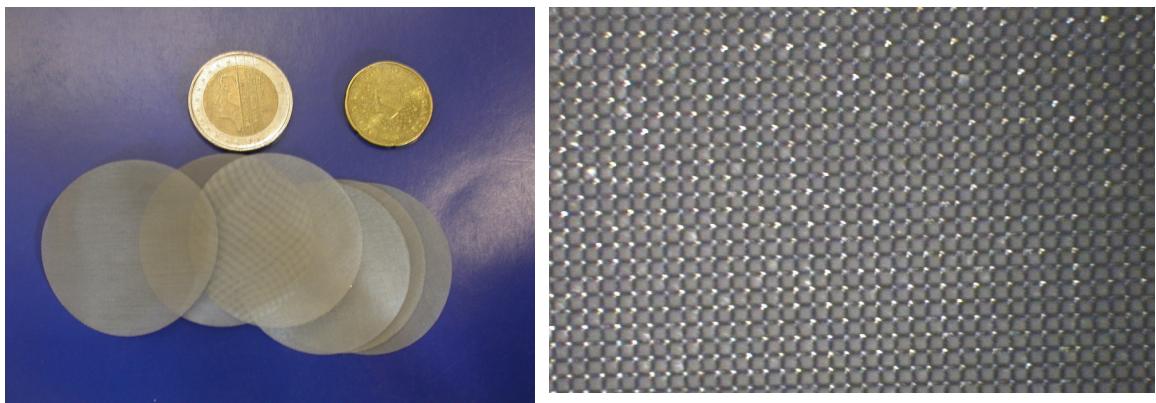
2. Technologiebeschrijving

Het werkingsprincipe van een thermo-akoestische motor of warmtepomp kan het beste worden begrepen door een klassieke Stirling cyclus te analyseren. De belangrijkste componenten van een Stirling systeem zijn een regenerator, een warme en een koude warmtewisselaar, een zuiger en een verdringer. In Figuur 2.1 zijn deze componenten weergegeven voor een Stirling motor. De zuiger is de plek waar het vermogen van de motor wordt geproduceerd. De verdringer zorgt voor de juiste relatie tussen druk en gassnelheid door de regenerator. Daarvoor wordt een gedeelte van de vermogensproductie van de motor gebruikt. De regenerator bevindt zich tussen beide warmtewisselaars. Het werkmedium (gas) wisselt warmte uit met het regeneratormateriaal. Gedurende een deel van de cyclus wordt warmte afgestaan vanuit het gas naar de regenerator, terwijl deze warmte in een andere deel van de cyclus weer wordt teruggegeven aan het gas.



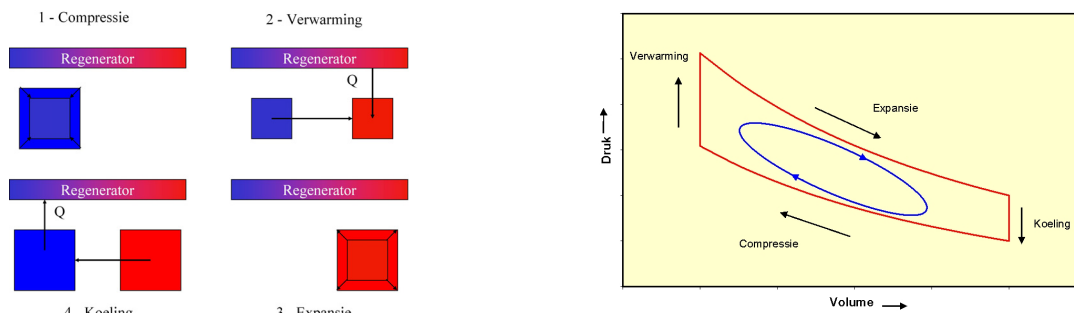
Figuur 2.1 *Principeschema van een Stirling motor*

Om een goede warmteoverdracht tussen het gas en het regeneratormateriaal te verkrijgen is een zeer groot oppervlak nodig. Dit wordt bereikt door een zeer poreus materiaal met kleine gasdoorgangen te nemen. Doorgaans wordt gebruik gemaakt van geweven metaalgazen met maaswijdte in de orde van 100 micrometer.



Figuur 2.2 *Geweven metaalgaas als regenerator in een thermo-akoestisch systeem. Links zijn een aantal gaasjes te zien, rechts een microscopische opname van een gaas*

De bewegingen van de zuiger en verdringer zorgen ervoor dat het gas een cyclus doorloopt. Daarbij zijn vier fasen te onderscheiden: compressie, verplaatsing naar rechts (hogere temperatuur), expansie en verplaatsing naar links (lagere temperatuur). Met de juiste timing van de zuiger en verdringer wordt er meer vermogen geproduceerd bij de zuiger dan er nodig is voor de verdringer. Indien een omgekeerde cyclus wordt doorlopen, moet er vermogen worden toegevoerd en wordt warmte verpompt van een lagere naar een hogere temperatuur.



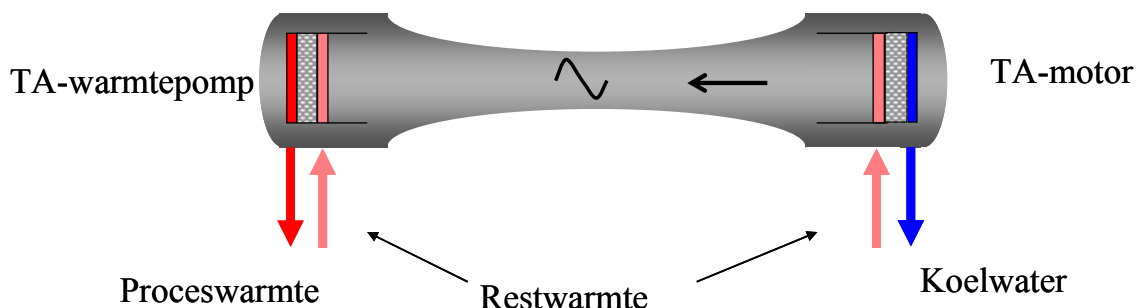
Figuur 2.3 *Thermodynamische Stirling en thermo-akoestische cyclus*

In een thermo-akoestische motor is de verdringer vervangen door een akoestisch circuit. De vermogensproductie van de motor bestaat uit akoestisch vermogen, vergelijkbaar met een bewegende zuiger. Evenals bij een Stirling motor wordt een gedeelte van het vermogen teruggevoerd naar de koude kant van de regenerator, via wat een ‘feedback inertance’ wordt genoemd. In tegenstelling tot de klassieke Stirling motoren heeft de thermo-akoestische variant geen mechanisch bewegende delen en is daarom betrouwbaarder en goedkoper te produceren.

De warmtetoe- en afvoer wordt verzorgd door warmtewisselaars aan weerszijden van de regenerator en aan te brengen. De warmtewisselaars verzorgen de warmteoverdracht tussen het warmtetransportmedium en het oscillerende werkmedium. Als werkmedium wordt een gas (helium, argon, stikstof, lucht) op druk (5 - 40 bar) toegepast.

Om de diverse componenten van een thermo-akoestisch systeem (akoestisch) te koppelen worden de componenten in een resonator geplaatst. De resonator fungeert hierbij naast behuizing tevens als drukvat en bepaalt de frequentie van het systeem. Dit is vergelijkbaar met een orgelpijp. Hoe langer de behuizing, hoe lager de frequentie. Typische werkfrequenties voor thermo-akoestisch systemen liggen tussen de 40 en 200 Hz.

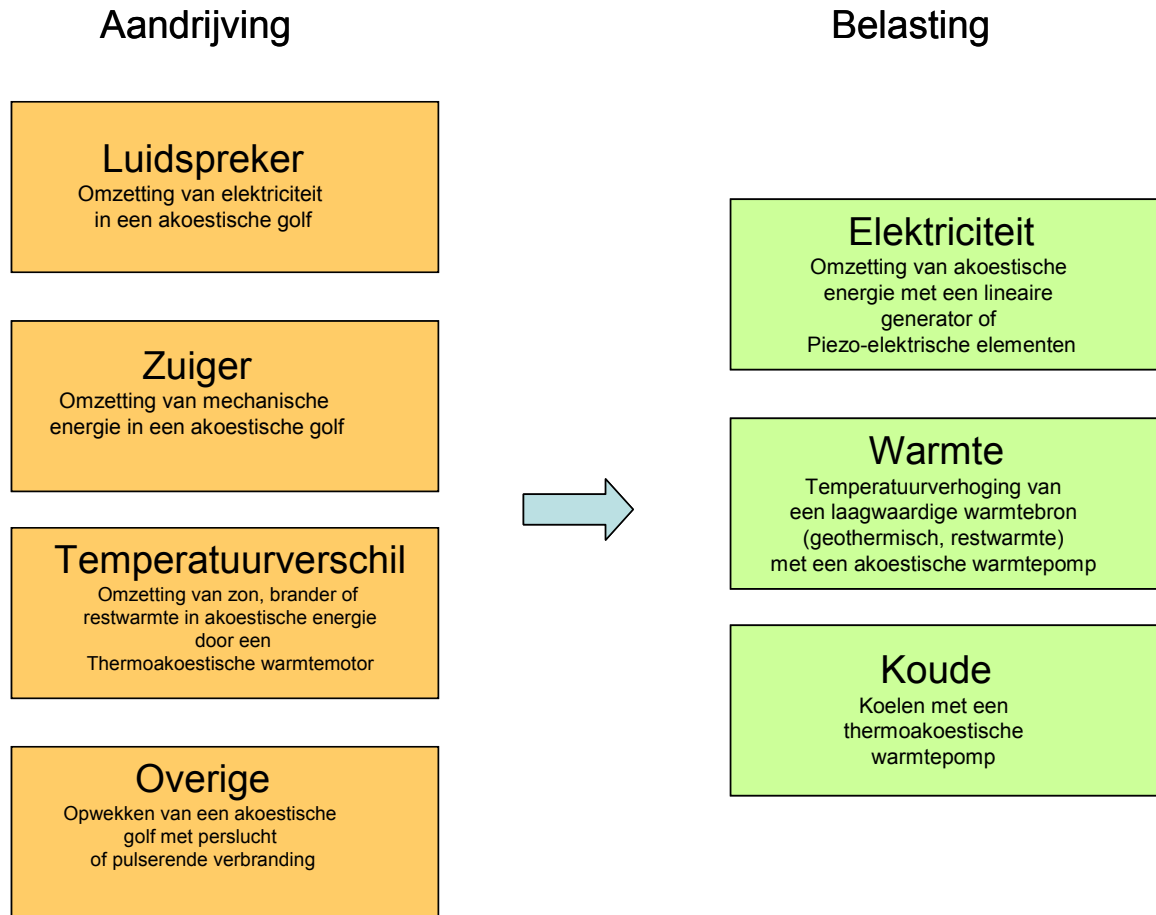
In Figuur 2.4 is aangegeven hoe een thermo-akoestisch systeem functioneert als warmtetransformator voor het opwaarderen van industriële restwarmte. Aan de rechterkant zit een TA-motor die werkt op het temperatuurverschil van een restwarmtebron en de omgevingstemperatuur. Het in de TA-motor gegenereerde akoestische vermogen zal in de TA-warmtepomp warmte oppompen van de lage temperatuurkant naar de hoge temperatuurkant. De lage temperatuurkant wordt verzorgd door het aanbieden van restwarmte. Aan de hoge temperatuurkant komt nuttige warmte op een hoger temperatuurniveau beschikbaar.



Figuur 2.4 *Thermo-akoestische warmtetransformator voor het opwaarderen van restwarmte*

In principe is er een groot scala aan toepassingen mogelijk voor zowel thermo-akoestische (TA) motoren en warmtepompen afzonderlijk als een combinatie van beiden.

Het overzicht hieronder in Figuur 2.5 geeft aan de linkerkant aan op welke manieren akoestische energie kan worden gegenereerd (aandrijving). Een TA-motor maakt gebruik van een temperatuurverschil. Rechts staan de energievormen die met akoestische energie kunnen worden opgewekt (belasting). Een TA-warmtepomp kan zowel warmte als koude genereren. Een lineaire generator kan worden toegepast om akoestisch vermogen om te zetten in elektriciteit.



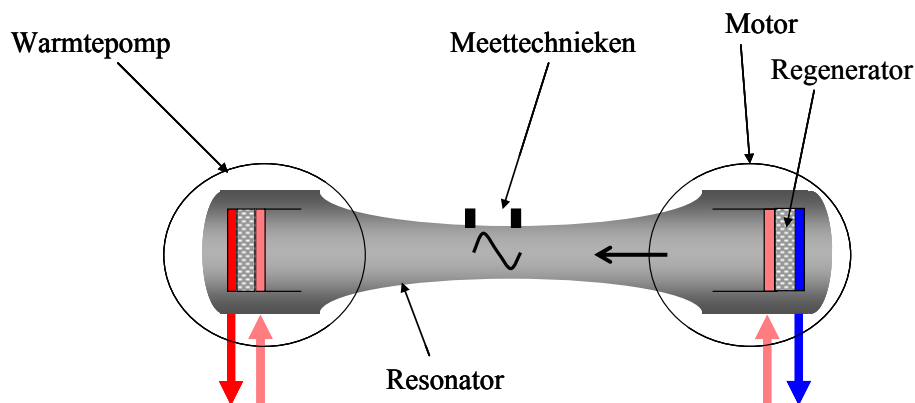
Figuur 2.5 *Mogelijke toepassingen van thermo-akoestische systemen in termen van aandrijving en belasting*

Hoewel de thermo-akoestische technologie vrij complex is, is de praktische uitvoering relatief eenvoudig. Dit biedt grote voordelen ten aanzien van de economische haalbaarheid van deze technologie. Verdere voordelen zijn:

- Geen bewegende onderdelen bij het thermodynamische proces, dus betrouwbaar, lange levensduur
- Milieuvriendelijk werkmedium (lucht, edelgas).
- Gebruik lucht of een edelgas geeft groot bereik toepassingsgebied omdat er geen faseovergangen optreden.
- Gebruik van simpele materialen die geen speciale eisen qua maatvoering behoeven, commercieel verkrijgbaar zijn en dus relatief goedkoop zijn.
- Op basis van dezelfde technologische principes kan een zeer groot aantal mogelijke toepassingen worden bestreken.

3. Resultaten

De werkwijze, die is gevolgd in dit project, volgt de opbouw van een thermo-akoestisch systeem. Er is onderzoek verricht aan de diverse componenten uit het systeem. De plaats van de diverse componenten binnen het totale systeem is in weergegeven in Figuur 3.1.

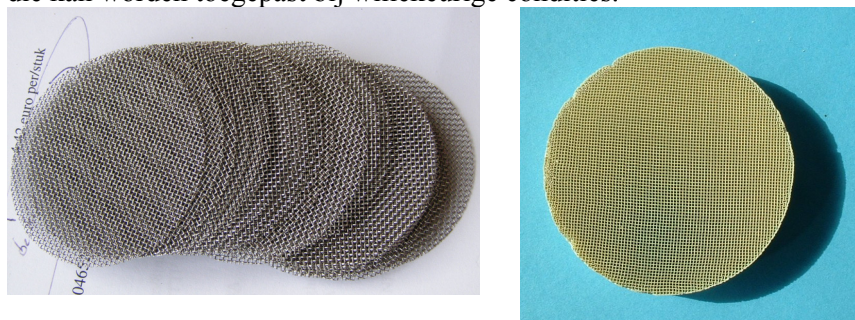


Figuur 3.1 Componentonderzoek binnen het TASOR project

Naast deze specifieke componenten is gedetailleerd onderzoek uitgevoerd aan stromingsverschijnselen rondom de motor en warmtepomp, de geldigheid van schalingsregels, de koppeling van componenten zoals motor en warmtepomp en de marktaspecten. Hieronder wordt een korte beschrijving gegeven van de resultaten van ieder van de onderdelen.

Binnen het onderdeel meettechnieken is vooral gekeken naar het meten van akoestisch vermogen. Daarbij is de betrouwbaarheid van een aantal bestaande technieken onderzocht. Hierbij is vastgesteld onder welke condities deze methodes nauwkeurige resultaten geven. De meetnauwkeurigheid wordt uiteindelijk geschat op circa 10%. In het project is een nieuwe meetmethode ontwikkeld die kan worden toegepast om het akoestische vermogen op een willekeurige positie in het systeem te kunnen meten en die niet afhankelijk is van een meetbuis met zekere lengte en constante diameter.

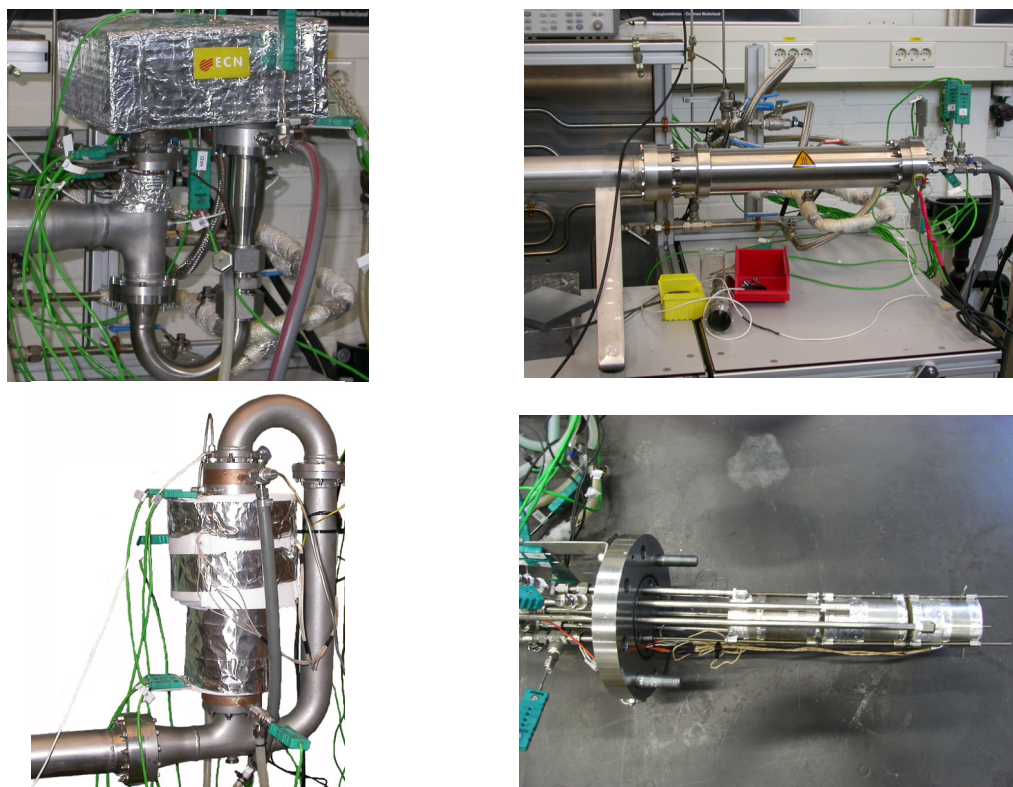
Met betrekking tot de regenerator zijn alternatieve regeneratormaterialen en geometrieën onderzocht. In dit project zijn drie verschillende regeneratormaterialen (metalen honinggraat, keramieken honinggraat, roestvrijstaal gazen), zie Figuur 3.2, onderzocht door het effect van het materiaal op de prestaties van een motor te meten. Uiteindelijk blijken voor de toegepaste configuratie de beste resultaten worden bereikt met de standaard roestvrijstaal gazen. Het type gas dat de beste prestaties geeft, hangt af van het toegepaste gas, werkdruk en de werkfrequentie. Daarom zijn de resultaten uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen de geometrische kenmerken van het gas en thermische eigenschappen van het gas. Hieruit volgt een optimale verhouding die kan worden toegepast bij willekeurige condities.



Figuur 3.2 Een tweetal onderzocht regeneratormaterialen, metaalgazen(links) en een keramieken honinggraat (rechts)

Op het gebied van thermo-akoestische motoren zijn diverse configuraties en tevens het toepassen van meertrapsmotoren onderzocht, zie Figuur 3.3. Meertrapsmotoren zijn nodig voor de aandrijving bij lage temperatuur. Het ontwerp linksonder in Figuur 3.3, bereikte een recordrendement van 49% van het maximaal haalbare Carnotrendement bij een aandrijftemperatuur van 600°C. Dit is wereldwijd het hoogste rendement dat ooit is gemeten voor een thermo-akoestische motor. Dit rendement ligt ruim boven de projectdoelstelling van 30% van het Carnotrendement. Dit rendement is helaas niet gehaald met de meertrapsmotor. Wel blijkt uit de resultaten dat het temperatuurverschil over de regenerator afneemt indien er meerdere trappen worden toegepast en dat dit principe dus bruikbaar is om aandrijving met restwarmte te realiseren. Het rendement in het huidige meertrapssysteem neemt echter af met het toevoegen van meer trappen door oplopende verliezen. Er dient hier een andere akoestische configuratie te worden ontworpen om tot de beoogde rendement te komen.

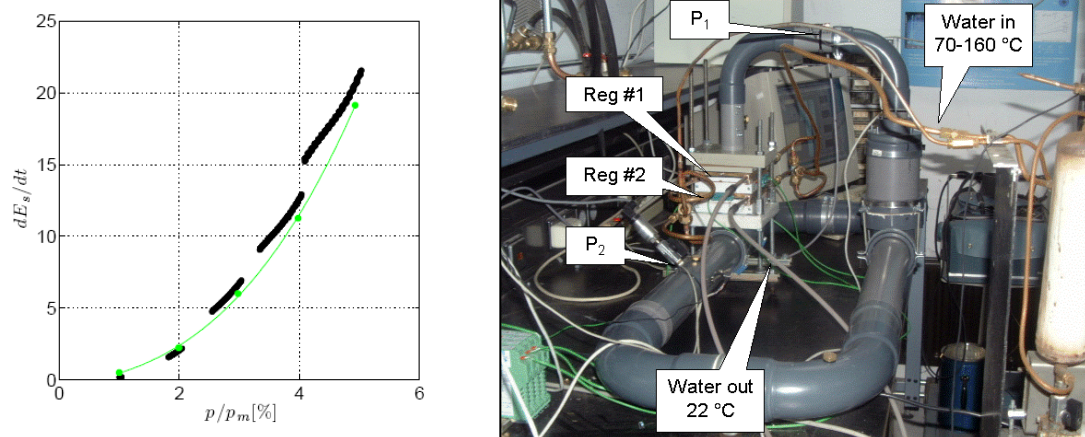
In het project is hiermee een begin gemaakt en is gewerkt aan een nieuwe hybride lopende golf resonator waarmee meer akoestisch vermogen kan worden getransporteerd bij gelijkblijvende verliezen. Het werk aan de hybride resonator, waarbij overal in de resonator nagenoeg lopende golf condities optreden, heeft aangetoond dat er met dit concept hoge vermogensdichtheden kunnen worden gehaald. Een additioneel voordeel van dit concept is dat relatief eenvoudig meerdere regeneratorunits achter elkaar kunnen worden geplaatst omdat in een groot gedeelte de juiste akoestische impedantie (timing) aanwezig is. De laagst gemeten aandrijftemperatuur voor deze configuratie is 80°C, hetgeen aandrijving met restwarmte mogelijk maakt.



Figuur 3.3 Onderzochte motorconfiguraties, torusontwerp met externe heater (linksboven), coaxiaal ontwerp (rechtsboven), torusontwerp met interne heater (linksonder) en een meertrapsmotor met coaxiaal ontwerp (rechtsonder)

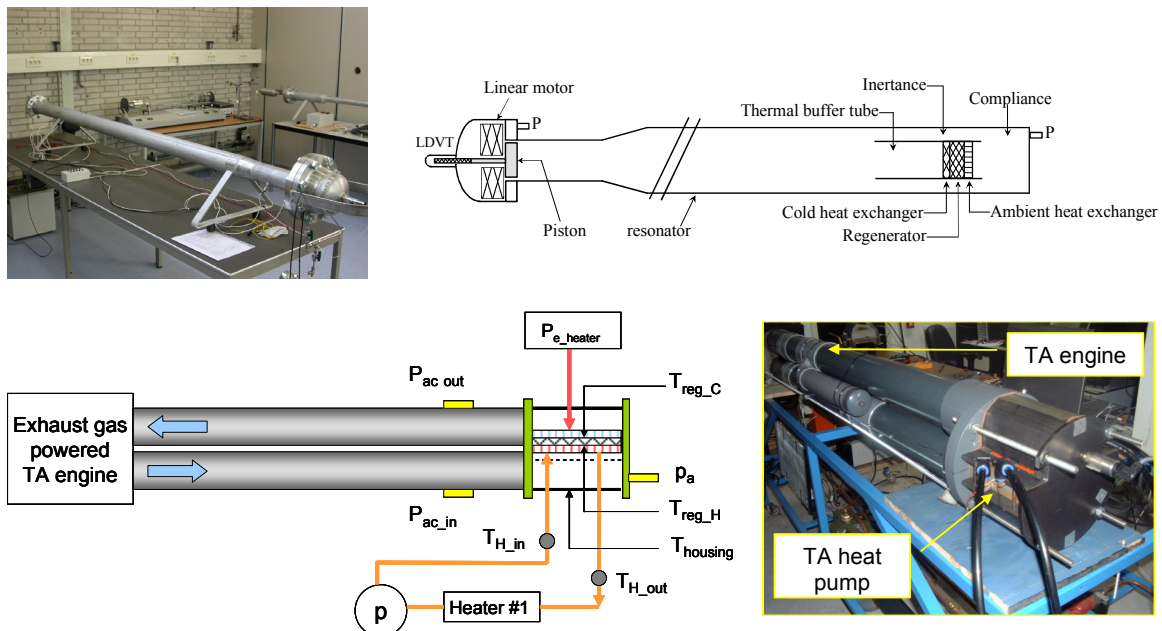
Het onderzoek aan de resonator was gericht op het minimaliseren van de stromingsverliezen in de resonator. Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) is berekend wat de akoestische verliezen zijn voor verschillende resonatorvormen.. Figuur 3.4 toont twee resultaten uit dit onderzoek. Met betrekking tot de CFD berekeningen kan worden geconcludeerd dat dit gereed-

schap kan worden toegepast om op nauwkeurige wijze de akoestische verliezen in een resonator te berekenen.



Figuur 3.4 Resultaten van het resonatoronderzoek, links vergelijking van CFD-berekeningsresultaten (zwart) van akoestische verliezen met meetresultaten (groen), rechts een opstelling van een hybride lopende golf resonator

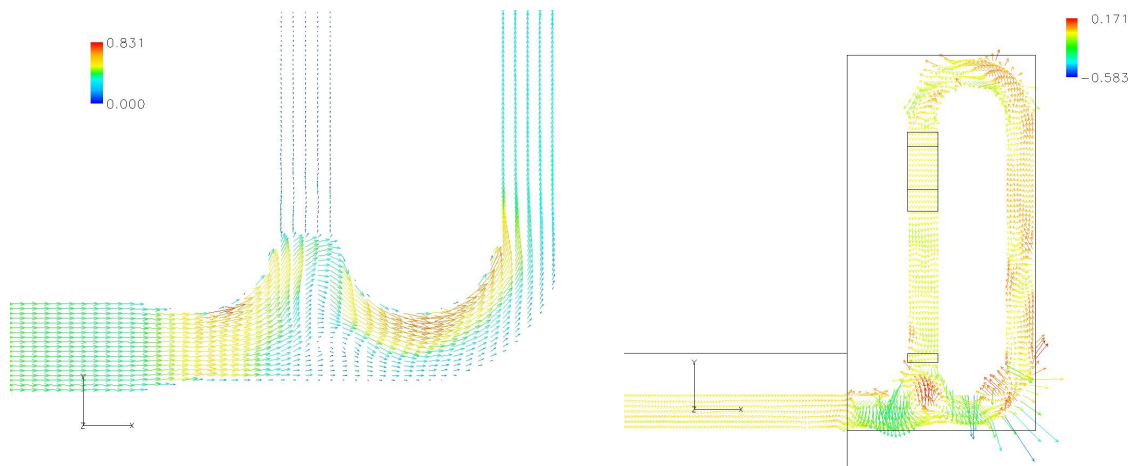
Met behulp van een tweetal opstellingen zijn prestatiemetingen uitgevoerd aan de warmtepomp, zie Figuur 3.5. De eerste opstelling is een koeler voor lage temperaturen (minimum -54°C), de tweede opstelling is een warmtepomp voor verwarmingsdoeleinden (100°C). Rendementen van beide opstellingen liggen in de orde van 25% van het maximaal haalbare Carnotrendement. Met een verbeterde akoestische configuratie, betere thermische isolatie en betere warmtewisselaars moet dit rendement te verhogen zijn boven de 40% van Carnot, gegeven het feit dat er een intrinsiek rendement van 45% van Carnot is gemeten.



Figuur 3.5 Twee opstellingen voor metingen aan thermo-akoestische warmtepompen, een lineaire motor gedreven koeler (boven) en een brandermotor gedreven warmtepomp (onder)

Met behulp van CFD modellering is getracht inzicht te verwerven in tijdsgemiddelde stromingsverschijnselen die optreden in een thermo-akoestisch systeem naast de oscillerende stromingen. Aangezien CFD een volledige, niet-lineaire, driedimensionale beschrijving geeft van

het systeem, is dit een welkome aanvulling op de ééndimensionale, lineaire ontwerptools die normaal gesproken worden gebruikt. Figuur 3.6 geeft een voorbeeld van een resultaat uit de CFD berekeningen. Hierin zijn snelheidsvelden te zien rondom een motor. Deze analyses geven inzicht in de locatie van stromingsverliezen en tot de identificatie van verbetermogelijkheden.



Figuur 3.6 *Tijds gemiddelde snelheidsvelden rondom een thermo-akoestische motor*

Naast dit componentonderzoek is onderzoek uitgevoerd aan systeemaspecten.

Schalingsexperimenten zijn uitgevoerd om de toepassing van dimensieloze kentallen te onderzoeken op bruikbaarheid. De resultaten hebben laten zien dat de theoretisch verwachte verhouding tussen de vermogens van twee verschillende systemen experimenteel inderdaad wordt gevonden. Dat betekent dat de dimensieloze kentallen die hiervoor worden gebruikt, toepasbaar zijn voor de opschaling van TA-systemen.

Binnen dit project is een integraal systeem getest, bestaande uit een tweetraps motor gekoppeld aan koeler. Het systeem functioneerde in kwalitatieve zin echter zoals dit was voorspeld. De discrepantie tussen modelberekeningen en meetresultaten zijn terug te voeren op een aantal fenomenen die niet worden gemodelleerd in de toegepaste simulatietools. Deze tools dienen op dit punt te worden verbeterd.

Marktpotentie TA-systemen

Een TA-systeem kent vele mogelijke toepassingen in de industrie, tuinbouw en gebouwde omgeving. In potentie kan een dergelijk systeem restwarmte van diverse temperaturen omzetten in warmte van een hogere temperatuur, koude en elektriciteit. Het maken van elektriciteit is mogelijk door het koppelen van de TA motor aan een lineaire generator. Deze zet het akoestische vermogen om in elektriciteit.

Als rendementen voor de TA motor en de TA warmtepomp is 40% respectievelijk 50% van het Carnotrendement gebruikt in deze analyse.

Op basis van de energieprijzen voor elektriciteit en aardgas in 2008 voor de sectoren: glastuinbouw, woningen en industrie en de best beschikbare technieken voor de productie van warmte, koude en elektriciteit is de investeringsruimte bepaald voor de diverse TA-configuraties. De beste beschikbare technieken zijn: gasturbine, gasmotor, absorptiekoelmachine en Organic Rankine Cycle (ORC). Er zijn twee extra varianten doorgerekend met een energieprijzen van 150% respectievelijk 200% van de huidige waarde.

Op basis van de systeemrendementen en investeringskentallen van de best beschikbare technieken is de investeringsruimte bepaald van vele mogelijke TA configuraties. Deze investerings-

ruimte is vergeleken met de verwachte toekomstige kostprijs van de TA systemen: circa € 250 tot € 350 per kW_{th}.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de begrote investeringsruimte per configuratie. De getallen in de tabel geven de investeringsruimte per toepassing in €/kW_{th}. Is deze ruimte groter dan de geschatte kosten van een TA-systeem, dan is er dus een economisch potentieel. Dit is tevens met kleuren aangegeven. Hoe groener het vakje, hoe groter het economisch voordeel.

configuratie	energieprijsindex	investeringsruimte TA-systeem [€/kW _{th}]		
		100%	150%	200%
gasturbine afgassenketel stoom industrie		362	434	505
gasmotor WKK tuinbouw		75	0	0
gasmotor WKK utiliteit HT		307	209	111
gasmotor WKK utiliteit LT		460	279	148
gasmotor WKK koude		129	28	0
gasmotor WKK lineaire motor		512	838	1.163
restwarmte industrie stoom 150°C		224	269	313
restwarmte industrie stoom 200°C		254	304	354
restwarmte warmtetransformator 180°C		508	609	709
restwarmte industrie 180°C lineaire motor		415	629	844

De configuraties met het grootste potentieel zijn:

- De gasmotor WKK met lineaire generator. De basis is een gasmotor WKK die elektriciteit levert en warmte van circa 80°C. In de TA configuratie staan de hete rookgassen de warmte af aan de TA-motor waarna de warmte nuttig wordt gebruikt. De temperatuur van de koeling van de TA-motor is zodanig dat deze restwarmte nuttig kan worden gebruikt.
- De restwarmtetransformator. Dit is een configuratie waarbij een deel van de industriële restwarmte wordt gebruikt voor de aandrijving van de TA-motor. Het andere deel van de restwarmtestroom wordt gebruikt als warmtebron van de TA-warmtepomp, waardoor de warmte op een hogere temperatuur (boven de pinch) weer beschikbaar komt voor nuttige toepassing in industriële processen.
- De restwarmte aangedreven lineaire generator. Deze configuratie zet warmte van 180°C (als voorbeeld) om in restwarmte van lagere temperatuur en elektriciteit. De concurrerende techniek is hier de ORC. In vergelijking tot de ORC kent de TA motor en met lineaire generator een iets lager conversierendement. De voordelen van compactheid, geen bewegende delen en de lagere verwachte investering maken deze configuratie interessant.

4. Bijdrage aan EOS-LT programmadoelstellingen

Duurzame energiehuishouding

Een belangrijke doelstelling binnen het speerpunt ‘Warmtehuishouding in de industrie en glastuinbouw’ van het EOS-LT programma is het ontwikkelen van kosteneffectieve technologieën die de technische opwaardering van industriële restwarmte mogelijk maken.

Binnen dit project is aangetoond dat thermo-akoestische systemen kunnen worden aangedreven met relatief laagwaardige warmte en dat aan de warmtepompzijde grote temperatuurliften mogelijk zijn. Deze systemen kunnen dus een doorbraak betekenen in het hergebruik van industriële restwarmte. De systemen zijn goed schaalbaar en zijn zeer flexibel in te zetten in een breed temperatuurgebied.

Belangrijkste voorwaarden voor het realiseren van deze doorbraak worden gegeven door de combinatie van technische prestaties en kosten. Binnen dit project is ook gekeken naar de mogelijke toepassingen en het economische perspectief daarvan. Hierbij zijn de huidige investeringsuitgangspunten, de concrete locatieomstandigheden en de thans geformuleerde, en deels ook gehaalde, prestatie-eisen voor de TA-systemen gehanteerd. Het blijkt dat er voor de TA-restwarmtetransformator en mogelijke omzetting naar elektriciteit op korte termijn economisch interessante besparingsopties liggen.

Op basis van het restwarmteaanbod kan een inschatting worden gemaakt van het energiebesparingpotentieel in de Nederlandse industrie. De hoeveelheid restwarmte boven de 130°C wordt geschat op circa 100 PJ per jaar. Indien de warmtepompen de beoogde specificaties halen, is het mogelijk om 30% van deze restwarmte om te zetten in nuttige warmte. De energiebesparing komt daarmee uit op 30 PJ/jaar in de Nederlandse industrie. Hierbij moet worden opgemerkt dat de hier genoemde besparingcijfers conservatief zijn geschat. Het werkelijke restwarmteaanbod is groter dan hier aangenomen. Immers, het totale warmtegebruik van de industrie zal als restwarmte in de omgeving terechtkomen. De hier gegeven energiebesparing leidt tot een emissiereductie van CO₂ van meer dan 1,5 Mton per jaar (uitgaande van aardgas).

Groot voordeel van TA systemen is de eenvoud in de uitvoering van de systemen. Het ontbreken van bewegende delen in het primaire proces en de opbouw vanuit commercieel beschikbare materialen en componenten biedt de mogelijkheid een zeer kosteneffectief systeem te ontwikkelen.

Kennispositie

Op meerdere onderwerpen binnen dit project zijn grote stappen voorwaarts gemaakt, die ook internationaal tot de verbeelding spreken. Hieronder worden een aantal verworvenheden nader uitgewerkt.

Veel onderzoeksgroepen wereldwijd worstelen met het probleem om akoestisch vermogen nauwkeurig te meten. Het spreekt voor zich dat het ontbreken van een dergelijke meting geen inzicht geeft in de bereikte prestaties. Binnen dit project is een zorgvuldige verificatie van gebruikte methodes uitgevoerd en is een nieuwe sensor ontwikkeld die puntmetingen mogelijk maakt.

Binnen dit project zijn nieuwe regeneratormaterialen getest, die nog niet eerder zijn toegepast. Helaas boden deze materialen in de toegepaste configuratie geen betere prestaties dan de conventionele gaasachtige materialen.

Op het gebied van TA motoren is een wereldrecord gevestigd qua efficiency. Het oude record stond sinds 2000 met 41% van Carnot op naam van Los Alamos National Laboratories. Binnen dit project is dit verbeterd naar 49% van Carnot.

Het gebruik van CFD modellering als ontwerpinstrument is geen gemeengoed binnen de TA onderzoekswereld. Voor zover bekend wordt alleen in China, naar aanleiding van een eerdere Nederlandse publicatie, hiermee gewerkt. Dit project heeft veelbelovende resultaten opgeleverd ten aanzien van het gebruik van CFD, met name ten aanzien van de validatie van de resultaten. Voor het modelleren van niet-lineaire effecten en meerdimensionale effecten zal CFD een belangrijk hulpmiddel worden.

In plaats van een conventionele staande golf resonator met een lokale loop om de juiste akoestische condities te creëren, is een hybride resonator ontwikkeld die overal in de resonator de juiste akoestische condities geeft en hoge transportdichtheden. Dit concept is nog niet eerder vertoond en biedt uitzicht op het effectief kunnen inzetten van meerdere trappen waardoor de werkteemperatuur verder wordt verlaagd en het aantal potentiële (lage temperatuur restwarmte) toepassingen sterk toeneemt.

Op het gebied van de warmtepomp zijn rendementen gemeten die wereldwijd niet eerder zijn gepubliceerd. Deze metingen zijn verricht aan een ongunstige configuratie, zodat er zelfs nog hogere prestaties worden verwacht.

Samengevat kan worden gesteld dat de resultaten van dit project internationaal gezien aan de top staan.

Dit project betekent een belangrijke stap voorwaarts waar het gaat om het aantonen van haalbare rendementen en het binnen bereik brengen van de beoogde toepassingen. Belangrijk is nu dat er kennis wordt opgebouwd betreffende de maakbaarheid van deze systemen en de toe te passen productietechnologieën. Continuïteit van het onderzoek is belangrijk voor het vasthouden van de voorsprong die er is ten aanzien van de technologische positie in combinatie met de toepassing. Er moet worden voorkomen dat de vruchten van de initiatieven die in Nederland zijn ontplooid, uiteindelijk in het buitenland worden geplukt. De ambitie is om als (wereldwijde) hoofdrolspeler te acteren op de combinatie van TA technologie en de beoogde toepassing.

Spin off mogelijkheden

Naast de al genoemde toepassingen kan worden gedacht aan een groot aantal product/markt combinaties. Voor de aandrijving wordt onderscheid gemaakt tussen lage temperatuur (restwarmte, zonnewarmte), hoge temperatuur (brander, elektrische heater) en een lineaire motor. De producten bestaan uit warmte, koude en elektriciteit, al dan niet gecombineerd. Met warmte/warmte wordt de warmteproductie op twee verschillende temperatuurniveaus bedoeld.

Enkele concrete voorbeelden vanuit deze matrix zijn:

- Koeling op basis van restwarmte van een verbrandingsmotor in de vervoerssector.
- Comfortverwarming in kantoren en woningbouw op basis van een brandergedreven systeem waarbij bodemwarmte wordt opgepompt.
- Simultane warmte en koude productie in de voedings- en genotmiddelenindustrie.
- Warmte-kracht eenheden op diverse schaalgroottes (huishouden, kantoor, utiliteit, industrie).
- Zongedreven airco-systemen voor kantoren.

Deze toepassingen liggen wellicht later in de tijd, na een succesvolle ontwikkeling van de twee geïdentificeerde, kortere termijn, toepassingen.

5. Openbare publicaties

Delen van het uitgevoerde onderzoek binnen dit project zijn gepubliceerd en gepresenteerd en zijn derhalve openbaar gemaakt. Onderstaande lijst geeft deze openbare stukken weer.

Conferentiebijdragen

- Tijani, M.E.H., *Study of a thermoacoustic-Stirling cooler*, International Congress on Ultrasonics, 2007
- Zeegers, J., E. Moers, H. van den Bogaart, *Geometry effects and scaling in thermoacoustics* Acoustics '08 conferentie.
- Blok, C.M. de, *Low operating temperature integral thermoacoustic devices for solar cooling and waste heat recovery*, Acoustics '08 conferentie
- Tijani, M.E.H., G.A. Poignand, S. Spoelstra, *Study of a thermoacoustic-Stirling engine* Acoustics '08 conferentie.

Refereed tijdschrift

- Tijani, M.E.H., S. Spoelstra, *Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler*, Cryogenics, vol 48, pp 77-82, 2008

Publicaties in populaire bladen

- Technisch Weekblad, *Weggegooide warmte wordt bruikbaar*, maart 2008.
- Spoelstra, S., R. de Boer: *Unieke warmtepompen in ontwikkeling bij ECN*, verschenen in Verwarming Ventilatie Plus, Mei 2008.

Persbericht

- In december 2008 is door ECN, naar aanleiding van het behalen van een efficiency wereld-record voor een TA motor, een persbericht verstuurd. Dit persbericht is zowel nationaal als later ook internationaal verspreid.