



Energy research Centre of the Netherlands

ECN werkt aan unieke warmtepompen

Thermochemische en -akoestische principes getoetst

S. Spoelstra

R. de Boer

Gepubliceerd in Verwarming Ventilatie Plus, mei 2008, 346-351

ECN werkt aan unieke warmtepompen

Simon Spoelstra,
Robert de Boer

Om industriële restwarmte in plaats van te lozen, op te waarden tot nuttige proceswarmte, zijn warmtepompen nodig die grote temperatuurliftten kunnen realiseren op een hoog temperatuurniveau. Bij ECN zijn twee concepten in ontwikkeling die perspectief bieden op een kosteneffectief systeem. Doel is om na het aantonen van de haalbaarheid op laboratoriumschaal, samen met Bronswerk Heat Transfer en Technisch Bureau Dahlman, binnen vijf jaar een commerciële demo te ontwikkelen.

Meer dan 80 procent van het industriële energiegebruik komt voort uit warmtebehoefte: het stoken van fornuizen en het opwekken van stroom. Een groot deel van deze warmte wordt uiteindelijk via koelwater en koeltorens in de omgeving geloosd, de zogenoemde restwarmte. Als de restwarmte kosteneffectief is op te waarden tot bruikbare proceswarmte, zijn grote besparingen mogelijk.

Op dit ogenblik gaat de restwarmte verloren, omdat de temperatuur te laag is voor gebruik. Met nieuw te ontwikkelen warmtepompen kan deze warmte voor 20 tot 30 procent worden omgezet naar nuttige proceswarmte of -koude. Bij ECN zijn twee typen hoge-temperatuurwarmtepompen in ontwikkeling die dit probleem aankunnen, namelijk

een thermo-akoestische en een thermochemische warmtepomp. Het werkingsprincipe van deze warmtepompen wijkt sterk af van bekende warmtepompen, zoals compressie- en vloeistofabsorptiewarmtepompen.

De thermochemische en thermo-akoestische werkingsprincipes maken het mogelijk de warmtepompen op hoge temperatuur te laten functioneren en grote temperatuurliftten te realiseren.

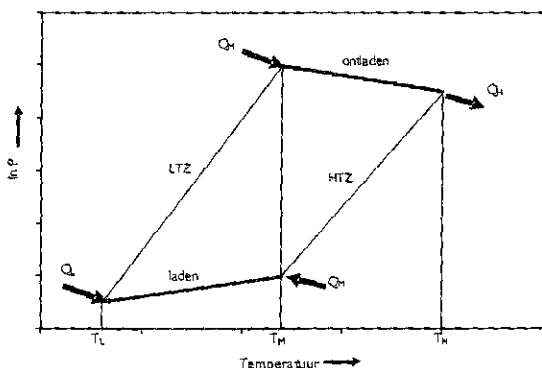
THERMOCHEMISCHE WARMTEPOMP

De werking van een thermochemische of chemisorptie-warmtepomp is gebaseerd op de reversibele absorptie en desorptie van damp (water, alcohol, ammoniak, waterstof) in

Werkingsprincipe sorptiereacties

De manier waarop deze sorptiereacties tot een warmtepomp leiden, is aan de hand van absorptie/desorptie van ammoniak in twee zouten, duidelijk te maken.

In het schema staan de dampevenwichtslijnen die bij twee verschillende zouten horen. De lijn geeft de druk aan van de ammoniakdamp boven het zout bij verschillende temperaturen. Het lage-temperatuurzout (LTZ) heeft bij dezelfde

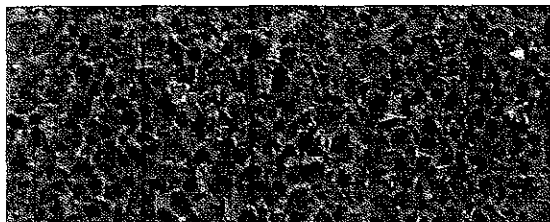


Het schematische werkingsprincipe van een thermochemische warmtepomp.

temperatuur een hogere dampdruk dan het hoge-temperatuurzout (HTZ).

In dit schema wordt een warmtebron op een middentemperatuurniveau T_m gebruikt om damp vrij te maken uit het LTZ. De druk boven het LTZ is hoger dan boven het HTZ. Door dit drukverschil stroomt de damp van het LTZ naar het HTZ. Absorptie van deze damp door het HTZ levert warmte op een hoog temperatuurniveau T_h .

Dit proces gaat door totdat alle damp uit het LTZ is vrijgemaakt en door het drukverschil tussen de zouten naar het HTZ is gestroomd. Dit wordt het ontladen of de gebruiksfase genoemd. Daarna moet het systeem weer worden geladen. Dit gebeurt door warmte toe te voeren aan het HTZ bij het middentemperatuurniveau T_m . Tegelijkertijd wordt het LTZ gekoeld op omgevingstemperatuur T_l . De druk boven het HTZ is nu hoger dan bij het LTZ. De vrijkomende damp uit het HTZ wordt getransporteerd door dit drukverschil en geabsorbeerd door het LTZ. Hiermee is het laadproces afgerond. Het overalleffect is dat het temperatuurverschil $T_m - T_l$ bij het LTZ wordt gebruikt om warmte op te pompen van T_m naar T_h bij het HTZ. Een dergelijk systeem wordt een warmtetransformator genoemd.



1. Aluminiumschuim als dragerstructuur voor het sorptiemateriaal.

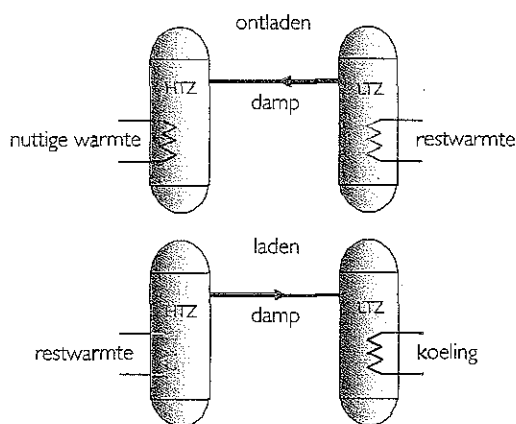
een vaste stof (zout, keramiek, metaal enzovoort). De dampabsorptie is een exotherm proces en levert dus warmte, terwijl de dampdesorptie warmte kost (endotherm). Het specifieke vastestof-dampkoppel is afhankelijk van het temperatuurgebied waarin de warmtepomp moet opereren. Door een combinatie van twee verschillende vaste stoffen te gebruiken is het mogelijk warmtestromen te manipuleren, waardoor een warmtepomp ontstaat. In plaats van een tweede vaste stof kan ook verdampen en condenseren worden toegepast.

UITVOERING

Een thermochemische warmtepomp bestaat uit een aantal onderdelen. Allereerst is er de vaste stof, in dit geval zout, waarmee de damp reageert. Deze vaste stof kan door de reacties structuurveranderingen ondergaan, resulterend in krimp en uitzetting. Om toch een mechanisch stabiele structuur te krijgen wordt de vaste stof gefixeerd op of in een dragermateriaal. Naast fixatie kan de drager ook worden gebruikt om de warmtegeleiding te verbeteren. De warmtegeleiding van een zout is bijvoorbeeld erg slecht. Een goed geleidende drager kan het warmtetransport sterk verbeteren. Hiervoor kan bijvoorbeeld een metaalschuim worden toegepast (afbeelding 1). Belangrijk is dat deze dragerstructuur voldoende open blijft om toegang van de damp mogelijk te maken.

Vervolgens wordt de dragerstructuur in contact gebracht met de warmtewisselaars waar de vermogens op de gewenste temperatuurniveaus worden toe- of afgevoerd. Hiervoor zijn verschillende warmtewisselaarconcepten mogelijk. Belangrijke eisen hierbij zijn contact met de dragerstructuur, uiteraard warmteoverdracht en drukval, maakbaarheid en kosten. Het geheel wordt ondergebracht in een reactorvat dat met een dampkanaal is verbonden met het reactorvat dat het andere zout bevat. De druk binnen het reactorvat wordt bepaald door de ammoniakdruk boven het zout en is dus afhankelijk van de temperatuur van het zout. De druk varieert doorgaans tussen de 0,1 - 20 bar.

Systemontwerp



Een thermochemische warmtepomp als warmtetransformator voor het opwaarderen van restwarmte.

Het schema in de afbeelding is een quasi-continu systeem, dat met vier reactorvaten is uitgerust. Het onderste stel reactorvaten zit in de laadcyclus, waarbij een restwarmtebron wordt gebruikt om de damp uit het HTZ vrij te maken. Deze damp wordt geabsorbeerd door het LTZ, waarbij warmte vrijkomt die wordt afgevoerd bij omgevingstemperatuur. Het bovenste stel reactorvaten voert in deze afbeelding de ontladcyclus uit. Hierbij wordt damp onttrokken aan het LTZ, waarbij de benodigde warmte wordt geleverd door een restwarmtebron. De damp stroomt naar het HTZ en wordt daar geabsorbeerd. De daarbij vrijkomende warmte op een hoog temperatuurniveau kan weer nuttig worden ingezet.

De geschetste situatie eindigt op het moment dat alle damp van reactorvat is gewisseld. Door de warmtestromen via kleppen om te schakelen, worden de functies van de bovenste en onderste stel reactorvaten gewisseld. Omdat de verschillende warmtevoerende stromen doorgaans niet mogen mengen bij het switchen tussen laden en ontladen, is een tussencircuit nodig. Het geschetste systeem werkt met de zouten lithiumchloride als LTZ en magnesiumchloride als HTZ. Dit systeem is in principe in staat restwarmte van 120 °C met een efficiëntie van circa 30 procent om te zetten in nuttige warmte boven de 180 °C.

ONTWIKKELINGEN

De huidige activiteiten bij ECN zijn gericht op het opwaarderen van industriële restwarmte. De doelstelling van deze ontwikkeling is om dit concept zodanig op te schalen dat er een kosteneffectief systeem ontstaat, waarbij 30 procent van de inkomende restwarmte weer als nuttige warmte op een hoger temperatuurniveau, beschikbaar komt.

Het werkingsprincipe en de benodigde temperatuurliftten zijn inmiddels experimenteel aangetoond. De huidige activiteiten zijn erop gericht om de rendementsdoelstelling te halen en de stabiliteit aan te tonen. Verder wordt gewerkt aan het verhogen van de vermogensdichtheid met compactere reactorconcepten die eenvoudig zijn op te schalen tot de gewenste vermogensgrootte.

Naast toepassing als warmtetransformator is deze techniek ook toepasbaar als warmtepomp of koelmachine. De vermogens- en dampstromen zijn dan precies omgekeerd als

bij de warmtetransformator: Wordt dit systeem als warmtepomp toegepast, dan wordt een aandrijving gebruikt op hoge temperatuur T_h (bijvoorbeeld 200 °C) bij het HTZ. De vrijkomende damp stroomt naar het LTZ, waar de reactie warmte produceert op het gewenste temperatuurniveau van bijvoorbeeld 80 °C. Dit is het laden van het systeem. Daarna wordt het LTZ in contact gebracht met een warmtebron op lage temperatuur (bijvoorbeeld 10 °C). De damp komt vrij uit het LTZ en stroomt naar het HTZ, waar weer warmte op het gewenste temperatuurniveau wordt gegenereerd. Een typische COP voor een dergelijk systeem is 1,4. Dit is de warmte die beschikbaar komt op het gewenste temperatuurniveau, gedeeld door de hoeveelheid warmte die er op het hoge temperatuurniveau aan het systeem moet worden toegevoerd.

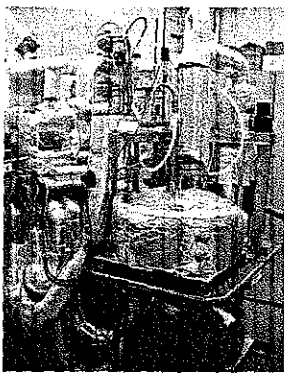
Bij toepassing als koelmachine is de richting van de damp- en vermogensstromen identiek aan de warmtepomp, alleen

is het nuttige product nu koude. Deze koude wordt gegenereerd op basis van toevoer van warmte aan het systeem op het laagste temperatuurniveau. Met een dergelijk systeem kan tot -60 °C worden gekoeld. Het rendement is sterk afhankelijk van de aandrijftemperatuur en de gewenste koudetemperatuur

VOORDELEN

Thermochemische warmtepompen of koelmachines op basis van vastestof-dampsystemen hebben een aantal voordelen ten opzichte van bestaande warmtepompen en koelmachines:

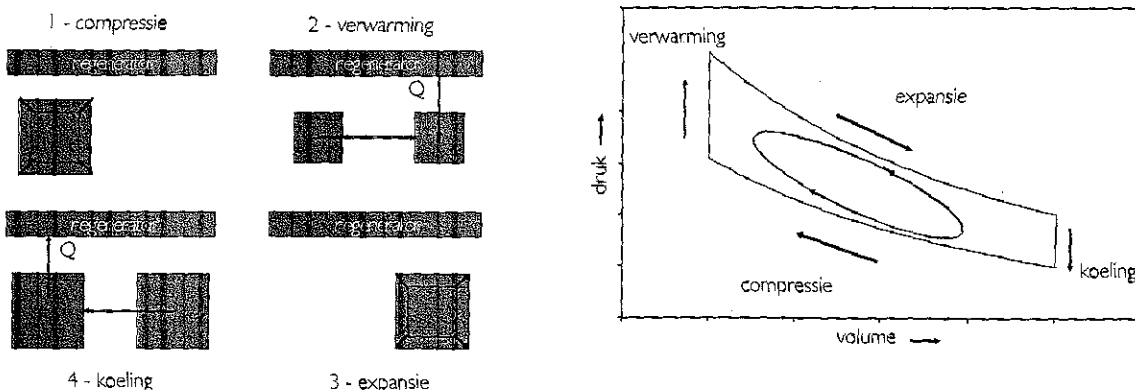
- de systemen kunnen worden aangedreven met restwarmte;
- het temperatuurniveau en de temperatuurlift liggen in potentie hoger dan bij conventionele warmtepompen;
- ten opzichte van bestaande vloeistofabsorptiewarmtepompen is de energiedichtheid hoger door de grotere reactiewarmte;
- het primaire proces heeft geen bewegende delen, wat voordelen biedt ten aanzien van onderhoud en geluidsniveaus;
- de systemen hebben een inherente opslagmogelijkheid: warmte en/of koude kan voor langere tijd verliesarm worden opgeslagen.



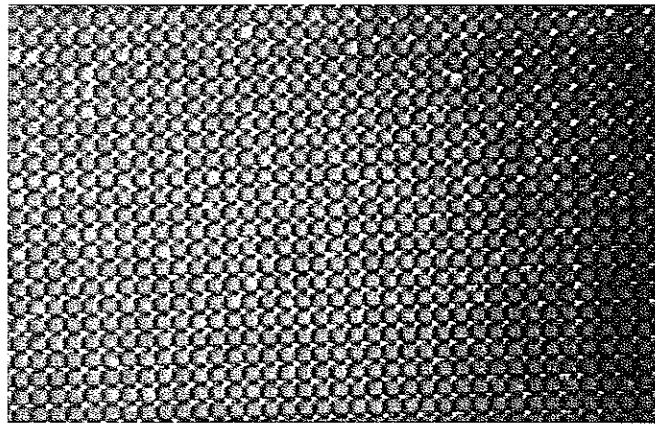
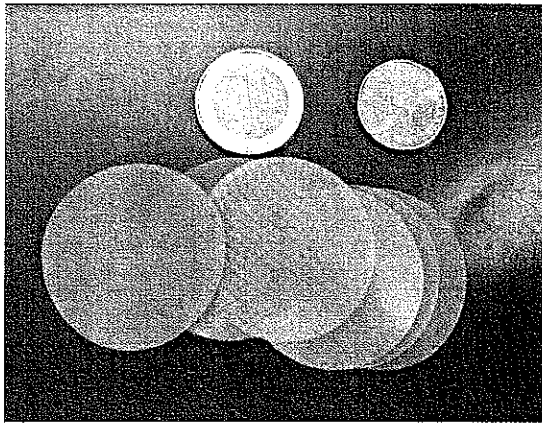
2. De testopstelling van een thermochemische warmtetransformator om de werking op 5 kW-schaal aan te tonen.

THERMO-AKOESTISCHE WARMTEPOMP

Thermo-akoestische energieconversie heeft te maken met de omzetting van temperatuurverschillen in geluid en de creatie van een temperatuurverschil met een akoestische



3. De thermo-akoestische cyclus. 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. 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: de drukamplitude, en daarmee de (mechanische) energie van de geluidsgolf, wordt groter. De cyclus die het gaspakketje doorloopt vertoont sterke overeenkomsten met een stirling-cyclus.



4. Geweven metaalgas als regenerator in een thermo-akoestisch systeem. Links is een aantal gaasjes te zien, rechts een microscopische opname van een gaas.

golf. Daartoe wordt de akoestische golf in interactie gebracht met een vast materiaal met een veel hogere warmtecapaciteit dan het medium (gas), waar zich de geluidsgolf doorheen beweegt. Dit materiaal fungeert als een soort warmtebuffer (regenerator). Deze regenerator is opgebouwd uit een zeer fijnmazig materiaal, waardoor het gas zeer snel de temperatuur van de regenerator kan aan nemen. Als 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 ten slotte weer naar de koude kant worden verplaatst (afbeelding 3).

Het temperatuurverschil wordt in stand gehouden door warmte aan de warme kant van de regenerator toe te voeren en warmte aan de koude kant af te voeren. De omzettingscyclus levert akoestisch vermogen uit de toegevoerde warmte. Dit wordt een thermo-akoestische motor (TA-motor) genoemd.

Als de thermodynamische cyclus in omgekeerde volgorde wordt doorlopen, wordt het akoestische vermogen gebruikt om warmte op te pompen van een laag naar een hoog temperatuurniveau. Beide componenten kunnen akoestisch worden gekoppeld binnen één behuizing, de resonator. Het geheel wordt, wellicht enigszins verwarrend, ook een thermo-akoestische warmtepomp genoemd.

UITVOERING

Een thermo-akoestisch systeem bestaat uit een gering aantal componenten. Het hart van het systeem wordt gevormd door de regenerator, die aan een aantal eisen moet voldoen. De warmteoverdracht naar het gas moet zeer groot zijn, maar de structuur moet een hoge warmte weerstand hebben tussen de warme en koude kant. Verder moet de drukval zo klein mogelijk zijn. Doorgaans wordt gebruik gemaakt van geweven metaalgazen met maaswijdte in de orde van 100 μm . Deze gazen zorgen voor een goede warmteoverdracht terwijl de stromingsverliezen relatief gering zijn. Stapelning van een groot aantal gazen leidt er toe dat de warm-

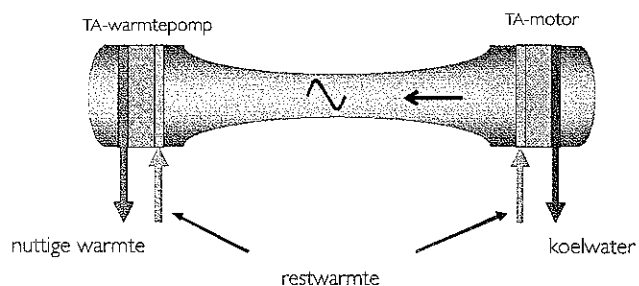
tegeleiding in de regenerator via puntcontacten loopt en daardoor een lage waarde heeft (afbeelding 4).

De warmte toe- en afvoer wordt verzorgd door warmtewisselaars aan weerszijden van de regenerator. De warmtewisselaars verzorgen de warmteoverdracht tussen het warmtetransportmedium en het oscillerende werkmedium, waarvoor meestal helium op hoge druk (40 bar) wordt gebruikt. Het geheel van van regenerator en warmtewisselaars wordt een regeneratorunit genoemd.

Een regeneratorunit kan als TA-motor of -warmtepomp fungeren, afhankelijk van het temperatuurverschil dat wordt aangebracht. Het optimale ontwerp van een unit wordt bepaald door de gewenste vermogens, temperatuurverschillen en akoestische condities.

Om de verschillende componenten van een thermo-akoestisch systeem (akoestisch) te koppelen worden de compo-

Systemontwerp



Een thermo-akoestische warmtetransformator voor het opwaarderen van restwarmte.

In de afbeelding 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 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.

nenten in een resonator geplaatst, die als drukvat fungeert. De resonator kan worden vergeleken met een orgelpijp en bepaalt de frequentie van het systeem. Een typische werkfrequentie voor een thermo-akoestisch systeem is 100 Hz.

ONTWIKKELINGEN

Ook bij het thermo-akoestisch systeem staan de activiteiten bij ECN in het teken van opwaardering van restwarmte. Doelstelling is hier een systeem te ontwikkelen met een thermisch rendement van 25 procent voor de opwaardering van een restwarmte van 140 naar meer dan 180 °C. Ook hier is het werkingsprincipe bewezen voor zowel het motorgedeelte als de warmtepomp. Inmiddels zijn temperatuurliften tot 100 °C aangetoond. De grote uitdaging is om voldoende omzettingsrendement te halen bij het omzetten van warmte naar akoestisch vermogen en vice versa. In de afgelopen jaren zijn hier grote vorderingen mee gemaakt.

Ook hier is de techniek niet alleen toepasbaar als warmtetransformator, maar ook als warmtepomp of koelmachine. In de warmtepompuitvoering wordt, vergelijkbaar met het thermochemische systeem, warmte van een hoge temperatuur toegevoerd aan het aandrijfgedeelte, in dit geval de TA-motor. Hiervoor kan een brander worden ingezet, die hoge temperaturen – en daarmee een hoog rendement – mogelijk maakt. Het gegenereerde akoestische vermogen wordt gebruikt om warmte op te pompen van bijvoorbeeld 10 naar 80 °C.

In plaats van warmte te genereren kan een vergelijkbaar systeem ook worden ingezet als koelmachine. In dat geval wordt warmte van een niveau onder omgevingstemperatuur opgepompt naar omgevingstemperatuur. Omdat liftten van meer dan 100 °C mogelijk zijn, kan worden gekoeld tot -100 °C. Zoals beschreven kan de aandrijving met warmte,

maar met een lineaire motor is ook mogelijk. Dit is een soort luidspreker die op zeer efficiënte wijze (> 85 procent) elektrisch vermogen omzet in akoestisch vermogen.

VOORDELEN

Hoewel de werking van thermo-akoestische technologie vrij complex is, is de praktische uitvoering relatief simpel. Dit biedt grote voordelen voor de economische haalbaarheid. Verdere voordelen zijn:

- geen bewegende onderdelen bij het thermodynamische proces, dus een betrouwbare, lange levensduur;
- milieuvriendelijk werkmedium (lucht, edelgas);
- het gebruik van lucht of edelgas geeft een groot toepassingsbereik, omdat er geen faseovergangen optreden;
- het gebruik van simpele materialen (geen speciale eisen), die commercieel verkrijgbaar zijn en dus relatief goedkoop;
- op basis van de technologische principes kan een groot aantal toepassingsmogelijkheden worden bestreken.

VOORUITZICHTEN

De beschreven technologieën en hun toepassing voor opwaardering van restwarmte zijn wereldwijd unieke ontwikkelingen. Het aantal onderzoekers dat zich met vergelijkbare zaken bezighoudt, is nog zeer beperkt.

Eind 2008 wordt een eerste ontwikkelingsfase bij ECN afgesloten, waarbij de beoogde technische en economische prestaties op laboratoriumschaal voldoende zijn voor een volgende stap. ECN zal dan samen met twee apparatenbouwers, Bronswerk Heat Transfer en Technische Bureau Dahlgman, verder werken aan de ontwikkeling van industriële toepassingen. Het is de bedoeling systemen te realiseren die wat groter zijn dan de huidige laboratoriumsystemen en deze ook onder typische industriële condities te testen.

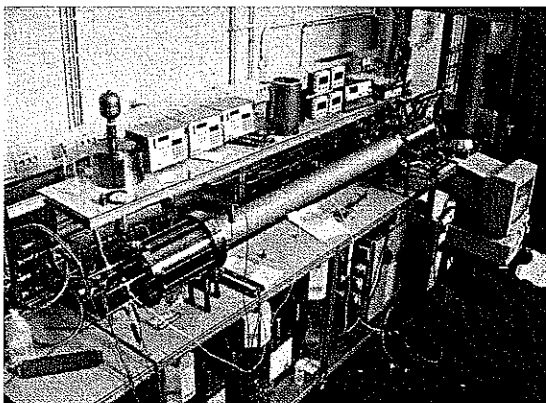
De fase daarna zal bestaan uit verdere opschaling en het testen op locatie. De inschatting is dat een eerste commerciële demo dan binnen vijf jaar mogelijk moeten zijn. De uiteindelijk beoogde schaalgrootte ligt in de orde van 1 MW restwarmte. Zoals aangegeven zijn beide technologieën ook inzetbaar voor andere toepassingen op het gebied van zowel warmte- als koudeproductie. Deze toepassingen kunnen in zowel de industriële als de utiliteitssector of gebouwde omgeving liggen.

Auteurs

Simon Spoelstra en Robert de Boer, ECN

Verantwoording

De beschreven ontwikkelingen worden uitgevoerd met subsidie van SenterNovem vanuit het EOS-LT programma.



5. Een testopstelling van een thermo-akoestische warmtepomp op 5 kW-schaal.