



Energy research Centre of the Netherlands

# Thermo-akoestische systemen voor energietoepassingen

S. Spoelstra

*Gepubliceerd in Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, februari 2010*

# Thermo-akoestische systemen voor energie-toepassingen

Dit artikel behandelt de ontwikkeling van thermo-akoestische technologie voor energiegerelateerde toepassingen. Daarbij wordt uitgelegd hoe de conversie van warmte naar akoestisch vermogen plaatsvindt en dat akoestisch vermogen kan worden gebruikt om warmte te pompen naar een hoger temperatuurniveau. Op basis van dit principe zijn toepassingen mogelijk die met gangbare technologie niet of nauwelijks mogelijk zijn. Grote charms van de technologie zijn het ontbreken van bewegende delen en de eenvoud van constructie. In combinatie met de conversierendementen die inmiddels zijn bereikt, biedt dit perspectief op een economisch rendabele technologie voor een diversiteit aan toepassingen. Simon Spoelstra

36

Thermo-akoestiek heeft betrekking op het fysische verschijnsel dat een temperatuurverschil een akoestische geluidsgolf kan opwekken en versterken en, omgekeerd dat een geluidsgolf in staat is een temperatuurverschil te creëren. Dit fenomeen mag zich de laatste jaren verheugen in een groeiende belangstelling, zowel vanuit de wetenschappelijke als vanuit de industriële wereld. Sinds ongeveer 1980 zijn diverse machines/apparaten ontwikkeld die op basis van dit principe werken. Lange tijd werd dit verschijnsel als een curiositeit beschouwd zonder concrete toepassingen. De ontwikkelingen van de laatste tien jaar laten echter zien dat de technologie wel degelijk perspectieven biedt op commerciële toepassingen. Dit artikel bespreekt het werkingsprincipe van thermo-akoestische systemen, de ontwikkeling daarvan, de prestaties van een recente ontwikkeling bij Energieonderzoek

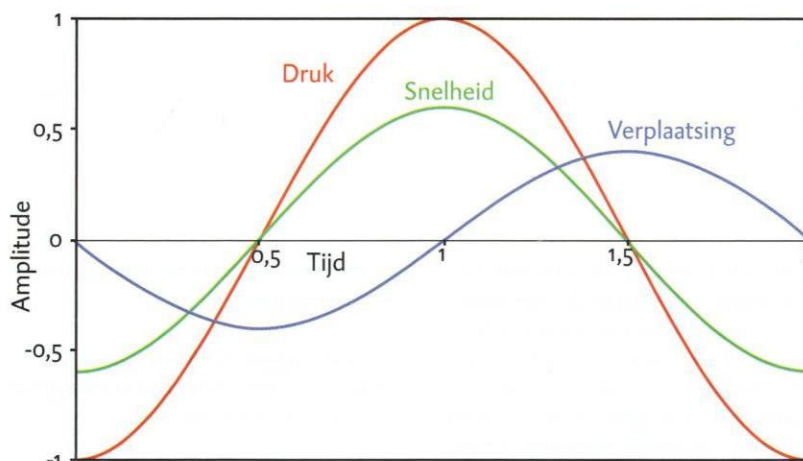
Centrum Nederland (ECN) en het perspectief op verdere ontwikkeling.

## Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe van de thermo-akoestische systemen die het voorbije decennium in ontwikkeling zijn, is gebaseerd op een Stirlingcyclus. Deze

cyclus werd in 1816 gepatenteerd door dominee Robert Stirling. De details van deze arbeidscyclus staan beschreven in het kader Stirlingcyclus.

In 1979 realiseerde de Amerikaan Peter Ceperley zich dat het faseverschil tussen druk en snelheid in de regenerator van een Stirlingmotor hetzelfde is als



Figuur 1 Druk, snelheid en verplaatsing van het gas bij een lopende geluidsgolf.

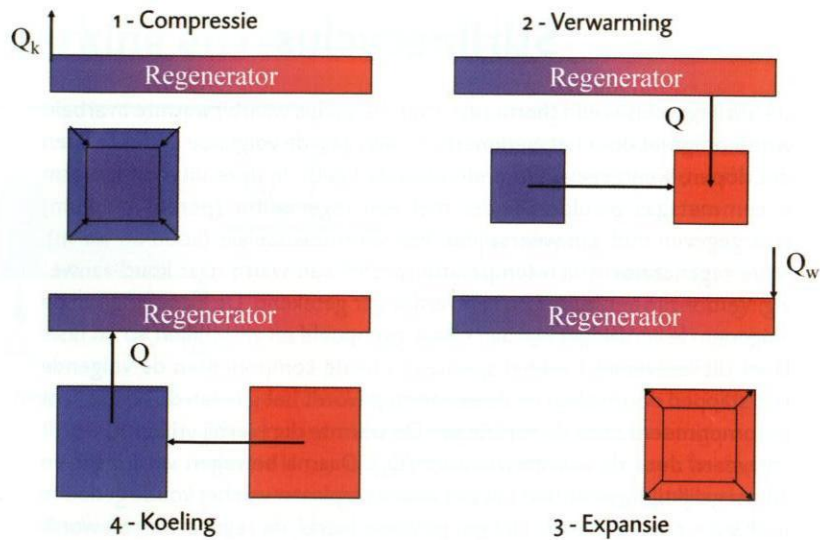
dat van een lopende geluidsgolf [1]. Een lopende geluidsgolf is een golf waarbij de druk en de snelheid van het gas in fase zijn. Dit in tegenstelling tot staande golven, zoals in orgelpijpen, waar dit faseverschil  $90^\circ$  is. Figuur 1 toont het tijdsverloop van druk, snelheid en verplaatsing bij een lopende golf.

Met deze timing van druk en snelheid, ondergaat een gaspakket in een regenerator dezelfde cyclus als een Stirlingcyclus. In figuur 2 zijn de vier stappen weergegeven die het gas in een regenerator doorloopt wanneer daar een lopende geluidsgolf passeert.

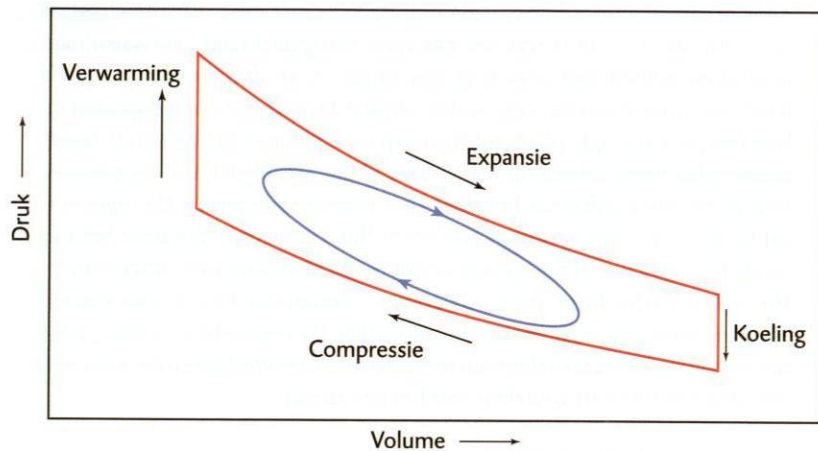
Het theoretische rendement van een Stirlingcyclus is het Carnotrendement, het maximaal haalbare rendement van een thermodynamische cyclus (zie kader *Versterking en rendement*). Figuur 3 geeft de cyclus weer in een druk-volumediagram. De rode lijn geeft de ideale cyclus weer, indien de vier stappen na elkaar zouden plaatsvinden. In werkelijkheid overlappen de vier stappen elkaar en zijn er stromingsverliezen in de regenerator, waardoor de blauwe ellips ontstaat. Het ingesloten oppervlak is de gegenereerde arbeid. Daar waar in een Stirlingmotor de arbeid in de beweging van de zuiger terug te vinden is, bevindt dit zich in een thermo-akoestische motor in de bewegingsenergie van de geluidsgolf, het akoestische vermogen.

Deze cyclus is ook in omgekeerde volgorde te doorlopen. In dat geval wordt akoestisch vermogen gebruikt om warmte te pompen van koud naar warm. Met behulp van dit principe kunnen dus zowel motoren, die warmte in arbeid omzetten, als warmtepompen, die arbeid gebruiken om warmte te pompen, worden gerealiseerd. Een groot verschil met conventionele motoren en warmtepompen is het ontbreken van bewegende delen.

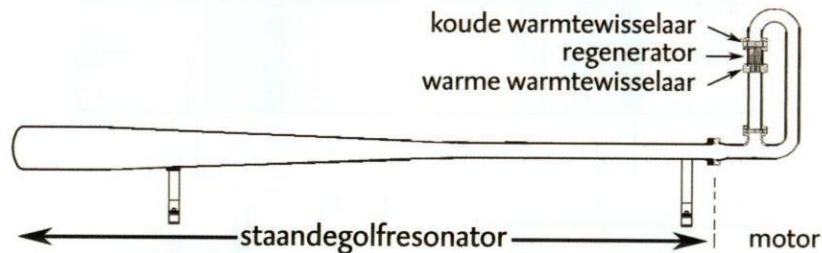
De pogingen van Ceperley om op basis van dit principe een daadwerkelijke motor te realiseren, leidden echter niet tot een succes. Hoewel hij in een ringresonator met de lengte van één golflengte aantoonde dat de versterkingsfactor van het akoestische vermogen afhangt van het temperatuurverschil, bleef de netto versterking kleiner dan één. De versterking van het akoestische vermogen was niet voldoende om de stromingsverliezen in de regenerator te compenseren. In een zuivere lopende golf zal de gassnelheid altijd



Figuur 2 Thermo-akoestische cyclus.



Figuur 3 PV-diagram van een thermo-akoestische cyclus.



Figuur 4 Lopendegolfmotor, gecombineerd met staandegolfresonator.

groot zijn daar waar de drukamplitude ook groot is. Destijds werd geconcludeerd dat het niet mogelijk was om op deze wijze een werkende motor te realiseren.

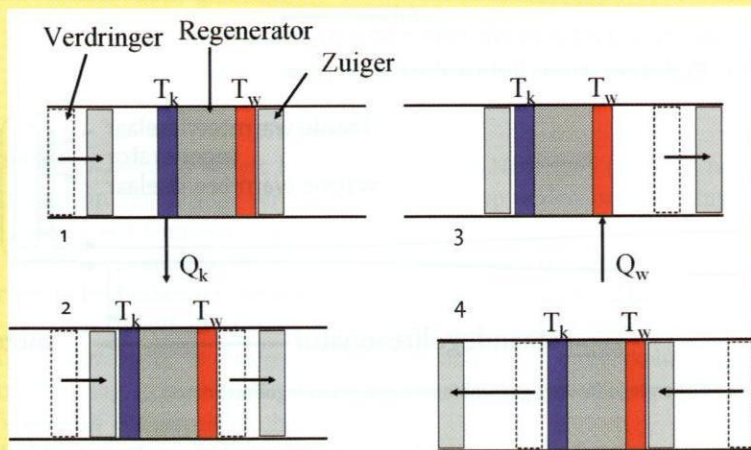
De volgende twintig jaar werd daarom een andere richting ingeslagen. Onder aanvoering van Los Alamos National Laboratories (LANL) werd aan zogenoemde 'staandegolfmachines' gewerkt. Hierin ondergaat het gas geen Stirlingcyclus en wordt geen regenerator maar een zogenoemde stack gebruikt. Een stack bevat veel grotere openingen voor het gas dan een regenerator waardoor de stromingsverlie-

zen veel minder zijn. De ontwikkeling van staandegolfmachines leidde tot daadwerkelijk functionele apparaten die bijvoorbeeld in de ruimtevaart (koeling van biologische experimenten) of op marineschepen (koeling elektronica) werden toegepast [2]. Nadeel van deze machines was het intrinsiek lage rendement. Tot een doorbraak van toepassingen van deze thermo-akoestische systemen is het niet gekomen.

De zoektocht naar een hogere efficiëntie leidde er toe dat aan het einde van de negentiger jaren de aanpak van Ceperley opnieuw werd overwogen.

## Stirlingcyclus

De Stirlingcyclus is een thermodynamische cyclus waarbij warmte in arbeid wordt omgezet door het werkmedium (een gas) de volgende cyclus te laten doorlopen, weergegeven in onderstaande figuur. In deze uitvoeringsvorm is een met gas gevulde cilinder met een regenerator (poreus medium) weergegeven met aan weerszijden een warmtewisselaar (koud en warm). In de regenerator is een temperatuurprofiel van warm naar koud aanwezig. Verder zijn een zuiger en een verdringer getekend. De beweging van de zuiger en de verdringer zijn aan elkaar gekoppeld en verschillen  $90^\circ$  in fase. Door dit faseverschil zal het gas tussen beide componenten de volgende vier stappen doormaken. In de eerste stap wordt het gas aan de koude kant gecompriëerd door de verdringer. De warmte die hierbij vrijkomt, wordt afgevoerd door de warmtewisselaar ( $Q_k$ ). Daarna bewegen verdringer en zuiger gelijktijdig waardoor het gas wordt verplaatst van het koude gedeelte naar het warme gedeelte. Het gas passeert hierbij de regenerator en wordt daardoor opgewarmd. De derde stap bestaat uit beweging van alleen de zuiger. Hierdoor wordt het gas aan de warme zijde geëxpandeerd. Tijdens deze expansie neemt het gas warmte op uit de warme warmtewisselaar ( $Q_w$ ). Als laatste stap wordt het gas weer terugverplaatst van warm naar koud door gelijktijdige beweging van zuiger en verdringer. Het gas geeft daarbij warmte af aan de regenerator. Omdat compressie van het gas aan de lage temperatuurzijde plaatsvindt en expansie bij hoge temperatuur, levert deze cyclus netto arbeid op. Dit proces vindt, afhankelijk van de gekozen frequentie, circa vijftig tot honderd keer per seconde plaats. De regenerator fungeert in deze cyclus als warmtebuffer. De warmte die door het gas op de heenweg wordt afgegeven, wordt op de terugweg weer opgenomen. Hoewel de cyclus in principe ook zonder regenerator kan, is voor een efficiënte cyclus een regenerator onontbeerlijk. De regenerator is doorgaans opgebouwd uit een stapeling van metaalvezels of metaalgazen die voor een zeer grote warmte-uitwisseling met het gas zorgen.



De bekende Stirlingcyclus is de basis geweest voor diverse ontwikkelingen die in enkele gevallen tot commercieel beschikbare machines hebben geleid. Voordelen van de Stirlingcyclus zijn: het intrinsiek hoge rendement, bedrijfszekerheid, geluidsarm en de mogelijkheid indirecte verwarming toe te passen. Tot een grote doorbraak is het tot op heden echter nooit gekomen. We staan echter wel aan de vooravond van de marktintroductie van microwarmtekrachtsystemen voor woningen op basis van een Stirlingmotor.

De oplossing voor het intrinsieke probleem waar Ceperley tegenaan liep, bleek achteraf eenvoudig, zo blijkt uit de volgende analyse. De vermogensproductie van de regenerator is evenredig met het product van druk- en snelheidsamplitude van het gas. De

stromingsverliezen in de regenerator zijn evenredig met het kwadraat van de gassnelheid. Analoog aan elektriciteitstransport door hoogspanningslijnen (waarbij vermogen wordt getransporteerd bij hoge spanning en (relatief) lage stroomsterkte) is de

truc hier de drukamplitude zeer groot maken en de snelheid juist zeer laag. Het product van beide blijft hetzelfde, maar door de veel lagere gassnelheid zijn de stromingsverliezen veel kleiner. De condities van een hoge drukamplitude met een lage gassnelheid treden op in de uiteinden van een standaard staandegolfresonator (bijvoorbeeld orgelpijp). Door deze condities te combineren met een akoestisch circuit dat zorgt voor het juiste faseverschil tussen druk en snelheid, worden de voordelen van lopende en staande golven gecombineerd.

In 1999 verscheen een artikel in *Nature* van de LANL-wetenschappers Backhaus en Swift waarin dit principe voor het eerst werd gepubliceerd [3]. In de patentliteratuur vinden we echter al eerder informatie over deze oplossing. In 1997 werd dit principe door de Nederlander Kees de Blok van Aster gepatenteerd [4]. Vanaf 2000 wordt door groepen die een hoog rendement van hun systemen nastreven, voornamelijk rond dit principe gewerkt.

Belangrijk voor het functioneren van het systeem is de juiste timing van het proces gegeven door het faseverschil tussen druk en snelheid. Dit wordt georganiseerd door het akoestische circuit rond de regenerator eenheid. Dit akoestische circuit bestaat uit een terugkoppellus die functioneert als een traagheid van het gas en een indrukbaar gasvolume (gasveer), zie figuur 4. Beide zorgen er voor dat een fase draaiing van  $90^\circ$  plaatsvindt tussen druk en snelheid ten opzichte van de staande golf. Dit zorgt voor de juiste condities ter plekke van de regenerator eenheid.

### Toepassingen

Als we in staat zijn om op efficiënte wijze warmte om te zetten in akoestisch vermogen en als we akoestisch vermogen kunnen gebruiken om warmte te pompen, wordt een groot aantal toepassingen rondom warmte-, koude- [5,6] en zelfs elektriciteitsproductie mogelijk. Steeds wordt daarbij een bron van akoestisch vermogen gekoppeld aan een component die akoestisch vermogen omzet in warmte/koude/elektriciteit. Aangezien als werkmedium in een thermo-akoestisch systeem vaak helium op hoge druk wordt toegepast, betekent dit dat er qua toepassingsgebied nauwelijks limiteringen zijn als gevolg van het werkmedium. Een warmtepomp op

## Versterking en rendement

Hieronder volgt een eenvoudige analyse om te laten zien dat het rendement van een thermo-akoestische conversie onder ideale condities (geen stromings- of warmteverliezen) gelijk is aan het Carnotrendement.

Het akoestische vermogen  $W_{ak}$  op een bepaalde positie in het systeem is gelijk aan

$$W_{ak} = p_1 U_1 \cos \varphi$$

Hierin is  $p_1$  de drukamplitude,  $U_1$  de volumesnelheidsamplitude en  $\varphi$  het faseverschil tussen beide grootheden.

De versterking van de geluidsgolf in een regenerator is theoretisch maximaal gelijk aan de temperatuurverhouding over de regenerator. Dit is eenvoudig te begrijpen door de massastroom door de regenerator constant te nemen en het volume in de regenerator te verwaarlozen. Dan is

$$\rho_k U_k = \rho_w U_w$$

waarin  $\rho_{k,w}$  en  $U_{k,w}$  de dichtheid en volumesnelheid aan de koude en warme kant zijn.

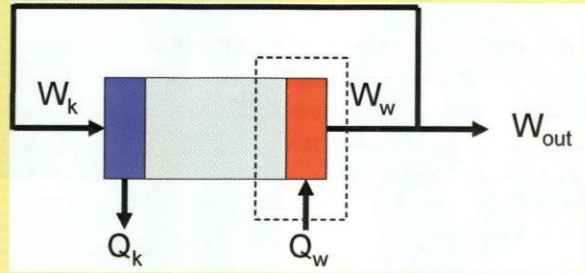
Met  $T_{k,w}$  als temperaturen aan de koude en warme kant, volgt volgens de ideale gaswet dat

$$\frac{\rho_k}{\rho_w} = \frac{T_w}{T_k}$$

Dat betekent dat

$$\frac{U_w}{U_k} = \frac{T_w}{T_k}$$

De volumesnelheid van het gas wordt dus versterkt door de temperatuurverhouding. Daarmee wordt ook het akoestische vermogen met dezelfde factor versterkt. Dus bij een temperatuur van 900 K aan de warme kant en 300 K aan de koude kant, vindt maximaal een drievou-



dige versterking plaats. Bij deze maximale versterking worden de verliezen in de regenerator verwaarloosd.

In nevenstaande figuur zien we de vermogensbalans van de regeneratoreenheid. Hierin staan

het inkomende akoestische vermogen  $W_k$  en het uitgaande vermogen  $W_w$  weergegeven. De netto vermogensproductie  $W_{out}$  van de motor is het verschil tussen beide, immers een gedeelte  $W_k$  van  $W_w$  wordt weer teruggevoerd naar de koude kant. Hierbij is weer aangenomen dat er geen verlies van akoestisch vermogen optreedt bij deze terugkoppeling.

Zoals net is afgeleid, is de vermogensversterking gelijk aan de temperatuurverhouding

$$W_w = \frac{T_w}{T_k} W_k$$

Voor de netto vermogensproductie kan dan geschreven worden

$$W_{out} = W_w - W_k = \left(1 - \frac{T_k}{T_w}\right) W_w$$

Als er een vermogensbalans wordt opgesteld voor de warme warmtewisselaar, dan volgt daar uit

$$Q_w = W_w$$

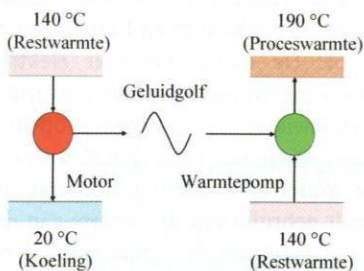
Het rendement van de motor wordt gegeven door de verhouding van het geproduceerde vermogen en de toegevoerde warmte. Voorgaande vergelijkingen combinerend leidt dit tot

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_w} = 1 - \frac{T_k}{T_w}$$

Het theoretische rendement van dit proces is dus gelijk aan het Carnotrendement.

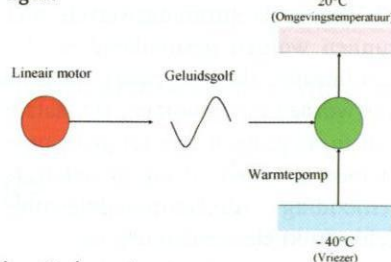
### Opwaardering restwarmte.

Door middel van restwarmte wordt akoestische energie opgewekt in een motor. In een warmtepomp wordt vervolgens met behulp van het akoestische vermogen restwarmte opgewaardeerd tot een nuttig temperatuurniveau. De geluidsgolf kan ook worden gebruikt om koeling te verzorgen.



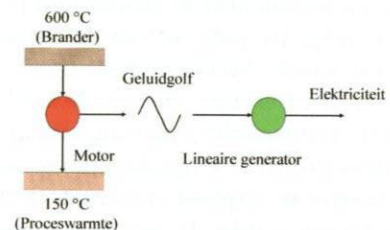
### Koeling.

Hierbij wordt een geluidsgolf opgewekt met behulp van een lineaire motor. Een lineaire motor zet elektrisch vermogen om in een heen- en weergaande beweging in plaats van een roterende beweging zoals een conventionele elektromotor. De heen- en weergaande beweging wordt met een zuiger omgezet in drukgolven (geluid). Het akoestische vermogen wordt in een warmtepomp gebruikt om koeling te bewerkstelligen.

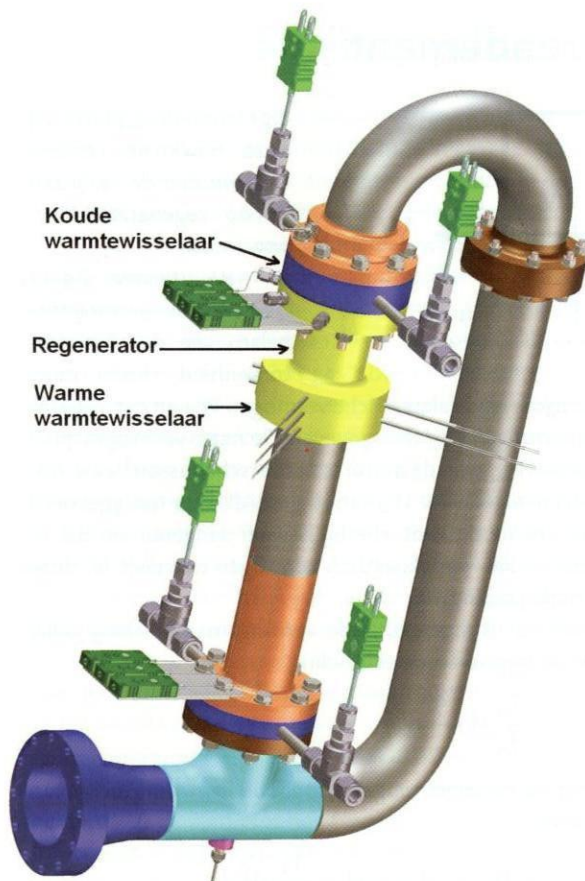


### Warmtekrachtkoppeling.

Een brander zorgt hier via een thermo-akoestische motor voor het akoestische vermogen en een lineaire generator voor het elektrische vermogen. Een lineaire generator is het omgekeerde van een lineaire motor. De restwarmte van de motor verzorgt de warmtevraag.



Figuur 5 Mogelijke toepassingen van thermo-akoestische systemen.



**Figuur 6** De thermo-akoestische motor van ECN die het wereldrecord verbrak en het thermisch rendement verhoogde naar 32%.



basis van dit principe kan dus voor een groot aantal toepassingen worden ingezet. Tevens zijn grote temperatuurliftten tot meer dan 100°C mogelijk, die met conventionele warmtepompen niet mogelijk zijn. De geluidssterkte binnen dit soort systemen is equivalent aan circa 170dB. Deze extreme geluidssterktes zijn echter buiten het systeem nauwelijks hoorbaar. Een drietal toepassingen zijn schematisch weergegeven in figuur 5. Daarnaast zijn er nog vele andere combinaties denkbaar.

### Modellering

De eerste theoretische beschouwing van het thermo-akoestische verschijnsel is gedaan door de Zwitser Rott [7] in 1969. Hij ging uit van de eendimensionale behoudswetten (massa, impuls en energie) en veronderstelde een harmonische oplossing. Vervolgens werden de vergelijkingen gelineariseerd en opgelost onder specifieke randvoorwaarden. De Amerikaan Swift heeft in de tachtiger jaren de theorie verder uitgewerkt [8,9]. Tegenwoordig worden simulatietools gebruikt voor het ontwerpen en

analyseren van thermo-akoestische systemen. Hiervoor kunnen verschillende methodes worden gebruikt. Het is bijvoorbeeld mogelijk gebruik te maken van het elektrische analogon. De akoestische componenten worden dan weergegeven door hun elektrische equivalenten. Het aldus opgestelde elektrische netwerk wordt met de daarvoor gebruikelijke software opgelost. De oplossing wordt vervolgens weer terugvertaald naar de akoestische gegevens.

Een tweede benadering gebruikt in feite de Rottbenadering. De veel toegepaste code DeltaEC [10] werkt op basis van deze benadering. Bij ECN wordt standaard met dit ontwerpgebedschap gewerkt. Deze code is ontwikkeld door het LANL. Nadeel van deze aanpak is dat meerdimensionale effecten zoals stromingswervels niet kunnen worden gesimuleerd en dat niet-lineaire (hogere orde) effecten niet worden meegenomen. Dit laatste lijkt in de praktijk niet tot grote problemen te leiden zolang de aandrijfverhouding (drukamplitude/gemiddelde druk) kleiner dan 10% is.

Een derde methode, die de laatste ja-

ren steeds meer wordt toegepast, is het gebruiken van commerciële Computational Fluid Dynamics (CFD) software [11]. Deze software gebruikt de volledige set meerdimensionale niet-lineaire vergelijkingen om onder de gegeven randvoorwaarden een oplossing te vinden. Omdat er tijdsafhankelijk moet worden gerekend, zijn dit soort berekeningen zeer rekenintensief. Ook de modellering van turbulentie in oscillerende stromingscondities is verre van triviaal.

### Wereldrecord thermo-akoestische motor

Door ECN is in 2008 een thermo-akoestische motor ontwikkeld met het hoogste rendement ter wereld. Figuur 6 toont een tekening en foto van deze motor. De motor gebruikt elektrische verwarmingselementen (warme warmtewisselaar) om warmte op een temperatuur van circa 550°C te leveren. Water op omgevingstemperatuur wordt gebruikt om de warmte aan de koude kant van de regenerator af te voeren (koude warmtewisselaar). De regenerator is opgebouwd uit een stapel fijnmazig geweven roestvrijstalen

Simon Spoelstra studeerde Technische Natuurkunde aan de Universiteit Twente. Vanaf 1989 is hij werkzaam bij het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). Sinds 2001 is hij projectleider voor de thermo-akoestische ontwikkelingen bij ECN.



spoelstra@ecn.nl

gasjes (maaswijdte = 90  $\mu\text{m}$ , draaddikte = 36  $\mu\text{m}$ ) met een diameter van 40 mm. Deze motor produceert 280 W akoestisch vermogen bij een warmtetoevoer van 880 W. Het thermische rendement bedraagt daarmee 32%. Onder de heersende temperatuurcondities correspondeert dit met een rendement van 49% van het maximale Carnotrendement. Dit is een verbetering met acht procentpunten ten opzichte van het vorige record van LANL uit 1999.

## Conclusies

Thermo-akoestische systemen werden gedurende lange tijd beschouwd als

systemen die voor specifieke niche toepassingen gebruikt zouden kunnen worden. Met name daar waar de eenvoud van constructie, ontbreken van bewegende delen en smering en het gebruik van een milieuvriendelijk werkmedium opwegen tegen een wat lager rendement. De nu bereikte rendementen maken echter veel meer toepassingen mogelijk van thermo-akoestische energieconversie. De technologie leent zich voor de productie van milieuvriendelijke koeling, voor gebruik van laagwaardige warmte (industriële restwarmte, zonnewarmte, geothermie) en de productie van nuttige warmte. Al deze toepassingen zijn gebaseerd op hetzelfde conversieproces. Grote charme van de technologie blijft het ontbreken van bewegende delen en de eenvoud van constructie, ondanks de complexe onderliggende fysica.

## Referenties

- 1 P. H. Ceperley, *Gain and efficiency of a traveling wave heat engine*, *Journal of the Acoustical Society of America* **72** (1982) 1688-1694.
- 2 S. L. Garrett, J. A. Adeff, en T. J. Hoffer, *Thermoacoustic refrigerator for space appli-*

- cations, Journal of Thermophysics and Heat Transfer* **7** (1993) 595-599.
- 3 S. Backhaus en G. W. Swift, *A thermoacoustic Stirling heat engine*, *Nature* **399** (1999) 335-338.
- 4 C. M. de Blok en N. A. H. J. van Rijt, *Thermoacoustic system*. WO 99/20957[NL98/00515]. 20-10-1997. Referentietype: Patent.
- 5 M. E. H. Tijani, *Thermo-akoestiek: koelen met geluid*, *NTvN* **67-12** (2001) 344-347.
- 6 M. E. H. Tijani en S. Spoelstra, *Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler*, *Cryogenics* **48** (2008) 77-82.
- 7 N. Rott, *Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes*, *Zeitschrift fur Angew. Math. Phys.* **20** (1969) 230-243.
- 8 G. W. Swift, *Thermoacoustic engines*, *Journal of Acoustical Society of America* **84** (1988) 1145-1180.
- 9 G. W. Swift, *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, *Acoustical Society of America*, Melville 2002.
- 10 W. C. Ward en G. W. Swift, *Design environment for low-amplitude thermoacoustic engines*. LA-CC-01-13. 22-9-2004. Referentietype: Rapport.
- 11 J. A. Lycklama à Nijeholt, M. E. H. Tijani, en S. Spoelstra, *Simulation of a traveling-wave thermoacoustic engine using computational fluid dynamics*, *Journal of the Acoustical Society of America* **118** (2005) 2265-2270.
- 12 S. Spoelstra, *Warmte wordt geluid*, [www.youtube.com/watch?v=MNtgVzBvMUU](http://www.youtube.com/watch?v=MNtgVzBvMUU).

Utrecht University is a place of learning that offers many widely varying disciplines. Where different areas meet or overlap, the developments are particularly interesting. At Utrecht University science never stops. Nor will your development.

Utrecht University urgently seeks applicants who can easily identify with this open, dedicated and multidisciplinary culture. Currently, we are looking for candidates for the following specific position:

## ASSISTANT/ASSOCIATE PROFESSOR PHYSICS OF DEVICES

The Debye Institute for Nanomaterials Science is searching for candidates to fulfill the position of assistant/associate professor within the group Physics of Devices. The relevant direction desired is the study of light-matter interaction in nanomaterials, with an eye to application-oriented research on photon energy conversion for sustainable electricity generation. Next to the required scientific and educational efforts your tasks include acquisition of research funds, attracting new students as well as administrative and management duties. You should have a physics or (nano)-materials science degree and a PhD in a relevant discipline such as experimental physics or materials science.

You have a proven scientific record in the field of thin-film and/or nanostructured devices as well as teaching experience.

Our ideal candidate is an inspiring and enthusiastic team player with excellent communication and organization skills.

The salary for this full-time position will range between € 3,636.- and € 4,970.- gross per month.

More information can be obtained from Professor R.E.I. Schropp, [r.e.i.schropp@uu.nl](mailto:r.e.i.schropp@uu.nl).

Please visit [www.uu.nl/vacancies](http://www.uu.nl/vacancies) for a complete job description.

Science never stops



Universiteit Utrecht