

# Openbare eindrapportage Thermo-Akoestische WarmtePomp

**EETK20017**

**S. Spoelstra (ECN)**

**C.M. de Blok (Aster)**

**J.T.G. Berendsen (Huisman ETE)**

**G.G.M. Stoffels (UT)**

Revisie		
A	4 mei 2005; concept versie voor interne review	
0	17 mei 2005; concept versie voor externe review	
1	14 juni 2005; definitieve versie	
Gemaakt door:	Goedgekeurd door:	ECN Energie Efficiency in de Industrie  Industriële Restwarmtebenutting
S. Spoelstra	P.W. Bach	
Gecontroleerd door:	Uitgegeven door:	
W.G. Haije	P.T. Alderliesten	

## Verantwoording

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Programma EET (Economie, Ecologie en Technologie) een gezamenlijk initiatief van de Ministeries van Economische Zaken, Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen en Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Volkshuisvesting. Het project staat bij EET bekend onder het projectnummer EETK20017/398710-0610.

# economieecologietechnologie

## Uitvoering

Het EET-project is gestart per 1 januari 2001 met 4 partners, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) als penvoerder en Elektrotechniek Elden (ETE), Stork Screens en Universiteit Twente (UT) als overige partners. Belangrijke subcontractant van ECN is Aster. Per 1 april 2002 beëindigde Stork Screens de samenwerking binnen dit project. Reden hiervoor was het besluit van Stork om te stoppen met alle activiteiten op het gebied van metaalschuimen. De overblijvende partners hebben besloten geen vervangende partner te zoeken. Op 24 september 2003 is het faillissement uitgesproken van ETE. Vervolgens heeft Huisman Elektrotechniek het bedrijf ETE overgenomen, alsmede de werkzaamheden van ETE binnen dit project. Op 31 maart 2005 werd het project beëindigd, 1¾ jaar later dan de oorspronkelijke voorziene einddatum.

De totale projectomvang bedroeg € 1.318.727, waarvan € 824.205 door EET als subsidie is toegekend.



Dit rapport vormt de enige openbare rapportage van dit project en is te downloaden vanaf de ECN-website: [www.ecn.nl/library/reports/index.html](http://www.ecn.nl/library/reports/index.html).

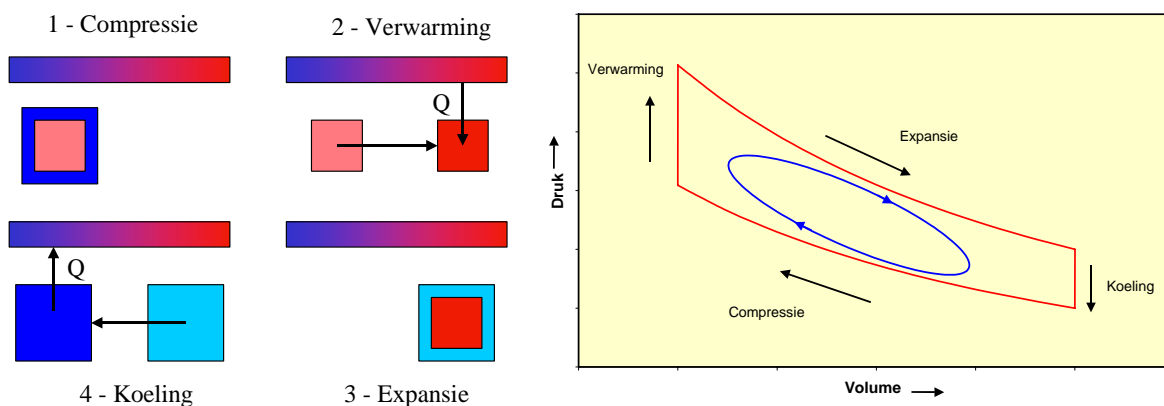
## Samenvatting

Dit rapport betreft de resultaten van het EET-project 'Thermo-akoestische warmtepomp' (1/1/2001-31-3/2005) dat gericht is op het ontwikkelen van een systeem dat in staat moet zijn om industriële restwarmte voor een deel weer nuttig in te zetten binnen de industrie.

Deze ontwikkeling is gestart vanuit de overweging dat er in Nederland een grote hoeveelheid industriële restwarmte in de omgeving wordt geloosd die na opwaardering weer gedeeltelijk inzetbaar kan zijn. De geïdentificeerde industriële restwarmte in Nederland bedraagt minimaal 100 PJ per jaar boven de 50°C. Deze warmte wordt geloosd omdat het temperatuurniveau niet geschikt is voor verdere toepassing. In de hier beschreven ontwikkeling is voor een oplossing gekozen waarin deze restwarmte wordt opgewaardeerd tot hogere temperaturen (middendrukstoom) of koeling. Einddoel van deze ontwikkeling is een systeem met een unitgrootte van 1 MW restwarmte.

Voor het opwaarderen van restwarmte is een warmtepomp nodig die een temperatuurlift kan genereren van 50-100°C. Een thermo-akoestische (TA) warmtepomp is hier in principe toe in staat. Om een TA-warmtepomp aan te drijven is een krachtige akoestische golf nodig. De benodigde akoestische energie vanuit een motor is in principe op een aantal manieren op te wekken. Binnen dit project is geconcentreerd op TA-motoren die een restwarmtebron gebruiken om de akoestische golf te genereren. Hierbij moet worden gedacht aan restwarmtetemperaturen van minimaal 120°C. Daarnaast is beperkt aandacht besteed aan een brandergedreven systeem om de akoestische golf op te wekken.

Thermo-akoestiek heeft betrekking op het fysische verschijnsel dat een temperatuurverschil een akoestische golf kan versterken. Omgekeerd kan een akoestische golf een temperatuurverschil creëren. Daartoe wordt de akoestische golf in interactie gebracht met een vast materiaal met een veel hogere warmtecapaciteit dan het medium waar zich de akoestische golf doorheen beweegt. Dit materiaal fungeert als een soort warmtebuffer (regenerator). Indien over deze regenerator een temperatuurverschil wordt aangebracht en een geluidsgolf deze regenerator passeert van de koude naar de warme kant, dan zal een pakketje gas in deze regenerator eerst worden gecomprimeerd, dan verplaatst naar de warme kant van de regenerator, vervolgens worden geëxpandeerd en tenslotte weer naar de koude kant worden verplaatst. Onderstaande figuur visualiseert dit proces. Na verplaatsing naar rechts zal het pakketje gas een warmer gedeelte van de regenerator zien en daarom warmte opnemen (stap 2). Het omgekeerde gebeurt in stap 4.

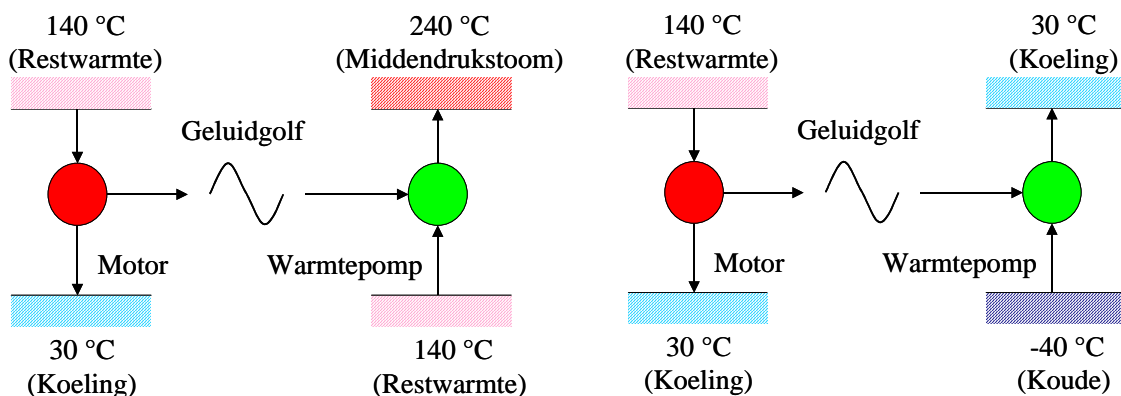


*Thermo-akoestische cyclus*

Gedurende deze cyclus wordt het gas dus bij een lage temperatuur gecomprimeerd en bij een hoge temperatuur geëxpandeerd. Dit betekent dat arbeid wordt verricht op het gas. Meer

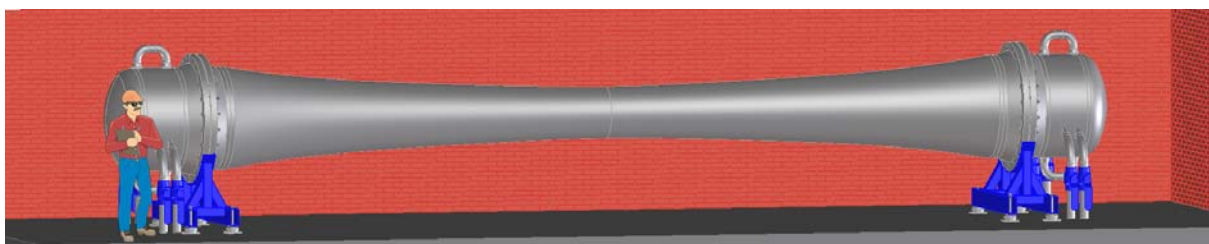
specifiek gezegd wordt de drukamplitude en daarmee de (mechanische) energie van de geluidsgolf groter. De cyclus die het gaspakketje doorloopt vertoont sterke overeenkomsten met een Stirlingcyclus. Op deze manier is het mogelijk om met een temperatuurverschil een geluidsgolf te versterken. Binnen de thermo-akoestiek wordt gesproken over een TA-motor indien een akoestische golf wordt opgewekt door een temperatuurverschil. Indien de thermodynamische cyclus in omgekeerde volgorde wordt doorlopen, wordt de akoestische energie omgezet in een temperatuurverschil en is er sprake van een TA-warmtepomp, die warmte oppompt van een laag naar een hoog temperatuurniveau.

Bij het opwaarderen van restwarmte wordt het temperatuurverschil tussen de restwarmte en de omgevingstemperatuur gebruikt om akoestisch vermogen te genereren. Vanwege de relatief lage aandrijftemperatuur is het temperatuurverschil over de regenerator kleiner dan gebruikelijk (enkele honderden °C) bij TA-motoren. Hierdoor vindt maar een kleine versterking van de akoestische golf plaats. Om nu toch de benodigde versterking te krijgen worden meerdere regeneratorunits in serie geschakeld, zodat de akoestische golf voldoende wordt versterkt bij een lage aandrijftemperatuur. Het akoestisch vermogen wordt vervolgens gebruikt om warmte van de ene naar de andere warmtewisselaar op te pompen in de TA-warmtepomp. Het resultaat is een groot temperatuurverschil tussen beide warmtewisselaars. Restwarmte wordt aan de koude kant via een warmtewisselaar aangeboden. Opgewaardeerde warmte wordt aan de hoge temperatuurkant via een andere warmtewisselaar weer afgevoerd. De opgewaardeerde warmte is van een dusdanig temperatuurniveau dat deze ter plekke weer kan worden ingezet voor bijvoorbeeld de opwekking van middendrukstoom. Naast opwaardering naar middendrukstoom is het ook mogelijk om koude te produceren in de TA-warmtepomp door de temperatuurlift naar beneden te realiseren ten opzichte van omgevingstemperatuur (koeling). Ook dan is er sprake van een kwaliteitsverbetering van de restwarmte. Beide opwaardeeropties op basis van een restwarmte aangedreven TA-motor staan hieronder schematisch weergegeven.



*Schematische weergave van opwaarderen van restwarmte op basis van een restwarmte gedreven TA-motor voor de productie van middendrukstoom (links) en koude (rechts)*

De uiteindelijke realisatie van een 1 MW systeem is hieronder weergegeven. In de eindstukken links en rechts zijn de motor en warmtepomp respectievelijk ondergebracht. Beide onderdelen zijn gekoppeld met een resonator. Het weergegeven systeem heeft een lengte van circa 12 meter en een diameter van de eindstukken van circa 1,5 meter.



*Conceptueel ontwerp 1 MW thermo-akoestisch systeem voor het opwaarderen van restwarmte*

Het onderzoek is in grote lijnen verdeeld in component- en systeemonderzoek. Het componentonderzoek is gericht op de belangrijkste componenten van het systeem terwijl het systeemonderzoek vooral de prestaties van een thermo-akoestische motor en warmtepomp onderzocht. De verschillende onderdelen komen hierna successievelijk aan bod, gevolgd door de algemene conclusies.

## **Componentonderzoek**

### *Regenerator*

Experimenteel en modelmatig onderzoek is verricht aan de drukval en warmteoverdracht van toegepaste nikkelschuimen voor de regenerator. Hierbij is gekeken naar het effect van porositeit, celgrootte, werkmedium en –druk op de drukval en warmteoverdracht. Uit dit onderzoek blijkt dat het verlagen van de porositeit en het verkleinen van de celgrootte tot betere prestaties leiden. Ook het toepassen van helium als werkmedium en een hoge gemiddelde druk is gunstig. Deze resultaten zijn met name afgeleid voor stationaire stroming en dienen nog te worden geverifieerd onder oscillerende stromingscondities.

Streaming is een verzamelnaam voor ongewenste convectiestromen die rond een regeneratorunit plaatsvinden en een negatief effect hebben op de prestaties. Door middel van experimenteel onderzoek is nagegaan hoe deze stromingen effectief kunnen worden onderdrukt. De conclusie uit dit streamingsonderzoek is dat de zogenoemde ‘Gedeon streaming’ (een continue rondgaande stroming) het eenvoudigst wordt onderdrukt door gebruik te maken van een akoestisch membraan en dat het noodzakelijk is de ruimte voor de heater (of warme warmtewisselaar) van een schuimstructuur te voorzien om ongewenst warmtetransport te voorkomen. Aanvullend onderzoek naar de levensduur van een akoestisch membraan, zeker onder hoge temperatuur condities, is noodzakelijk.

De levensduur van TA-systemen zou door de cyclische belasting van de metaalschuimen en constructieonderdelen kunnen worden beperkt. Het vermoeiingsgedrag van de metaalschuimen voor de specifieke condities in een TA-systeem is experimenteel onderzocht. Uit deze experimenten is de vermoeiingsgrens van nikkelschuim vastgesteld. De conclusie uit dit onderzoek is dat met een goed ontworpen ondersteuning vermoeiing geen issue zal zijn.

### *Warmtewisselaars*

De warmtewisselaars in het systeem spelen een essentiële rol in de prestaties van het systeem. Met name bij restwarmtetoepassingen dient het temperatuurverlies te worden geminimaliseerd. Gewerkt is aan een tweetal typen warmtewisselaars. Enerzijds is een warmtewisselaar ontwikkeld op basis van koperschuim voor de gaszijde en koperen buisjes voor de vloeistofzijde. Daarnaast is een roestvrijstalen warmtewisselaar ontwikkeld op basis van microkanalen voor de vloeistofzijde en vinnen voor de gaszijde. Beide warmtewisselaars zijn experimenteel getest onder stationaire stromingscondities. De koperen variant heeft een warmteoverdracht van  $1900 \text{ W/m}^2\text{K}$ . De roestvrijstalen variant komt onder vergelijkbare condities tot  $3800 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Beide warmtewisselaars kunnen nog verder worden geoptimaliseerd. Belangrijk is dat de resultaten worden geverifieerd onder realistische thermo-akoestische condities.

Teneinde na te gaan of een 1 MW systeem voldoende inbouwruimte biedt om de gewenste vermogens uit te wisselen is een studie verricht op basis van diverse warmteoverdrachtsmodellen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat, op basis van de gehanteerde modellen en de daaraan ten grondslag liggende aannames, er geen onoverkomelijke problemen worden verwacht bij opschaling van dit systeem naar 1 MW. Voorwaarde is wel dat er gebruik wordt gemaakt van verdampende en condenserende media voor de warmte- en uitkoppeling.

### *Brander*

Voor de brandergedreven versie van de thermo-akoestische warmtepomp wordt via een brander warmte toegevoerd die wordt omgezet in akoestische energie. Binnen dit project is experimenteel onderzoek gedaan naar een TA-motor, waarbij gebruik wordt gemaakt van (warmte) straling als warmteoverdrachtsmechanisme. Als stralingsbron wordt een gasgestookte buisbrander gebruikt. Op basis van een, gepatenteerde, multi-segment regenerator is het inderdaad mogelijk met dit concept een TA-motor te bedienen. Een punt van zorg is het warmteverlies, dus dat deel van het toegevoerde vermogen dat niet deelneemt aan het omzettingsproces. Een ander punt is dat ook de rookgassen, die het systeem verlaten, een hoge temperatuur hebben en het branderrendement daarom totnogtoe beperkt is.

### *Resonator*

De resonator koppelt de verschillende componenten, zoals de TA-motor en de TA-warmtepomp aan elkaar. Van belang is dat de resonator zo min mogelijk verliezen veroorzaakt en dat er dus maximaal akoestisch vermogen tussen genoemde componenten wordt getransporteerd. Binnen dit project is vooral gekeken naar een dubbele Helmholtz resonator, bestaande uit twee buffervolumes gekoppeld via een nek. Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) zijn analyses uitgevoerd aan een viertal type resonatoren, waarbij de overgang van het buffervolume naar de nek steeds verschillend is. Deze berekeningen zijn vergeleken met experimentele resultaten aan vergelijkbare typen resonatoren. De overeenkomst tussen experiment en berekening is zeer goed te noemen. Op basis van deze resultaten is een resonator gekozen met de minste dissipatie, waarbij een afgeronde stap van buffervolume naar nek wordt toegepast.

### *Regeling*

Voor de regeling van een thermo-akoestisch systeem is een processchema opgesteld met de bijbehorende meetsignalen. Op basis van dit processchema is een regeling uitgewerkt en zijn de belangrijkste componenten uitgezocht. De regeling is vraaggestuurd, waarbij de vraag naar de opgewaardeerde warmte bepaalt hoe het systeem opereert. In totaal zijn een drietal schema's opgezet, namelijk voor opwaarderen restwarmte naar proceswarmte, voor een koeler en voor een CV-installatie.

### **Systeemonderzoek**

Het grootste deel van het systeemonderzoek heeft plaatsgevonden in de testinstallatie die hieronder is weergegeven. Hierin zijn zowel de TA-motor als TA-warmtepomp onderzocht.



*Testopstelling voor thermo-akoestische motor(rechts) en warmtepomp(links)*

### *Thermo-akoestische motor*

Veel inspanningen zijn gericht op de ontwikkeling van een restwarmte gedreven TA-motor. Het specifieke, en unieke, hieraan is dat het niet eenvoudig is een TA-motor aan te drijven met lage temperatuur warmte. Om dit mogelijk te maken is gebruik gemaakt van een motor met meerdere regeneratorunits. Op deze wijze wordt een grotere akoestische versterking en een grotere vermogenstoevoer verkregen bij lage aandrijftemperatuur. Het onderzoek heeft betrekking op de ontwikkeling van specifieke warmtewisselaars voor dit soort systemen, verschillende materialen als regenerator, de akoestische configuratie en methoden om de akoestische en thermische verliezen te reduceren. De prestaties van dit soort systemen wordt vastgesteld door het geproduceerde akoestische vermogen te vergelijken met het toegevoerde thermische vermogen.

De experimenten laten zien dat het inderdaad mogelijk is om op basis van een meertraps TA-motor een lage starttemperatuur in de orde van 110-120°C te verkrijgen. Dit is een belangrijk uitgangspunt voor verdere toepassingen in dit gebied. De prestatiemetingen zijn echter uitgevoerd bij een aanbodtemperatuur van 180°C om meer en dus beter te meten akoestisch vermogen op te wekken. Wanneer de prestaties van de TA-motor worden vergeleken met de doelstellingen dan blijkt dat het gecombineerde rendement van motor en resonator tot nog toe een factor 4 (maximale efficiency) tot meer dan 5 (maximaal vermogen) te laag uitvalt.

### *Thermo-akoestische warmtepomp*

Naast de TA-motor is ook een integraal systeem, inclusief TA-warmtepomp, getest waarbij de warmtepomp zowel in het hoge temperatuurgebied (restwarmte omhoog in temperatuur) als in het lage temperatuurgebied (koeling) is getest. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van akoestisch vermogen uit de motor is het niet mogelijk gebleken het systeem onder de gewenste condities te testen. Uit de uitgevoerde testen onder gelimiteerde condities blijkt dat resulterende rendementen voor het warmtepompdeel een factor 5 tot 7 liggen onder de gewenste waarde. Voor een groot deel is dit terug te voeren op het beperkte akoestische vermogen vanuit de motor, waardoor allerlei verliesmechanismen de boventoon gaan voeren.

## **Conclusies**

Bij de start van dit project zijn de volgende doelstellingen geformuleerd. Deze doelstellingen vormen de go/no go criteria voor de overgang naar een volgende ontwikkelingsfase. Conclusies zullen worden getrokken bij elk van de doelstellingen.

- Temperatuurlift van 100°C mogelijk in de warmtepomp.  
Dit is aangetoond onder onbelaste condities. Er zijn geen principiële beperkingen waargenomen die een dergelijke lift onder belaste condities in de weg staan.
- Thermisch rendement van restwarmte-aangedreven TAWP >25%.  
Met dit rendement wordt de verhouding bedoeld tussen de uiteindelijk beschikbare warmte op een hoger temperatuurniveau en de restwarmte die wordt gebruikt om de TA-motor aan te drijven. Vanwege het achterblijven van de prestaties van de individuele componenten is het totale systeemrendement niet vastgesteld onder de gewenste condities. Duidelijk is dat het systeem momenteel niet voldoet aan de beoogde prestaties. Er is nog wel voldoende ontwikkelingspotentieel om een thermisch rendement van 25% bij een lift van 50°C naar verwachting te kunnen halen.
- Coefficient Of Performance (COP) van brander-aangedreven TAWP >1,5.  
De COP waarde is de verhouding tussen de warmte die beschikbaar komt op middendrukstoomniveau en het brandervermogen. Deze doelstelling is niet gehaald. Het enige dat is aangetoond in het huidige project is dat het mogelijk is om met een brander een TA-motor aan te drijven. Een groot probleem vormen nog de warmteverliezen.
- Levensduur van 10 jaar aannemelijk.  
Levensduur lijkt geen issue te zijn. Vermoeiingsonderzoek aan de bij lage druk toegepaste metaalschuimen laten zien dat een ontwerp mogelijk is dat breuk door vermoeiing vermijdt. De bij hoge druk toegepaste metaalgazen zijn nog beter bestand tegen vermoeiing. Tijdens de vele draaiuren van de testopstellingen onder realistische condities zijn geen componenten bezweken aan de oscillerende belastingen van de akoestische golf.

- Opschaling mogelijk.  
Voor TA-systemen zijn schalingsregels beschikbaar. Met de beschikbare ontwerptools kan in principe iedere schaalgrootte worden ontworpen. Binnen dit project zijn de schalingsregels echter niet geverifieerd met behulp van experimenten. Wat betreft de warmteto- en afvoer zijn warmteoverdrachtsberekeningen uitgevoerd aan een 1 MW systeem. Mits gebruik wordt gemaakt van verdampende en condenserende warmteoverdracht lijkt het mogelijk om de gewenste hoeveelheid warmte binnen de beperkt beschikbare ruimte uit te wisselen.
- Systeemafmeting en geluidsdruk acceptabel voor eindgebruiker.  
De systeemafmetingen zijn uiteraard sterk afhankelijk van het rendement en de vermogensdichtheid van het systeem. Op basis van 1 MW ingekoppelde warmte en de beoogde rendementen kan een systeem worden gerealiseerd dat acceptabele afmetingen heeft op industriële schaal. De verwachte externe geluidsproductie ligt beneden de toelaatbare waarden voor een industriële omgeving.
- TAWP technisch en economisch haalbaar.  
Op basis van de huidige daadwerkelijk gemeten prestaties zijn de kosten voor warmte respectievelijk koeling uitgerekend en vergeleken met de huidige kosten. Vanwege de lage behaalde rendementen vallen de kosten hoger uit dan de gangbare kosten voor warmte en koude. Dezelfde berekening is gemaakt op basis van mogelijk haalbare rendementen voor de diverse componenten. Deze mogelijk haalbare rendementen zijn circa een factor 1,5 lager dan de oorspronkelijk beoogde rendementen en zijn gebaseerd op theoretische overwegingen omtrent de Stirling cyclus die wordt uitgevoerd en het feit dat in de VS reeds een motor met 40% van het Carnotrendement is gerealiseerd. Op basis van de mogelijk haalbare rendementen blijken de kosten van warmte en koude concurrerend te zijn ten opzichte van de huidige technologie (stoomketel en compressiekoeler).

De overall conclusie is dat de technische prestaties in dit stadium achter blijven bij de beoogde resultaten. Duidelijk is echter wel dat er een enorme progressie is geboekt gedurende de loop van dit project. Voor zowel de belaste als onbelaste toestand is er voor de motor een verbetering van een factor 100 in vermogen tot stand gebracht. Qua efficiency is een verbetering in de orde grootte van een factor 10 gerealiseerd voor de motor. Uit het onderzoek blijkt tevens dat er voldoende aanknopingspunten zijn voor verdere verbetering, zodat een systeem mogelijk wordt waarmee kosteneffectief restwarmte wordt opgevangen.

### **Trefwoorden**

Thermo-akoestische warmtepomp, thermo-akoestische motor, lopende golf, restwarmte, resonator, convectiestromen, warmtewisselaars, regenerator, vermoeiing, regeling, brander, techno-economische evaluatie, warmteproductie, koudeproductie

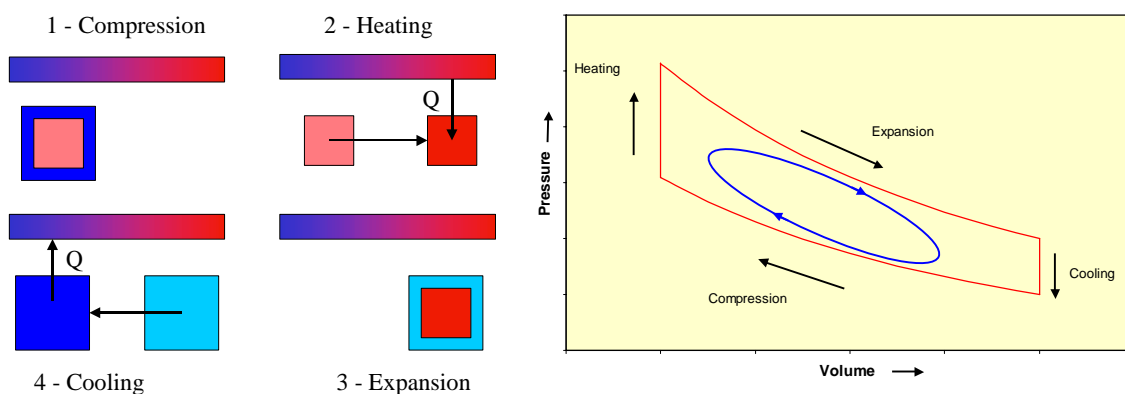
## Summary

This report contains the results of the EET-project “Thermo-akoestische warmtepomp” (1/1/2001-31-3-2005) that is aimed at the development of a system that is capable of upgrading part of the industrial waste heat to usable thermal energy.

This development has started from the consideration that large amounts of industrial waste heat are released to the environment, which could be reused partly if the waste heat is upgraded. The identified industrial waste heat within the Netherlands amounts to more than 100 PJ per year above 50°C. This heat is wasted since the temperature level is not suitable for further application. The technology development reported here involves a possible solution in which the waste heat is upgraded to process heat or cooling. The ultimate goal of this development is a system with a unit size of 1 MW waste heat.

A heat pump with a temperature lift of 50-100°C is necessary to upgrade industrial waste heat. A thermoacoustic (TA) heat pump is theoretically able to achieve this. A powerful acoustic wave is needed to drive such a heat pump. The required acoustic energy from an engine can be generated in several ways. This project has concentrated on TA-engines that convert waste heat into acoustic energy. The minimal required waste heat temperature for this is about 120°C. In addition, limited attention has been paid to a burner-driven TA-engine for the production of acoustic power.

Thermoacoustics relates to the physical phenomenon that a temperature difference can create and amplify a sound wave and vice versa that a sound wave is able to create a temperature difference. Hereto the sound wave is brought into interaction with a porous solid material with a much higher heat capacity compared to the gas through which the sound wave propagates. The solid material acts as a regenerator. When a temperature difference is applied across this regenerator and a sound wave passes this regenerator from the cold to the hot side, a (virtual) parcel of gas will be first compressed, than transported to the hot side of the regenerator, next expanded and finally transported back to its original location. The figure below visualises this process. After displacement to the right, the parcel of gas will take up heat from the regenerator (step 2). The reverse happens in step 4.

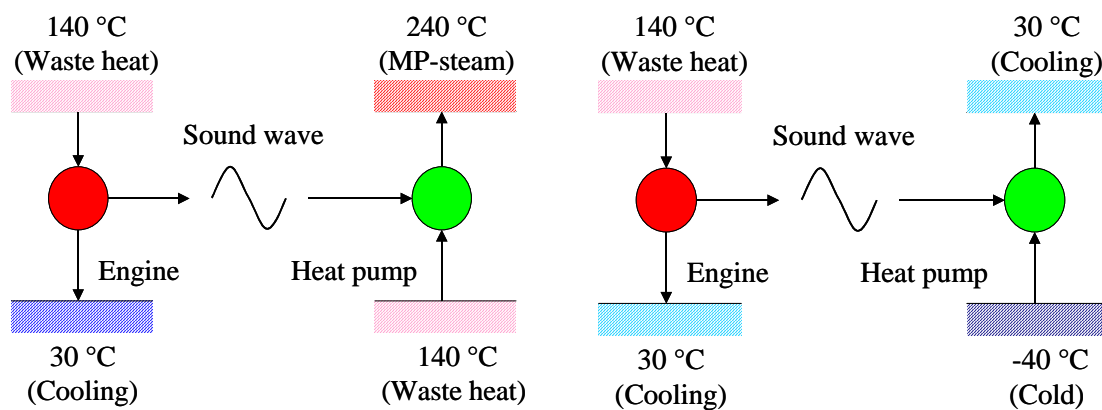


### *Thermoacoustic cycle*

During this cycle the gas is being compressed at low temperature, while expansion takes place at high temperature. This means that work is performed on the gas. The effect of this work is that the pressure amplitude of the sound wave is increased. The thermodynamic cycle just described resembles the well-known Stirling cycle. The acoustic wave has the function of both pistons normally present in a Stirling engine. In this way it is possible to create and amplify a

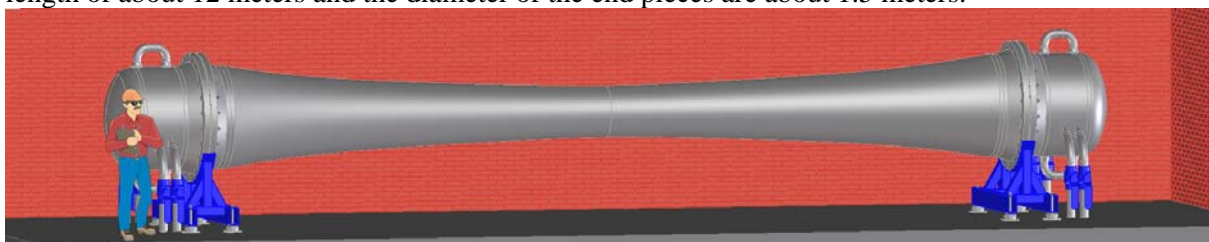
sound wave by a temperature difference. The thermal energy is converted into acoustic energy that can be regarded as a kind of mechanical energy. Within thermoacoustics this is referred to as a TA-engine. In a TA-heat pump, the thermodynamic cycle is run in the reverse way and heat is pumped from a low-temperature level to a high-temperature level.

For upgrading waste heat application, first the temperature difference between the waste heat and the ambient atmosphere is used to generate acoustic power. The temperature difference across the regenerator is smaller than usual (several hundreds °C), since the temperature level of the waste heat is relatively low. The acoustic wave experiences therefore only a small amplification. In order to get enough amplification at low differential temperatures, several regenerator units are placed in series. The acoustic power thus generated is used to drive a TA-heat pump. Waste heat is supplied to the low temperature side of this heat pump. This heat is pumped to a higher temperature level by the acoustic power. The upgraded waste heat becomes available at a temperature level that can be used at the site for instance for the production of medium pressure steam. Instead of producing heat it is also possible to produce cold with the TA-heat pump by creating a temperature lift downwards from the ambient temperature (cooling). Both options improve the quality of the waste heat. The picture below gives a schematic view of both options based on a waste heat-driven TA-engine.



*Schematic picture of upgrading waste heat based on a waste heat-driven TA-engine for the production of medium pressure steam (left) and cold (right)*

The picture below shows the realisation of a 1 MW system. The end pieces to the left and right contain the engine and heat pump respectively. A resonator couples both parts. The system has a length of about 12 meters and the diameter of the end pieces are about 1.5 meters.



*Conceptual design of a 1 MW thermoacoustic system for upgrading waste heat*

The research is globally divided into component and system research. The component research is directed towards the most important components of the system, while the system research focuses on the performance of the engine and heat pump. Both research parts will be discussed below successively, followed by the general conclusions.

## Component research

### *Regenerator*

Pressure drop and heat transfer of metal foams have been studied both experimentally and theoretically. The influence of porosity, pore size, working medium and working pressure on the pressure drop and heat transfer is investigated. Decreasing porosity and pore size lead to the better results. In addition, the use of helium and a high average pressure is beneficial for the performance of the regenerator. These results have especially been obtained for stationary flow and have to be verified under oscillatory flow conditions.

Streaming is a generic term describing unwanted convection flows around the regenerator unit that have a negative effect on the performance. Ways to suppress these flows are investigated experimentally. The conclusion of this research is that the so-called Gedeon-streaming (a continuous flow) can be most easily suppressed by using an acoustic membrane. In addition, it is necessary to suppress convection flows at the hot heat exchanger by means of some kind of porous structure. Additional research is needed for the life span of the membrane, especially at high temperature conditions.

The cyclic mechanical load on the metal foams or screens that are used as regenerator could hamper the life span of TA-systems. The fatigue behaviour of metal foams has been studied experimentally. The fatigue limit of metal foam has been determined from these experiments. A well designed support will prevent fatigue, so that life span of this component is not an issue.

### *Heat exchangers*

The heat exchangers in the system play an essential role in the performance. The temperature loss must be minimised, especially for waste heat applications. Two types of heat exchangers are developed within this project. One uses copper foam for the gas side and copper tubes for the liquid side. The other type is made of stainless steel and uses micro-channels for the liquid side and fins for the gas side. Both heat exchangers have been tested under stationary conditions. The copper type has an overall heat transfer of 1900 W/m<sup>2</sup>K. The stainless steel type yields an overall heat transfer of 3800 W/m<sup>2</sup>K. Both types of heat exchangers have room for further improvement and need verification under realistic thermoacoustic conditions.

A study was performed in order to investigate whether a 1 MW system has enough space to exchange the required amounts of heat. This study is done on the basis of several heat transfer models. Based on the models and the assumptions used, the conclusion is that it is indeed feasible to exchange the required amount of heat within the expected size of the system. Prerequisite for this is the use of evaporation and condensation as the heat transfer mechanism.

### *Burner*

A burner-driven version of the thermoacoustic heat pump uses heat supplied by a burner. This heat is converted into acoustic energy. Within this project, a TA-engine has been designed, build and tested that uses a radiant burner. Based on a patented multi-segment regenerator, this concept provides a working TA-engine. The heat losses are an important point of concern. A large part of the heat supplied by the burner is not taking part in the thermoacoustic conversion process. In addition, the temperature of the flue gasses that leave the system are still quite high which means that the efficiency of the burner at the moment is still quite low.

### *Resonator*

The resonator couples the different components like the TA-engine and TA-heat pump. The resonator should have minimal acoustic losses to transport maximum power from the TA-engine to the TA-heat pump. A double Helmholtz resonator, consisting of two buffers connected by neck, has been studied within this project. Four resonator shapes have been investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD) calculations. The calculations have been compared with experimental results of comparable resonators. The agreement between the two is quite good.

Based on these results, a resonator has been chosen with the least dissipation in which a short, well rounded, step is made from the buffer volume to the neck diameter.

#### *Control unit*

A process scheme has been made with all measurement signals in order to control the thermoacoustic system. A control strategy and the most important components have been worked out based on this scheme. The demand of heat determines the operation of the system. Three schemes have been made, namely one for upgrading waste heat to process heat, one for the production of cold, and one for a household central heating system.

#### **System research**

The largest part of the system research has taken place in the test installation shown below. Both the TA-engine and the TA-heat pump have been tested in this facility.



*Test facility for thermoacoustic engine(left) and heat pump(right)*

#### *Thermoacoustic engine*

Large efforts were devoted to the development of a waste heat-driven TA-engine. The specific, and unique, part of the development relates to the low driving temperature. Use has been made of multiple regenerator units to achieve enough amplification and heat transfer at low temperatures. The research was directed at developing new heat exchangers, different regenerator materials, optimising the acoustic configuration, and ways to minimise acoustic and thermal losses. The performance of these systems is determined by comparing the acoustic power produced to the thermal power supplied.

The experiments show that it is indeed possible to obtain a TA-engine that has a low starting temperature of about 110-120°C based on the use of multiple regenerator units. This is an important prerequisite for the desired application. All performance measurements are performed at a temperature level of 180°C in order to get more acoustic power. The combined efficiency of engine and resonator at the moment is a factor of 4 (maximum efficiency) to 5 (maximum power) too low when the performance is compared to the original objectives.

#### *Thermoacoustic heat pump*

A complete system, including both the engine and the heat pump, has been tested in which the heat pump is used both in the high temperature area (waste heat to process heat) and in the low temperature area (waste heat to cold). It was not possible to investigate the system under the desired temperature conditions since the acoustic power of the engine was limited. The experiments that have been performed under limited conditions indicate that the efficiency of the heat pump part is a factor of 5 to 7 too low compared to the original targets. To a great extent this can be traced back to the lack of enough acoustic power from the engine. Loss mechanisms dominate the performance at these low power levels.

## Conclusions

The following objectives were formulated at the start of the project. These objectives are the go/no go criteria for going to the next phase of development. Conclusions will be drawn for each of these objectives.

- Temperature lift of 100°C possible in the heat pump.  
This temperature lift has only been demonstrated under unloaded conditions when no external heat is added or removed from the heat pump. However, there are no indications that such a temperature lift cannot be reached at loaded conditions.
- Thermal efficiency of a waste heat-driven thermoacoustic heat pump > 25%.  
This efficiency relates to the ratio between the heat that becomes available at the desired temperature level and the amount of waste heat supplied to the TA-engine. The total system efficiency could not be measured at the desired temperature conditions since the performance of the individual components was limited. Clearly, the system presently does not meet the required performance. However, there seems to be enough room for improvement to realise a 25% efficiency at a temperature lift of 50°C.
- Coefficient of Performance (COP) of a burner-driven thermoacoustic heat pump > 1.5.  
The COP value is the ratio between the amount of heat available at the desired temperature and the power of the burner. This target has not been reached. It has been demonstrated in this project that it is possible to drive a TA-engine based on a natural gas burner. Heat losses pose a major problem.
- Life span of 10 years feasible.  
Life span of the system does not seem to be a problem. Fatigue tests of metal foam that is used at low pressures show that the regenerator can be designed in such a way that fatigue is prevented. Metal screens that are applied at high pressures show even better fatigue behaviour. Not a single component was damaged by the oscillating load of the acoustic wave. During all experiments under realistic conditions.
- Scaling up possible.  
Thermoacoustic systems have clearly defined scaling rules. In principle, every system scale can be designed using the available design tools. The scaling rules have not been verified within this project. Only the heat transfer for a 1 MW system has been studied. It is possible to exchange the required amounts of heat in such a system assuming that use is made of condensation and evaporation as heat transfer mechanism.
- System size and sound acceptable for end-user.  
The size of the final system is strongly dependent on the efficiency and the power density of the system. A system with an acceptable size for an industrial site can be designed based on 1 MW of waste heat and the targeted objectives. The expected external sound production will be below the allowable limits for an industrial environment.
- Thermoacoustic heat pump is technically and economically feasible.  
The costs for heat and cold production have been calculated based on the measured performance and compared to the present costs with conventional systems (steam boiler and compression cooler). These calculated costs are higher than the prevailing costs since the measured performance is low. A similar calculation is performed for a situation with possible attainable efficiencies. These attainable efficiencies are a factor 1.5 lower than the original targets and are based on theoretical arguments with respect to the Stirling cycle that is executed and the fact that an engine with an efficiency of 40% of Carnot has already been realised in the United States. The costs of heat and cold based on these attainable efficiencies are competitive compared to present-day technology.

The overall conclusion is that the technical performance of the system presently stays behind compared to the original targets. However, this project has shown a large progress during the course of the project. The power of the TA-engine has been increased with a factor of 100. The efficiency has improved with a factor 10 during this project. The research clearly shows that there are enough leads to further optimisation. This will enable the development of a system that upgrades waste heat in a cost-effective way.

## Keywords

Thermoacoustic heat pump, thermoacoustic engine, traveling wave, waste heat, resonator, streaming, heat exchangers, regenerator, fatigue, control process, burner, techno-economic evaluation, heat production, cold production