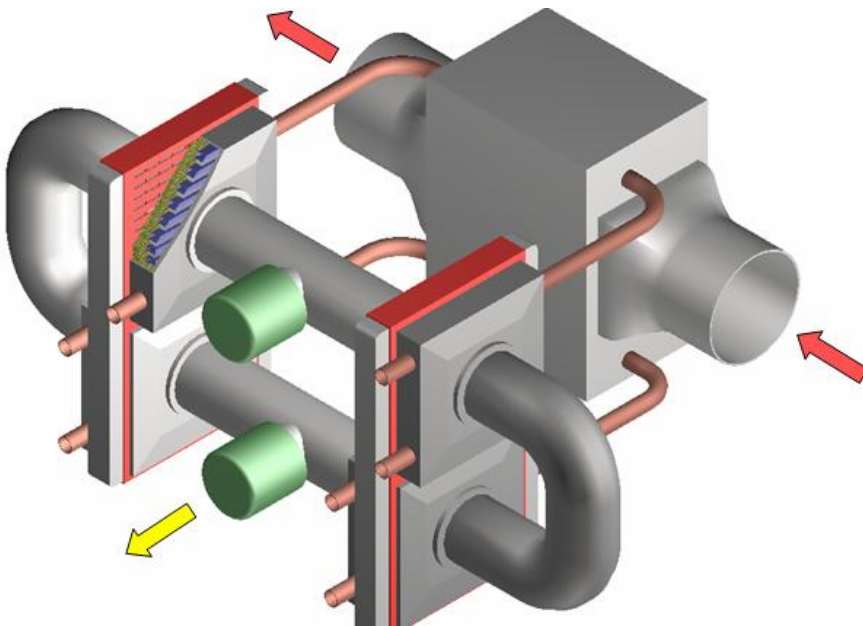


Eindrapportage fase II

Thermo Acoustic Power (TAP)

conversie industriële restwarmte naar elektriciteit



Eindrapportage fase 2 (SBIR09313)

SBIR Oproep: verduurzaming van warmte en/of koude in de industrie

Veessen, 9 december 2011

C.M. de Blok



R.H. Huisman



drs.ing. W.P.C. Mans



Inhoud

1	Gegevens project	3
2	Samenvatting	3
3	Resultaten en conclusie	4
4	Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het projectplan	9
5	Uitvoering van het project	9
6	Knelpunten	9
6.1	Technisch.....	9
6.2	Financieel	10
7	Sociale en ecologische effecten.....	10
8	Commerciële vooruitzichten van het project.....	10
8.1	Ontwikkeling van een alternatieve uitvoering van de lineaire generator.	10
8.2	uitvoering als warmtetransformator.....	11

1 Gegevens project

- SBIR-projectnummer : SBIR09313
- projecttitel: Thermo Acoustic Power (TAP)
- uitvoerder : Aster Thermoakoestische Systemen
- begindatum: 1 november 2009
- einddatum: 31 oktober 2011

Rapportage periode: 1 november 2009 t/m 31 oktober 2011

2 Samenvatting

De doelstelling van het project is om de marktintroductie van de TAP voor te bereiden op basis van een werkende demo bij Smurfit Kappa in Bad Nieuweschans (Gr).

De TAP produceert inmiddels elektriciteit en het thermo akoestische gedeelte van de TAP werkt uitstekend.

Positieve punten:

- De TAP werkt voor het eerst buiten het laboratorium op een grotere schaal
- Het akoestisch deel van de TAP werkt naar behoren
 - Lage starttemperatuur
 - Flexibel qua beschikbare temperatuur en vermogen

Er zijn helaas ook problemen gerezen:

- de warmteoverdracht naar het akoestische deel kent een te grote ΔT waardoor het omzettingsrendement laag is. Dit probleem is waarschijnlijk goed oplosbaar
- de alternators werken niet volgens verwachting: de bewegende massa van de magneten is zodanig groot dat de frequentie omlaag moest, waardoor deze weer in een ongunstig bereik moet werken en het omzettingsrendement omlaag is gegaan van circa 95% naar 70% . ,

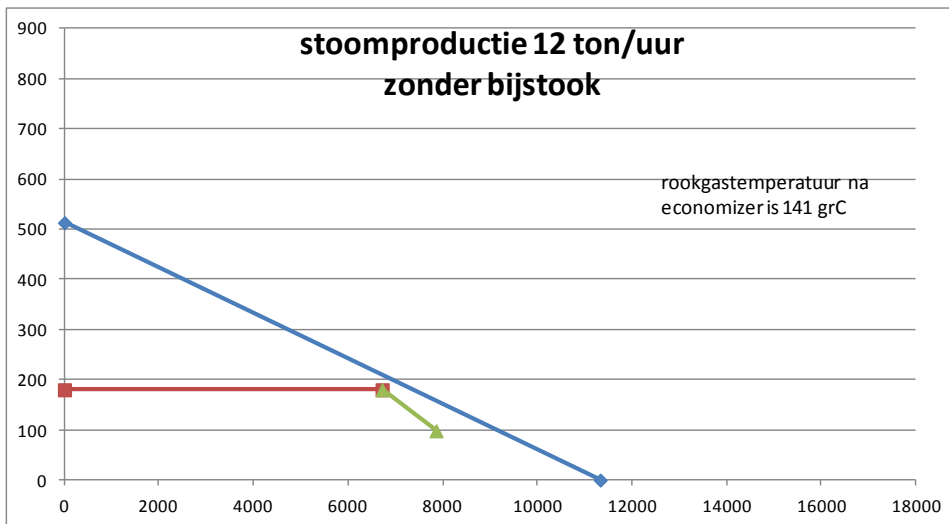
We zien mogelijkheden in een verbeterde uitvoering van de lineaire generatoren en/of in een andere uitvoeringsvorm van de akoestisch-elektrische omzetting: een bi-directionele radiale impulsturbine of Wells turbine. De ontwikkeling van deze alternatieven vergt studie, ontwikkeling en praktijkdemonstratie. Er is derhalve een investering nodig om deze ontwikkeling te financieren.

Het thermoakoestisch deel van de TAP kan ook worden gebruikt om, in plaats van lineaire generatoren, een thermoakoestische warmtepomp aan te drijven. In die configuratie biedt een uitvoering als warmtetransformator economisch perspectief en zal in 2012 worden gepresenteerd aan de markt.

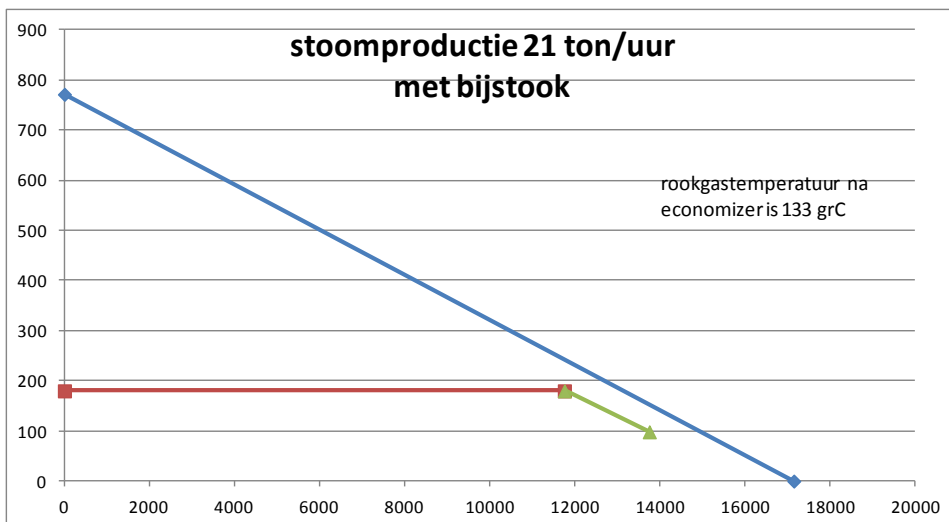
Voor experimenten het testen van de voorgestelde alternatieven kunnen we gebruik maken van de gerealiseerde opstelling bij Smurfit Kappa in Bad Nieuweschans.

3 Resultaten en conclusie

Het in dit project ontwikkelde prototype is een zogenaamde Thermo Acoustic Power (TAP) unit. Dit is een nageschakelde energieomzetter waarmee restwarmte uit rookgassen uit het ketelhuis van kartonfabriek Smurfit Kappa Solid Board in Nieuweschans Groningen. In dit ketelhuis staat een gasturbine met afgassenketel voor de productie van elektriciteit en warmte in de vorm van stoom. Afhankelijk van de stoomvraag is er een bijstookmogelijkheid (aardgasbrander in de afgassenketel). Het is de bedoeling dat de TAP elektriciteit produceert uit de afgassen van de gasturbine na de ketel en economizer. Aangezien er sprake is van een nieuwe installatie heeft Innoforte de afgassentemperatuur vooraf berekend, zie Figuur 1 en Figuur 2.



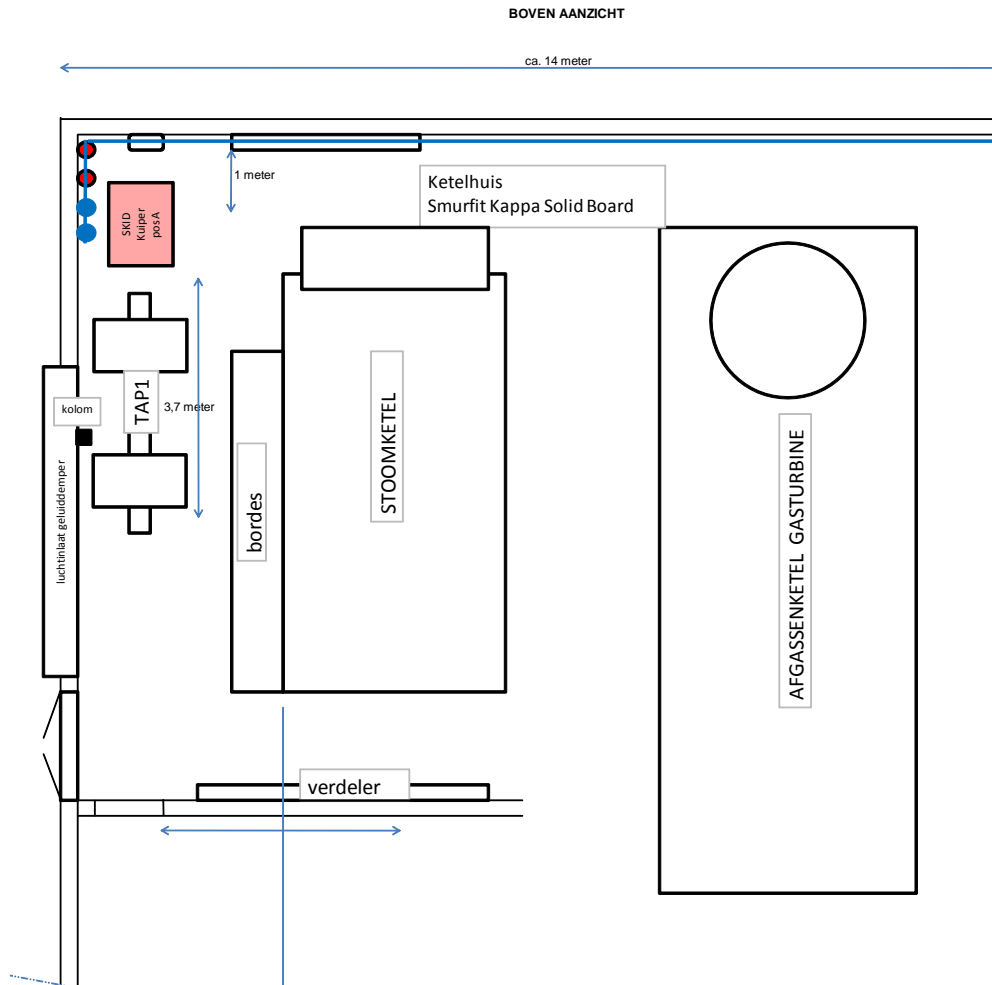
Figuur 1 T-Q diagram afgassen zonder bijstook



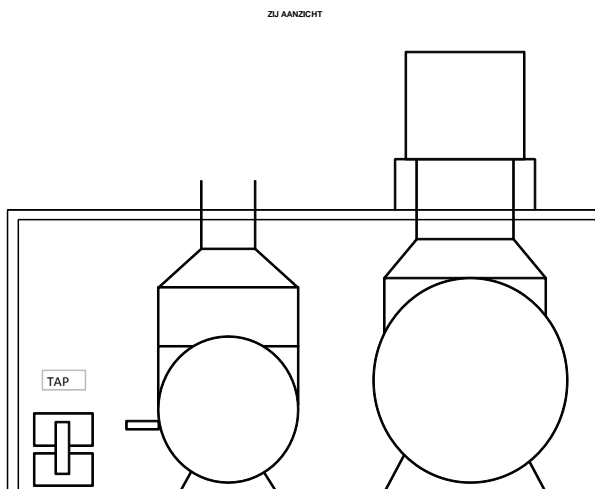
Figuur 2 T-Q diagram afgassen met bijstook

Op basis van deze temperaturen zijn diverse configuraties berekend en met Smurfit Kappa gecommuniceerd. Met name de extra tegendruk in als gevolg van de warmtewisselaar en de verlaagde elektriciteitsproductie door de gasturbine is berekend en heeft geresulteerd in een lage drukval < 300 Pa.

Het prototype van de TAP is geplaatst bij Smurfit-Kappa Solid Boards (SKSB) in Bad Nieuweschans, zie Figuur 3 en Figuur 4.

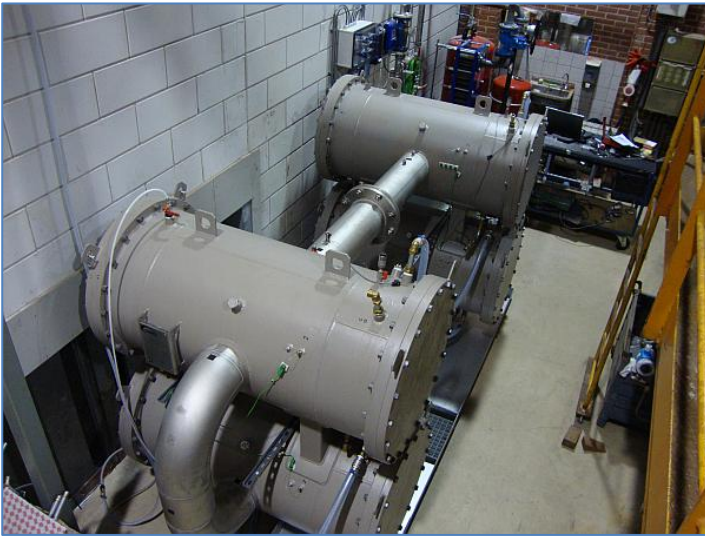


Figuur 3 Bovenaanzicht opstelling TAP in het ketelhuis



Figuur 4 Zijaanzicht opstelling TAP in ketelhuis

De gerealiseerde opstelling van de TAP en bijbehorende apparatuur in het ketelhuis bij SKSB en de in de turbine rookgasafvoer ingebouwde warmtewisselaar zijn afgebeeld in figuur 5.



Figuur 5 De TAP en de ingebouwde rookgaswarmtewisselaar (3m x 3m) bij SKSB

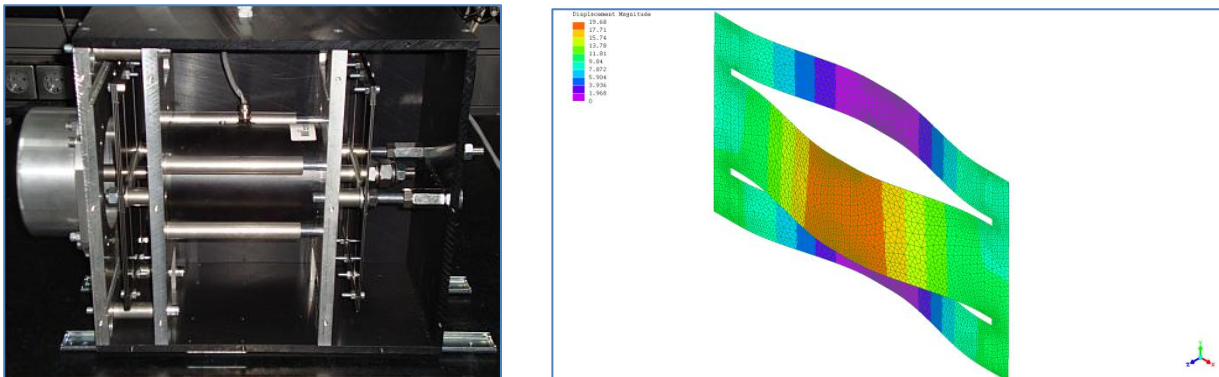
Restwarmte uit de rookgasafvoer wordt door een hoge temperatuur watercircuit (geïsoleerde leidingen in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**) toegevoerd aan een tussenwarmtewisselaar en via een tweede circuit met thermische olie toegevoerd aan de TAP. De warmte TAP wordt afgevoerd door een lage temperatuur water circuit verbonden met de proceswater opslag. De lineaire generatoren bevinden zich in de “drukvaten”. Het elektrisch vermogen wordt via drukbestendige doorvoeren in de wand toegevoerd aan een elektrische belasting.

Aangetoond is dat het thermoakoestisch energieconversie proces succesvol kan worden opgeschaald en daadwerkelijk kan worden toegepast voor het omzetten van lage temperatuur (rest)warmte in het algemeen. Het thermoakoestisch deel, de omzetting van warmte in akoestisch (= mechanisch) voldoet aan de verwachtingen. De aanvoertemperatuur waarbij de TAP start bedraagt slecht 45°C. Gemeten bij een regenerator temperatuur van 99°C wordt 20 kW warmte omgezet in 1.64 kW akoestisch vermogen. Dit komt bij de gegeven aan- en afvoertemperaturen overeen met een exegetisch rendement van 38%. Dit is zeker een mijlpaal omdat niet eerder een degelijke systeem bij deze afmetingen en vermogens is gebouwd.

Door de noodzakelijke toepassing van een tussenwarmtewisselaar en een te lage warmteoverdracht in het hierbij behorende thermische olie circuit treedt er tussen rookgas en regeneratoren in de TAP een temperatuurverlies op van ongeveer 60°C

Dit betekent dat bij de beschikbare rookgastemperatuur van 160°C er niet voldoende warmte kan worden onttrokken. De TAP werkt hierdoor op een te lage temperatuur en bij een te laag thermisch vermogen. Bij gelijkblijvend conversierendement is hierdoor ook het akoestisch uitgangsvermogen lager dan gepland.

Om het opgewekt akoestisch vermogen om te zetten in elektriciteit is binnen het project een lineaire generator ontwikkeld en gebouwd. Per trap zijn twee van dergelijke generatoren toegepast ontworpen voor 1.25 kW elk. Zuiger en magneten bewegen hierbij in tegenfase zodat trillingen worden gecompenseerd. De constructie van de lineaire generator en het model van de speciaal ontwikkelde bladveren is weergegeven in Figuur 5



Figuur 5 Eén van de voor de TAP ontwikkelde 1.25 kW lineaire generatoren tijdens assemblage en een simulatie van de hierin toegepaste bladveren

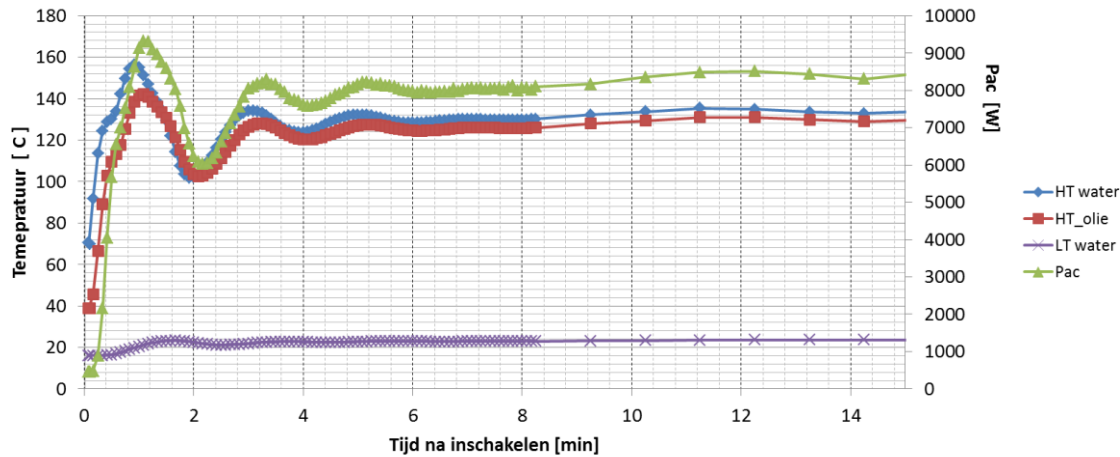
Deze veren moeten een grote slag van de zuiger en magneet toelaten (40 mm) en tegelijkertijd een zeer grote zijdelingse stijfheid hebben omdat deze veren de zuiger met een speling van ca. 100 μm vrij moeten houden van de cilinderwand (geen slijtage). De afdichting is namelijk gebaseerd op het feit dat een akoestische golf niet of moeilijk propageert door een nauwe luchtspleet (clearance seal). De ontwikkelde veren voldoen hieraan maar verhogen tegelijk evenredig de massa van het bewegend deel. Het elektromagnetisch deel (spoelen, magneten) van de voor het project gebouwde lineaire generatoren zijn ontworpen voor een frequentie van 80Hz en heeft dan een mechanisch-elektrisch rendement van 90%. De toegevoegde massa van de veren en het hoge gewicht van de magneet (>2 kg) beperken nu echter de mechanische resonantie van het geheel tot 40Hz. Bij gelijkblijvende slag van de zuiger (plus magneet) is de snelheid en hiermee de opgewekte spanning gehalveerd en bedraagt het elektrisch uitgangsvermogen nog slecht een kwart. Dit betekent dat bij 40 Hz het thermoakoestisch opgewekt akoestisch vermogen niet kan worden overgedragen en het elektrisch uitgangsvermogen hierdoor evenredig kleiner is.

Hoewel de geconstateerde beperkingen voor de huidige vermogensgrootte (10 kW_e) nog zouden kunnen worden opgelost is ook duidelijk geworden dat verdere opschaalbaarheid in vermogen van lineaire generatoren beperkt is. Het toenemend gewicht en kosten zijn een serieus knelpunt in de voor commercialisatie noodzakelijke opschaling tot tenminste 100 kW_e.

We zien mogelijkheden in een verbeterde uitvoering van de lineaire generatoren en/of in een andere uitvoeringsvorm van de akoestisch-elektrische omzetting: een bi-directionele radiale impulsturbine of Wells turbine. Dit type turbine wordt toegepast in OCW (oscillating water column) getijde centrales. De ontwikkeling van deze alternatieven vergt studie, ontwikkeling en praktijkdemonstratie. Er is derhalve een investering nodig om deze ontwikkeling te financieren.

Voor experimenten het testen van de voorgestelde oplossingen en alternatieven we gebruik maken van de gerealiseerde opstelling bij Smurfit Kappa in Bad Nieuweschans.

Een belangrijke eigenschap van het concept is de flexibiliteit met betrekking tot de aangeboden hoeveelheid warmte en temperaturen. Een voorbeeld van de response van de TAP op het aanbieden van warmte is gegeven in Figuur 6.



Figuur 6 Temperaturen van de in- en uitgangscircuits en het intern akoestisch vermogen na inschakelen van de circulatiepomp van het hoge temperatuur water circuit

Door het inschakelen van de circulatiepomp wordt warmte van de uitlaatgaswarmtewisselaar (zie Figuur 5) naar de TAP gevoerd. Figuur 6 laat zien dat bij een aanvoertemperatuur (HT_olie) van 45°C de oscillatie start en het opgewekt vermogen exponentieel toeneemt tot dat dit wordt begrensd door de aangeboden hoeveelheid warmte. Duidelijk is dat na 5 minuten de TAP vrijwel thermisch stabiel en volledig in bedrijf is. De response op variaties in de aangeboden hoeveel restwarmte tijdens het productieproces is vergelijkbaar zonder dat hiervoor regeltechnische voorzieningen nodig zijn.

Samengevat, de technische doelstellingen volgens het projectplan waren het aantonen dat de TAP

1. daadwerkelijk elektriciteit produceert uit restwarmte;
2. betrouwbaar en flexibel is in te zetten;
3. het belofde rendement kan waarmaken, zowel energetisch als bedrijfseconomisch.

De eerste doelstelling is gehaald, zij het dat door de hiervoor aangegeven beperkingen in de generatoren en het temperatuurverlies in de periferie de opbrengst van de TAP veel minder is dan de ontwerpwaarde.

Er is binnen het project (nog) geen duurproef uitgevoerd maar de werking tijdens de testen en de flexibele response op het aanbieden van de warmte ondersteunen de conclusie dat thermoakoestische energie conversie flexibel, onderhoudsvrij en betrouwbaar is.

Voldoende energetisch rendement is aangetoond voor het thermoakoestisch deel maar niet voor de TAP als geheel. Hierdoor en met name door de hoger uitgevallen productie en installatiekosten is het bedrijfseconomisch rendement op deze schaal nog niet waargemaakt.

Eén van de conclusies is dan ook dat om het bedrijfseconomisch rendement van de TAP waar te maken deze tenminste met een factor 10 in vermogen moet worden opgeschaald. Om in dat geval de aangegeven beperking m.b.t. de lineaire generatoren op te heffen zal een opschaalbare conversie van akoestisch vermogen naar elektriciteit moeten worden ontwikkeld. Technisch zijn hiervoor een aantal oplossingen

bekend maar deze moeten nog wel specifiek voor de TAP worden uitontwikkeld. We kunnen hierbij gebruik maken van de gerealiseerde opstelling bij SKSB in Bad Nieuweschans.

4 Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het projectplan

Door het faillissement van Fainox in december 2010 is er in de constructie en assemblage van de TAP een vertraging ontstaan van ca. 3 maanden. Ondanks dat voor de bouw van de behuizing (drukvaten) en het afbouwen van de alternators redelijk snel andere fabrikanten waren gevonden is de TAP pas in juli bij SKSB. Afgezien van een schadepost van 10 k€ aan voorschotbetalingen en bijkomende extra werkzaamheden is de impact op verloop van het project en doelstellingen en resultaten gering geweest.

5 Uitvoering van het project

Onderstaande tabel geeft een overzicht van bedrijven die, naast de project partners, hebben bijgedragen aan het realiseren van de TAP

Smurfitt-Kappa Solid Boards, Nieuweschans	Beschikbaar stellen van restwarmte en faciliteiten voor het opbouwen en aansluiten van de TAP
GEMS Metaalwerken B.V, Vorden	Vervaardiging behuizing (druktanks) en akoestisch terugkoppelcircuit
HP Techniek B.V, Barneveld	Mechanisch deel van de lineaire generatoren
Magnetic Innovations BV, Veldhoven	Elektromagnetisch deel van de lineaire generatoren
Drenthe installatiedienst, Veendam	Aanleg koud water circuit op het terrein van SKSB
Kuiper & Zonen B.V, Ede	Installatie rookgaswarmtewisselaar en aanleg hoge temperatuur watercircuit bij SKSB (ketelhuis)
Energie Consult Nederland, Ede	Certificering en keuring CE markering
Huisman, Elst	Beschikbaar stellen van faciliteiten tijdens de opbouw en testfase

De formele opdrachtverlening aan deze partijen is uitgevoerd door Huisman. Technisch en inhoudelijk overleg is uitgevoerd door Innoforte.

6 Knelpunten

6.1 Technisch

Door de bij SKSB noodzakelijke extra tussenwarmtewisselaar is het temperatuurverlies tussen rookgas en TAP groter dan voorzien. De effectieve aandrijf temperatuur en daarmee het akoestisch uitgangsvermogen van de TAP is hierdoor te laag. In toekomstige uitvoeringsvormen kan de (nu verplichte) tussenwarmtewisselaar echter achterwege blijven.

De TAP kent twee conversie stappen, 1) van warmte naar akoestisch vermogen en 2) van akoestisch vermogen naar elektriciteit. Voor de laatste stap worden lineaire generatoren gebruikt. Door het hoge gewicht van de magneten en veren in deze generatoren was het uiteindelijk niet mogelijk de ontwerpfrequentie te halen. De TAP werkt daardoor nu op de halve frequentie waardoor het elektrisch uitgangsvermogen tot een kwart wordt gereduceerd.

Bij het opschalen van het vermogen wordt dit probleem alleen maar groter. Het toenemend gewicht (kosten) en de onzekere beschikbaarheid van hoge veldsterkte magneten (neodymium) zijn een serieus knelpunt in de voor commercialisatie noodzakelijke opschaling. Binnen het project is hiervoor nog geen oplossing gevonden. Om deze conversiestap kosteffectief en opschaalbaar te kunnen realiseren zullen in de komende periode investeerders worden gezocht. De huidige opstelling bij SKSB wordt hierbij als test en demonstratie site gebruikt.

6.2 Financieel

Tijdens het project is een budget overschrijding ontstaan, veroorzaakt doordat:

- de kosten voor de installatie en rookgaswarmtewisselaar bij SKSB hoger aanzienlijk hoger waren dan begroot
- op het terrein van SKSB geen thermische olie mocht worden gebruikt en hierdoor een extra tussenwarmtewisselaar en pomp moesten worden aangeschaft.
- er voor de TAP en installatie een CE-keurmerk nodig is.
- door het faillissement van Fainox een aanbetaling van €10.000,- verloren is gegaan.

7 Sociale en ecologische effecten

Thermoakoestische energieconversie is een belangrijke technologie voor toekomstige warmte en koude systemen. Doordat toepassingen mogelijk zijn die om technische of economische redenen niet haalbaar zijn met conventionele technieken kunnen (rest-)warmtestromen en andere energievormen beter worden benut. Door de ontwikkeling en commercialisering van deze technologie is op termijn de energiebesparing en CO₂ reductie door het vermeden gebruik van fossiele brandstoffen vele malen groter dan alleen de besparing voor de in dit project te ontwikkelen TAP.

Met de gerealiseerde opstelling is aangetoond dat deze technologie daadwerkelijk kan worden ingepast in industriële processen en dat de oorspronkelijk verwachte effecten.

Het project levert winst op voor onze klanten: industriële bedrijven en exploitanten van (Bio-) WKK installaties. Niet alleen qua energiebesparing maar ook qua kostenreductie en realisatie van hun CO₂ doelstellingen.

Nederland heeft een vooraanstaande kennispositie opgebouwd op gebied van thermoakoestische energieconversie. Zowel deze kennispositie als de in dit project te ontwikkelen TAP kunnen een belangrijk exportproduct worden. Dit draagt bij aan de handelsbalans van Nederland en aan werkgelegenheid voor onszelf, onze partners en toeleveranciers met name in de kennis- en maakindustrie. Het project heeft laten zien dat innovaties in Nederland mogelijk zijn en draagt zo bij aan het Nederlandse ondernemers- en innovatieklimaat.

8 Commerciële vooruitzichten van het project

Vanwege de gerezen problemen met de lineaire generatoren (alternators) is de TAP helaas nog niet verkoopbaar. Na rijp beraad zien de initiatiefnemers de volgende mogelijkheden:

8.1 Ontwikkeling van een alternatieve uitvoering van de lineaire generator.

Er zijn reeds diverse ideeën voor verbetering van het ontwerp op basis van de gekozen technologie, dan wel op basis van een turbine (Wells of bi-directionele radiale impulsturbine). Hiertoe dient te worden geïnvesteerd in de ontwikkeling. Het concept van de TAP biedt daarbij ruimte voor een duurdere oplossing van lineaire generator. Hieronder, in Tabel 1 is de naast de kostprijs van de gerealiseerde 10 kW_e TAP de kostprijs van een commerciële 100 kW_e TAP gegeven.

Tabel 1 *Kostprijs gerealiseerde demo-opstelling en opgeschaalde commerciële uitvoering*

onderdeel	kostprijs demo 100kW _{th} /10 kW _E	commerciële kostprijs 1MW _{th} /100kW _e
rookgaswisselaar TAP + leidingen en pomp tussenmedium incl benodigde regelingen	50.000	100.000
hoge temperatuur warmtewisselaar TAP	2.350	5.000
Thermische olie	200	300
Behuizing TAP	33.000	50.000
regenerator	2.000	4.000
koelwater warmtewisselaar TAP	2.350	5.000
koelwaterpomp en leidingen	7.000	7.000
lineaire generatoren	40.000	50.000
netsynchronisatie	500	12.000
helium (kosten bij eenmalig afvullen tot 6 bar)	200	700
installaties tbv monitoring	3.000	7.000
keuring TAP	400	1.000
CAR verzekering	2.000	3.000
kosten Fainox	10.000	0
divers	7.000	10000
TOTAAL	160.000	255.000

Op basis van een industriële toepassing gedurende 8.000 uren per jaar, een elektriciteitsprijs van € 0,09/kWh en een terugverdientijd van 5 jaar is de maximale ruimte voor de lineaire generatoren in totaal € 1.550,- per kWh. Ofwel: de lineaire generator mag maximaal 3 keer zo duur worden dan het huidige ontwerp.

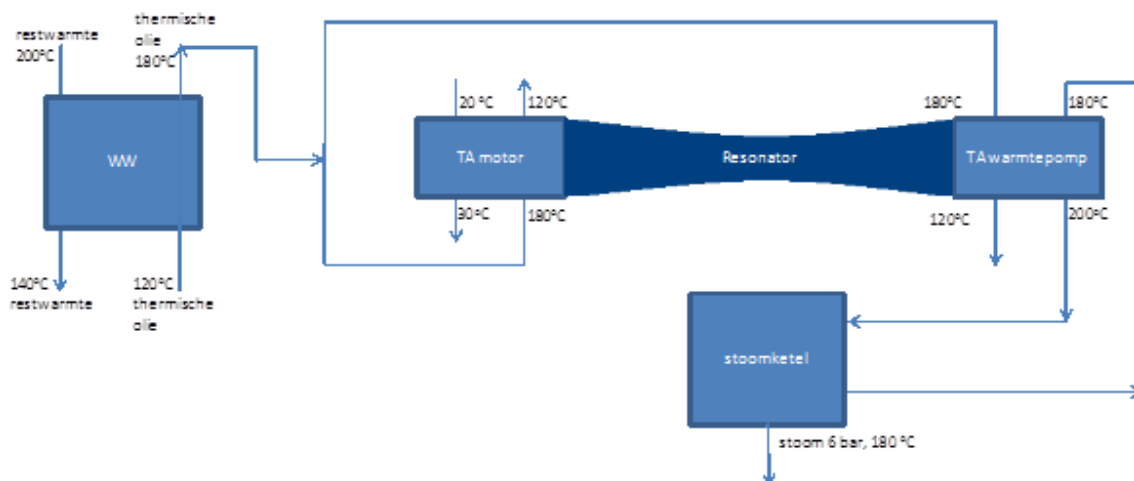
Eenzijds behoudt de TAP daardoor commercieel perspectief, anderzijds is een investerende partner nodig voor de verdere ontwikkeling en opschaling voordat marktintroductie kan plaatsvinden.

8.2 uitvoering als warmtetransformator

Op basis van de gebleken thermo akoestische prestaties van de TAP hebben wij de mogelijkheden onderzocht van een commerciële uitvoering zonder lineaire generator. Diverse industriële uitvoeringen als warmtepomp, die flexibel zijn qua temperatuurbereik, zijn daarbij denkbaar. In een eerdere studie is het perspectief van een warmtetransformator reeds aangetoond. Dit is een uitvoering waarbij de restwarmte wordt gesplitst:

- een deel wordt gebruikt ter aandrijving van de thermo akoestische motor
- een deel wordt gebruikt als warmtebron

Op deze wijze kan de restwarmte in temperatuur worden verhoogd. In energietermen: warmte wordt over de pinch getransporteerd en resulteert aldus in energiebesparing. Een andere benadering: nutteloze restwarmte van een te lage temperatuur wordt omgezet in nuttige warmte van een hogere temperatuur, bijvoorbeeld stoom. In Figuur 7 is deze werkwijze schematisch weergegeven.



Figuur 7 Voorbeeld configuratie warmtetransformator voor levering stoom

Tabel 2 geeft een voorbeeldberekening voor deze configuratie.

Tabel 2 Voorbeeldberekening stoom opbrengst

Ingaande energiestromen						t_0 [°C]	Uitgaande energiestromen						
thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]		thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]	
1	180	120	149	1000	294	TA motor $\eta_{ex} = 40.0\%$ verlies [kW] 0	1	20	30	25	882	0	
2							2					0	
3							3					0	
4							4					0	
Mechanisch [kW]							Mechanisch [kW]						118
Brandstof [kW]							Brandstof [kW]						
Ingaande energiestromen						t_0 [°C]	Uitgaande energiestromen						
thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]		thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]	
1	180	120	149	398	0	Resonator $\eta_{ex} = 95.0\%$ verlies [kW] 6	1					0	
2							2					0	
3							3					0	
4							4					0	
Mechanisch [kW]							Mechanisch [kW]						112
Brandstof [kW]							Brandstof [kW]						
Ingaande energiestromen						t_0 [°C]	Uitgaande energiestromen						
thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]		thermisch	T_{in} [°C]	T_{uit} [°C]	T_{in} [°C]	P_{th} [kW]	P_{ex} [kW]	
1	180	120	149	398	0	TA warmtepomp $\eta_{ex} = 40\%$ verlies [kW] 0	1	180	200	190	510	45	
2							2					0	
3							3					0	
4							4					0	
Mechanisch [kW]							Mechanisch [kW]						
Brandstof [kW]							Brandstof [kW]						

Op basis van de opgedane ervaring bij de TAP is in Tabel 3 een investeringsbegroting van de warmtetransformator op gesteld en weergegeven.

Tabel 3 Investeringsbegroting thermoakoestische warmtetransformator

onderdeel	commerciële kostprijs 1MW _{th} / 469kW _{th}	
rookgaswisselaar TA motor + leidingen en pomp tussenmedium incl benodigde regelingen	100,000	
Behuizing TA motor en WP	50,000	
regenerator	4,000	
warmtewisselaars TA motor + TA warmtepomp (4 stuks)	20,000	
helium (kosten bij eenmalig afvullen tot 6 bar)	700	
Thermische olie	600	
koelwaterpomp en leidingen	7,000	
installaties tbv monitoring	7,000	
stoomgenerator	150,000	
regeltechniek	20,000	
divers	15,000	
TOTAAL	374,300	
specifieke investering aandrijving	374	€/kW _{th}
specifieke investering stoom	734	€/kW _{th}
Terugverdientijd	3.3	jaar

In overleg met de papierindustrie en Agentschap NL zal Innoforte in 2012 het commerciële perspectief van de warmtetransformator nader toetsen.