



⑩ A **Terinzagelegging** ⑪ **8300549**

Nederland

⑲ NL

- ⑤4 **Intrinsiek irreversibele warmtemotor.**
- ⑤1 Int.Cl.³: F25B 23/00, F25B 29/00.
- ⑦1 Aanvrager: United States Department of Energy te Washington, D.C.
- ⑦4 Gem.: Ir. H.J.G. Lips c.s.
Haagsch Octrooibureau
Breitnerlaan 146
2596 HG 's-Gravenhage.

- ②1 Aanvraag Nr. 8300549.
- ②2 Ingediend 14 februari 1983.
- ③2 Voorrang vanaf 30 november 1982.
- ③3 Land van voorrang: Ver. St. v. Am. (US).
- ③1 Nummers van de voorrangsaanvragen: , 445650 .
- ⑥2 - -

- ④3 Ter inzage gelegd 18 juni 1984.

De aan dit blad gehechte afdruk van de beschrijving met conclusie(s) en eventuele tekening(en) bevat afwijkingen ten opzichte van de oorspronkelijk ingediende stukken; deze laatste kunnen bij de Octrooiraad op verzoek worden ingezien.

Intrinsiek irreversibele warmtemotor.

De uitvinding heeft algemeen betrekking op warmtemotoren, waaronder warmtepompen alsook arbeids-
generatoren, en in het bijzonder akoestische warmte-
pompen, waarin geluid wordt gebruikt voor het voort-
5 brengen van de warmtestroom. De uitvinding is het
resultaat van een contract met het U.S. Department
of Energy (Contract No. W-7405-ENG-36).

De uitdrukking "warmtemotor", zoals hier
gebruikt, bedoelt in algemene zin inrichtingen, die
10 warmte omzetten in arbeid, dat wil zeggen arbeidsgenera-
toren alsook inrichtingen, waarin arbeid wordt verricht
voor het voortbrengen van een warmtestroom, zoals een
koelmachine. Aan dit laatste type inrichting wordt
hier gerefereerd als warmtepompen. De warmtemotor volgens
15 de onderhavige uitvinding wordt omschreven als "intrin-
siek irreversibel", omdat daarbij gebruik gemaakt wordt
van bepaalde warmte-overdrachtsprocessen, die in thermo-
dynamische zin intrinsiek irreversibel zijn. In tegen-
stelling met een gebruikelijke warmtemotor, die een
20 optimaal rendementsniveau bereikt, wanneer de warmte-
overdrachtsprocessen ervan op toenemend reversibele
wijze worden gevoerd, vereist de intrinsiek irreversibele
warmtemotor volgens de uitvinding als essentiële element
voor zijn bedrijf een irreversibel warmte-overdrachts-
25 proces, en het rendement van de motor vermindert daad-
werkelijk, naarmate het warmte-overdrachtsproces afwijkt
van een irreversibel proces. Deze kenmerken van de
uitvinding zullen in het onderstaande nader worden
besproken.

30 De uitvinding houdt verband met een fenomeen,
dat reeds in 1850 werd bestudeerd door de Europese
fysici Sondhauss en Rijke, waarbij geluid wordt gepro-
duceerd door het verhitten van het ene einde van een
glas- of metaalbuis. Dit en overeenkomstige fenomenen
35 werden reeds in 1878 besproken door Lord Rayleigh in
zijn verhandeling, getiteld Theory of Sound. Bij dit
fenomeen wordt warmte gebruikt voor het produceren van
arbeid in de vorm van geluid. Meer recentelijk zijn

8300549

complementaire fenomenen, gebaseerd op overeenkomstige principes, gedemonstreerd, waarbij arbeid wordt verbruikt, en warmte van de ene plaats naar de andere wordt gepompt. In tegenstelling met de algemene thermodynamische principes van gebruikelijke warmtemotoren, welke reeds meer dan een eeuw goed begrepen zijn, worden de principes, die ten grondslag liggen aan de bovengenoemde fenomenen en de uitgebreidheid of algemeenheid van gerelateerde fenomenen momenteel slechts onvolledig begrepen.

Een warmtepompverschijnsel, gerelateerd aan dat, dat hier wordt beschouwd, wordt vermeld in een publikatie door W.E. Gifford en R.C. Longworth, getiteld: "Surface Heat Pumping", gepubliceerd in International Advances in Cryogenic Engineering (Plenum Press, N.Y.), vol. 12, blz. 171-179 (1965). Het warmtepompfenomeen, gerapporteerd door Gifford en Longworth, is gebruikt in een warmtepompinrichting, bekend als pulsbuskoelmachine. Een dergelijke inrichting wordt beschreven in een reeks publikaties door Gifford e.a., waarvan de meest pertinente zijn: Gifford, W.E. en Longworth, R.C., "Pulse Tube Refrigerator", Trans. of the A.S.M.E., J. of Eng. for Industry, blz. 264-268 (1964); Gifford, W.E. en Longworth, R.C., "Pulse Tube Refrigeration Process", in International Advances in Cryogenic Engineering (Plenum Press, N.Y.) vol. 10, blz. 69-79 (1964); en Gifford, W.E. en Kyanka, G.H., "Reversible Pulse Tube Refrigeration", in International Advances in Cryogenic Engineering, vol. 12, blz. 619-630 (1966). Een andere verbandhoudende publikatie is van R.C. Longworth, getiteld "An Experimental Investigation of Pulse Tube Refrigeration Heat Pumping Rates", in International Advances in Cryogenic Engineering, vol. 12, blz. 608-618 (1966). Al deze bovengenoemde publikaties zijn gericht op een pulsbuskoelmachine, waarin een gas alternatief wordt gepompt in en geëvacueerd uit een holle pulsbus via een warmteregenerator. Het resultaat is, dat warmte wordt gepompt van het regenerator-einde van de pulsbus naar het gesloten einde. Warmte-wisselaars zijn gekoppeld aan de uiteinden van de bus, teneinde dit effect te benutten. Indien bijv. het warme einde wordt verbonden met een warmteput bij

omgevingstemperatuur, kan het koude einde worden gebruikt als koelmachine. Het zal duidelijk zijn, dat de pulsbus-koelmachine-inrichting verschilt van gebruikelijke koelmachine-apparatuur in die zin, dat er slechts één enkel gasvolume is, dat periodiek onder druk gebracht wordt in een gesloten kamer, en dat er veel is uitgespaard van de kleppen, smoororganen, en verdere organen, die gebruikt worden bij gebruikelijke koelinrichtingen. Zoals uit de verdere bespreking zal blijken, hebben de uitvinders een daaraan verwante klasse inrichtingen ontwikkeld, die sommige van dezelfde eigenschappen hebben, maar waarbij geen uitwendige warmteregenerator behoeft te worden gebruikt. Een andere inrichting uit de eerdere techniek, welke van bijzonder belang is in verband met een speciale uitvoeringsvorm van de onderhavige uitvinding, is een lopende-golfwarmtemotor, beschreven in het Amerikaanse octrooi 4.114.380 ten name van Ceperley, en in P.H. Ceperley, "A Pistonless Stirling Engine-the Traveling Wave Heat Engine", J. Acoust. Soc. Am. 66, 1508 (1979). Deze inrichting gebruikt een compressibel fluïdum in een buisvormig huis en een akoestische lopende golf. Het huis bevat een differentieel verhitte warmteregenerator. Warmte wordt toegevoegd aan het fluïdum aan één zijde van de regenerator en wordt uitgetrokken uit het fluïdum aan de andere zijde van de regenerator. De regenerator heeft een grote effectieve warmtecapaciteit in vergelijking met die van het fluïdum, zodat warmte kan worden opgenomen en teruggegeven zonder een grote temperatuurverandering. Het materiaal tussen de uiteinden van de regenerator wordt in lokaal warmte-evenwicht gehouden met het fluïdum, waardoor er voor gezorgd wordt, dat een temperatuurgradiënt in fluïdum in wezen constant blijft. De werking van deze inrichting is verschillend van die van de onderhavige uitvinding in verschillende opzichten. De inrichting van Ceperley gebruikt lopende akoestische golven, waarvoor de plaatselijke oscillerende druk P noodzakelijkerwijs gelijk is aan het produkt van de akoestische impedantie ρc (waarbij ρ de dichtheid en c de geluidssnelheid in het gas is) en de plaatselijke fluïdumsnelheid v op welk punt van de motor, waardoor visceuze verliezen op-

8300549

lopen tot uitzonderlijk hoge waarden, terwijl, zoals in het verdere zal worden besproken, een akoestische uitvoering van de onderhavige uitvinding gebruik maakt van staande akoestische golven, waarvoor de conditie

5 $P \gg p_{cv}$ kan worden bereikt, waardoor de verhouding van de thermodynamische tot visceus dissipatieve effecten wordt verhoogd. Lopende golven vereisen, dat er geen reflecties optreden in het systeem. Een dergelijke

10 conditie is moeilijk te bereiken, aangezien de warmte-regenerator werkt als een obstakel, dat de neiging vertoont de golven te reflecteren. Verder is een thermodynamisch efficiënt zuiver lopende-golf-systeem moeilijker te bereiken in technisch opzicht dan een staand golfsysteem. De inrichting van Ceperley vereist tevens,

15 dat het primaire fluïdum in uitstekend plaatselijk warmte-evenwicht is met de regenerator. Dit heeft het effect, dat het in nauwe zin analoog is gemaakt aan een Sterling motor. De eis voor de fluïdumgeometrie, die noodzakelijk is om een goed warmte-evenwicht te

20 geven, samen met de eis, dat $P = p_{cv}$ voor een lopende golf, resulteert noodzakelijkerwijs in een groot visceus verlies (uitgezonderd in fluïda met zowel een uitzonderlijk laag Prandtl nummer en een hoge thermo-

25 dynamische activiteit, die onbekend zijn). Zoals in het onderstaande besproken, gebruikt de onderhavige uitvinding onvolmaakt warmtecontact met een tweede medium als wezenlijk element voor het warmtepompproces. Als gevolg behoeft een motor, vervaardigd in overeen-

30 stemming met de onderhavige uitvinding, niet noodzakelijkerwijs de hoge visceuze verliezen te hebben van de lopende-golfmotor van Ceperley.

Het Amerikaanse octrooischrift 3.237.421 ten name van Gifford beschrijft de warmtepompinrichting, besproken in de hiervoor geciteerde artikelen van

35 Gifford e.a. Zoals reeds opgemerkt, verschilt de onderhavige uitvinding van de Gifford inrichting in de eerste plaats doordat de regenerator, die vereist is in de Gifford inrichting tussen de drukbron en de puls-buis van de inrichting, niet nodig is in de onderhavige

40 uitvinding; en dat de Gifford inrichting het nuttige

8300549

thermodynamische effect optreedt in de open of "pulse"-
buis, terwijl bij de onderhavige uitvinding het nuttige
thermodynamische effect optreedt in een tweede medium.
Het opnemen van een regenerator bij de onderhavige uit-
5 vinding zou de prestatie ervan omlaag brengen als gevolg
van dezelfde visceuse verhittingsproblemen, welke de
inrichting van Ceperley karakteriseren. Verder vereist
de inrichting van Gifford beweegbare afdichtingen, terwijl
sommige uitvoeringen van de onderhavige uitvinding dit
10 niet behoeven. Verder beperken de warmte-overdrachts-
snelheden in de Gifford inrichting het bedrijf ervan tot
lage frequenties en bijgevolg kan het niet de hoge
energiedichtheden bereiken, die mogelijk zijn bij de
onderhavige uitvinding.

15 Dienovereenkomstig is het een doel van de
onderhavige uitvinding om een warmtemotor te verschaffen,
die is gebaseerd op een intrinsiek irreversibel warmte-
overdrachtsproces. In dit opzicht is het een doel om
een dergelijke motor te verschaffen, die, hoewel gebaseerd
20 op een irreversibel warmte-overdrachtsproces, functioneel
reversibel is in die zin, dat de inrichting kan werken
of als warmtepomp of als arbeidsgenerator.

Het is verder een doel van de uitvinding om
een akoestisch aangedreven warmtepomp te verschaffen.

25 Een ander doel van de uitvinding is het
verschaffen van een warmtemotor, die geen beweegbare
afdichtingen heeft.

Het is verder een doel van de uitvinding om
de noodzaak te elimineren voor uitwendig mechanische
30 traagheidsinrichtingen zoals vliegwielen of compressoren
in een warmtepomp, in het bijzonder een warmtepomp,
geschikt voor gebruik als koelmachine.

Verdere doeleinden, voordelen en nieuwe
aspecten van de uitvinding zullen gedeeltelijk worden
35 uiteengezet in de volgende beschrijving, en gedeeltelijk
de vakman duidelijk worden na bestudering van het
volgende, of worden geleerd door het in praktijk brengen
van de uitvinding. De doeleinden en voordelen van de
uitvinding kunnen worden gerealiseerd en bereikt door
40 middel van de middelen en combinaties, die in het bijzonder

8300549

aangegeven zijn in de conclusies.

Teneinde het voorgaande en andere doeleinden te bereiken, en in overeenstemming met de doeleinden van de onderhavige uitvinding, zoals hier belichaamd en
5 in ruime zin beschreven, omvat de intrinsiek irreversibele warmtemotor volgens de uitvinding een eerste thermodynamisch medium en een tweede thermodynamisch medium, die in onvolmaakt warmtecontact met elkaar zijn, en die een verbroken thermodynamische symmetrie ten opzichte van
10 elkaar bezitten.

Het eerste medium is beweegbaar op heen en weer gaande wijze ten opzichte van het tweede medium. Verder wordt door de heen en weergaande beweging van het eerste medium, of gaat daarmee vergezeld, een temperatuur-
15 verandering, die optreedt in het eerste medium, zodat de temperatuur van het eerste medium varieert als functie van zijn plaats. Met de uitdrukking, dat de eerste en tweede media een verbroken thermodynamische symmetrie ten opzichte van elkaar bezitten, wordt bedoeld, dat de
20 gemiddelde warmteflux per lengte-eenheid tussen de twee media, genomen in een richting loodrecht op de weg van de heen en weergaande verplaatsing van het eerste medium ten opzichte van het tweede medium, toeneemt langs de weg van de heen en weergaande beweging in een eerste
25 gebied en afneemt langs de weg van heen en weergaande beweging in het tweede gebied. Indien deze gemiddelde warmteflux per eenheidslengte constant is, wordt gezegd dat er thermodynamische symmetrie is; indien niet, geldt, dat de thermodynamische symmetrie is verbroken.
30 In een algemene toepassing wordt verbroken thermodynamische symmetrie bereikt door het opleggen van een discontinue of snel veranderende warmteconductantie per eenheidslengte tussen de eerste en tweede media.

De motor is funktioneel reversibel in praktische
35 toepassing in die zin, dat zij kan worden gebruikt of als warmtepomp, of als arbeidsgenerator.

Wanneer gebruikt als warmtepomp, omvat de motor een drijforgaan voor het tot stand brengen van de heen en weergaande beweging van het eerste medium ten
40 opzichte van het tweede medium bij een frequentie, die

bij benadering omgekeerd evenredig is aan de warmte-relaxatietijd van het eerste medium ten opzichte van het tweede medium. Een dergelijke heen en weergaande beweging, samen met de cyclische variatie in de druk en temperatuur van het eerste medium, resulteert in de voortbrenging van een temperatuurverschil, of een temperatuurgradiënt, in het tweede medium. Meer in het bijzonder wordt het tweede medium relatief warmer in die gebieden, waar de gemiddelde warmteflux per eenheidslengte tussen de twee media afneemt in de richting van de component van heen en weergaande beweging van het eerste medium, die wordt verkregen door een toename in de temperatuur van het eerste medium. Omgekeerd wordt het tweede medium relatief koeler in die gebieden, waar de gemiddelde warmteflux per eenheidslengte tussen de twee media toeneemt in de richting, waarin het eerste medium wordt verhit. In een kenmerkende warmtepomptoepassing is het tweede medium zodanig geconstrueerd, dat het oppervlaktegebied ervan per eenheidslengte abrupt toeneemt aan één punt en abrupt afneemt aan een ander punt. Bij deze punten treden geprononceerde koel- en verwarmingseffekten op in het tweede medium. Deze effecten kunnen worden benut door het tweede medium te verbinden met geschikte warmtewisselaars. Indien bijv. het gedeelte van het tweede medium, dat verhitting ondergaat, wordt verbonden met een warmteput, kan het gedeelte, dat de relatieve koeling ondergaat, worden gebruikt als koelinrichting.

De warmtemotor kan worden gebruikt als arbeidsgenerator door selectief gedeelten van het tweede medium te verhitten en te koelen teneinde een differentiële temperatuurverdeling voort te brengen in het tweede medium, welke tegengesteld is aan die, welke wordt verkregen, wanneer de motor wordt gebruikt als een warmtepomp. Bij verhitting op deze wijze kan het eerste medium worden gedreven in heen en weergaande beweging bij een frequentie, die wordt bepaald door de geometrie van de inrichting, de mechanische belasting aan de inrichting, en de warmterelaxatietijd van het eerste medium tot het tweede medium.

Gifford en Longworth hebben de processen

8300549

beschreven, die optreden in hun inrichtingen, in termen van een concept, genoemd "surface heat pumping". Het woord "surface" impliceert hier het bestaan van zowel een secundair als een primair medium, die in aanraking met elkaar zijn, waarbij het secundaire medium de fundamentele kwaliteit is, ingevoerd in warmtemotoren door Robert Stirling in zijn octrooi van 1816. Aangezien de onderhavige intrinsiek irreversibele inrichtingen kwaliteiten hebben, die additioneel zijn aan die van de Stirling motor, en kunnen worden gebruikt niet alleen voor het pompen van warmte, maar ook voor het verrichten van uitwendige arbeid, wordt hier geprefereerd de onderhavige motoren te beschrijven in termen van het meer geschikte, en nieuwe concept van verbroken thermodynamische symmetrie.

Bij een kenmerkende uitvoering van de uitvinding is het eerste thermodynamische medium gas en het tweede thermodynamische medium een vast materiaal. Een eenvoudige wijze om de thermodynamische symmetrie tussen dergelijke media te verbreken, bestaat eruit, dat het tweede medium zodanig wordt geconstrueerd, dat er een abrupte verandering (toename of afname) is in de hoeveelheid tweede medium, dat in contact is met het eerste medium over de as van verplaatsing van het eerste medium. Op dit punt zal een thermodynamisch effect optreden, waarbij het teken van dit effect (verwarming of koeling) er van afhangt, of de hoeveelheid tweede medium in contact met het eerste medium vermindert of toeneemt in de richting, waarin het eerste medium toeneemt in temperatuur in zijn heen en weergaande beweging.

In zijn meest eenvoudige vorm omvat een warmtepomp, geconstrueerd in overeenstemming met de onderhavige uitvinding, een gesloten cilinder, die een gas bevat, drijfmiddelen voor het alternatief comprimeren en expanderen van het gas van het ene einde van de cilinder, zoals een eenvoudig heen en weergaande zuiger of alternatief een akoestische drijver; en een tweede thermodynamisch medium (waarbij het gas het "eerste" thermodynamische medium is), gelegen binnen

8300549

de cilinder. Het tweede thermodynamische medium heeft structurele eigenschappen, die in sommige opzichten overeenkomstig zijn aan die aan een warmteregenerator. Bij één uitvoering bestaat het tweede thermodynamische medium bijv. uit een stel evenwijdige platen, die op afstand van elkaar gelegen zijn en zich uitstrekken parallel aan de lengte-as van de cilinder. Bij een andere uitvoering bestaat het tweede thermodynamische medium uit een stel maasroosters, op onderlinge afstand gelegen over de as van de cilinder. Hoewel elk van deze structuren kan functioneren als een warmteregenerator in een andere toepassing, hebben de uitvinders gevonden, dat, wanneer een dergelijke structuur wordt gebruikt in de inrichting volgens de onderhavige uitvinding, dit resulteert in een warmtepompeffekt, dat in tegenstelling met de functie van een regenerator, onvolmaakt warmte-contact vereist tussen het gas en het aangrenzende vaste medium.

Het tweede thermodynamische medium kan algemeen worden gedefinieerd als een medium met een lage impedantie voor fluïdumstroom; een hoge warmteweerstand in longitudinale richting, of de richting van de fluïdumstroom; een hoge oppervlakte/volumeverhouding; en, teneinde een efficiënte warmtemotor te vormen, een adequaat grote combinatie van soortelijke warmte en warmtegeleidingsvermogen, teneinde het in staat te stellen om warmte te absorberen van of af te geven aan het primaire medium, naar dit vereist wordt. Aan deze laatste eis wordt voldaan door vrijwel alle vaste materialen, wanneer het primair medium een gas is, en de bedrijfstemperaturen niet te laag zijn.

De uitvinders hebben ontdekt, dat, wanneer aan de bovengenoemde voorvereisten is voldaan, het tweede thermodynamische medium een geprononceerde verhitte ondergaat aan het einde ervan, dat afgelegen is van het drijforgaan, en een geprononceerde koeling ondergaat aan het einde ervan, dat het dichtst gelegen is bij het drijforgaan. Dit effect wordt verkregen ongeacht op welke plaats langs de cilinder het tweede thermodynamische medium is gelegen (zolang de lengte

van de inrichting kleiner is dan een kwart golflengte), hoewel de grootte van het effect toeneemt met toenemende afstand tussen het gesloten einde en het gebied, waar de thermodynamische symmetrie is verbroken. Bovendien
5 wordt het effect verkregen zelfs, waar de lengte van het tweede thermodynamische medium aanzienlijk kleiner is dan dat gedeelte van de lengte van de cilinder, dat het minimum volume van het fluïdum in elke cyclus representer-
teert.

10 De verwarmings- en koeleffecten, waargenomen aan de tegenover gelegen einden van het tweede thermodynamische medium, kunnen worden benut door het thermisch koppelen van de uiteinden van het tweede thermodynamische medium met geschikte warmtewisselaars. Het warme einde
15 van het tweede thermodynamische medium kan bijv. worden gekoppeld aan een of andere geschikte warmteput, teneinde zodoende het koude einde te gebruiken als koelinrichting.

De uitvinders hebben tevens ontdekt, dat het rendement van de inrichting met betrekking tot warmte-
20 overdracht aan en van warmtereservoirs verder kan worden verhoogd door het tweede thermodynamische medium te construeren uit twee verschillende materialen. Een eerste materiaal, dat een hoog warmtegeleidingsvermogen bezit, bijv. koper, wordt gebruikt aan de tegenover gelegen
25 einden van het tweede medium. Dit materiaal wordt gebruikt voor het verkrijgen van een maximale warmteoverdracht in transversale richtingen tussen de einden van het medium en de aangrenzende cilinderwanden en de warmtewisselaarsorganen. Een tweede materiaal wordt
30 gebruikt voor het construeren van het medium tussen de tegenover gelegen einden. Dit tweede materiaal is zodanig gekozen, dat dit een veel lager warmtegeleidingsvermogen heeft dan het eerste materiaal, waardoor de
35 volgens de lengterichting verlopende geleiding van de warmte over het medium tot een minimum wordt teruggebracht van het hete einde naar het koude einde. Het is verder belangrijk, dat het produkt van de warmtecapaciteit en het warmtegeleidingsvermogen van het tweede medium groter is dan dat van het gas. In de tot nog toe beschreven
40 eenvoudige uitvoering zijn fiberglas of polymeerstrippen

8300549

geschikte voorbeelden. Een dergelijk materiaal is werkzaam voor het absorberen van warmte van en vrijgeven van warmte aan het fluïdum gedurende elke cyclus, waardoor de totale energie-overdracht wordt vergemakkelijkt.

- 5 Een soortgelijk proces is beschreven door Gifford en Longsworth in International Advances in Cryogenic Engineering, vol. 11, blz. 171 (1965), dat in het voorgaande reeds werd geciteerd.

In overeenstemming met één verklaring van
10 dit fenomeen, gebaseerd op verbonden bewegingen van de zuigers, beschouwe men een incrementeel volume gas, dat wordt gecomprimeerd en gedreven naar het gesloten einde van de cilinder gedurende elke compressieslag van de zuiger. De beweging is snel en het gas wordt vrijwel adia-
15 batisch gecomprimeerd, waardoor de temperatuur ervan stijgt. Aan het einde van de compressieslag is er een pauze, gedurende welke het verhitte gasincrement warmte overdraagt naar het onmiddellijk aangrenzende oppervlak van het tweede thermodynamische medium, waardoor de temperatuur
20 van het medium aan dat punt stijgt. In de volgende stap in de cyclus wordt het gasincrement snel geëxpandeerd, bij benadering adiabatisch, en tijdens deze expansie verplaatst het gas zich door de cilinder naar de zuiger, die wordt afgekoeld tot een lagere temperatuur. Aan het
25 einde van de slag is er wederom een pauze, gedurende welke het gasincrement warmte absorbeert van het oppervlak van het onmiddellijk aangrenzende thermodynamische medium, waardoor dit wordt gekoeld. Hiermee is één volledig cyclus van de motor voltooid. Alle fluïdumincrementen binnen
30 het tweede thermodynamische medium ondergaan hetzelfde soort cyclus, zodat het netto resultaat is, dat warmte wordt overgedragen van het ene einde van het medium naar het andere einde. Binnen het gebied van het tweede
35 medium kan er een kleine netto-verhitting zijn aan alle punten, maar aan de einden van het medium, waar de thermodynamische symmetrie is verbroken, zijn er netto-warmte-overdrachtseffekten, die resulteren in geprononceerde verwarmings- en koeleffekten. Aan het einde, dat het dichtst nabij is aan het gesloten einde van de
40 cilinder, wordt warmte toegevoegd, teneinde de temperatuur

van het tweede medium te doen stijgen, en aan het tegenover gelegen einde wordt het medium gekoeld.

De frequentie, waarbij de inrichting werkt, is een belangrijke faktor, die de prestatiefaktor of het rendement van de inrichting bij het pompen van warmte beïnvloedt. Dit kan op de meest eenvoudige wijze worden verklaard door het vergelijken van het hierboven beschreven warmte-overdrachtsproces met hetgeen, dat gebeurt bij of zeer hoge, of zeer lage frequenties. Indien de frequentie van het onder druk brengen voldoende laag is, geschieden de expansie en compressie van het fluïdum langzaam en nagenoeg isotherm ten opzichte van het tweede thermodynamische medium in plaats van adiabatisch. Indien bijv. de compressiefase van de cyclus langzaam wordt uitgevoerd, wordt continu warmte overgedragen aan de wanden van de cilinder, als het fluïdum wordt gecompri-meerd en door de cilinder gedreven. Aan het einde van de compressieslag is de temperatuur van het fluïdum niet hoger dan die van de aangrenzende cilinderwand, en er treedt geen warmte-overdracht op aan dit punt in de cyclus. Gedurende de daarop volgende expansie van het fluïdum in de volgende fase van de cyclus koelt het fluïdum progressief af, wanneer het zich verplaatst langs het medium, en extraheert op continue wijze exact dezelfde hoeveelheid warmte, die was afgeleverd in de voorgaande fase. Het belangrijke aspect van deze hypothetische, zeer langzame cyclus is, dat het fluïdum steeds in thermisch evenwicht is met de wanden van het tweede medium. Indien de frequentie voldoende hoog is, is er onvoldoende tijd aan het einde van elke slag van de zuiger om een meetbare warmte-overdracht te doen plaatsvinden tussen het fluïdum en de cilinderwand. Indien evenwel de frequentie inligt tussen deze isotherme en adiabatische uitersten, treedt zowel expansie als compressie van het fluïdum op met enige warmte-overdracht tussen fluïdum en de cilinderwanden, en het warmte-pompproces, zoals boven beschreven, kan plaatsvinden. Zodoende vermindert de prestatiefaktor van de inrichting bij zowel hoge frequenties als lage frequenties. Bij een bepaalde tussengelegen frequentie is er een optimale

prestatiecoëfficiënt voor elke gegeven inrichting.

Eén effect van het gebruiken van het tweede thermodynamische medium van het bovenbeschreven type is, dat de frequentie, waarbij de optimale prestatiefactor optreedt, veel hoger is, dan die, welke kan worden bereikt met een pulsbuskoelmachine, die niet zo'n tweede thermodynamisch medium heeft. In facto heeft deze ontdekking het de uitvinders mogelijk gemaakt om een efficiënte warmtepompmotor te ontwikkelen, die werkt bij akoestische frequenties. Eén primair voordeel van een dergelijke motor is, dat een zeer eenvoudige elektrisch aangedreven akoestische drijver kan worden gebruikt voor het drijven van de motor, waardoor de mechanische problemen worden weggenomen, die geassocieerd zijn met heen en weergaande zuigers, krukassen, bewegende fluïdumafdichtingen, vliegwielen enz. Een ander primair voordeel van het werken bij hoge frequenties is, dat de energiedichtheid van de inrichting kan worden verhoogd in vrijwel direkte evenredigheid aan de werkfrequentie, waardoor het mogelijk wordt gemaakt om een compacte warmtepomp of koelmachine te vervaardigen met een grotere energiedichtheid en prestatiefactor dan tot nog toe bekende overeenkomstige inrichtingen.

Aangezien de onderhavige uitvinding is gebaseerd op processen, die slechts worden uiteengezet in termen van niet-evenwichtsthermodynamica, is de warmtemotor intrinsiek irreversibel in thermodynamische zin. Tegelijk is de uitvinding evenwel funktioneel reversibel in praktische toepassing, in die zin, dat een inrichting, gebouwd in overeenstemming met de uitvinding, mechanisch kan worden gedreven teneinde te funktioneren als een warmtepomp, of kan worden gekoppeld aan warmte- en koudebronnen, teneinde te funktioneren als een arbeidsgenerator.

Volgens een bijzonder aspect van de uitvinding, zoals in het bovenstaande uiteengezet, is er voorzien in een akoestische warmtepompmotor, die een buisvormig huis bevat, bijv. een recht, U- of J-vormig buisvormig huis. Eén eind van het huis is van een kap voorzien en het huis is gevuld met een compressibel fluïdum, in staat om een akoestische staande golf te onderhouden. Het

8300549

andere einde is gesloten met de inrichting zoals de
membraan en stemspoel van een akoestische drijver voor
het genereren van een akoestische golf in het fluïdummedium.
In een voorkeursuitvoering wordt een inrichting zoals een
5 druktank gebruikt voor het leveren van een gekozen druk
aan het fluïdum binnen het huis. Een tweede thermodynamisch
medium is aangebracht binnen het huis nabij, maar op af-
stand gelegen van, het van een kap voorziene einde, teneinde
warmte te ontvangen van het fluïdum, dat daar doorheen ver-
10 plaatst wordt gedurende de tijd van toenemende druk van
golfcyclus en warmte over te geven aan het fluïdum, wanneer
de druk van het gas afneemt gedurende het geschikte deel
van de golfcyclus. Het onvolmaakte warmtecontact tussen
het fluïdum en het tweede medium resulteert in een fase-
15 verschuiving, die verschilt van 90° , tussen de plaatselijke
fluïdumtemperatuur en zijn plaatselijke snelheid. Als
gevolg hiervan is er een temperatuurverschil over de lengte
van het medium en in het geval van de voorkeursuitvoering
in wezen over de lengte van de kortere steel van het J-
20 vormige huis. Warmteputten en/of warmtebronnen kunnen zijn
geïncorporeerd voor toepassing bij de inrichting van de
uitvinding al naar dit geschikt is voor koelings- en/of
verhittingsdoeleinden.

De uitvinding zal thans nader worden toegelicht
25 aan de hand van uitvoeringsvoorbeelden onder verwijzing
naar de tekening. In de tekening toont:

fig. 1 een zijaanzicht in dwarsdoorsnee van
een eenvoudige voorkeursuitvoering van de uitvinding,

fig. 2 een eindaanzicht in dwarsdoornee van
30 de uitvoering van fig. 1, genomen volgens II-II van fig. 1,

fig. 3 een eindaanzicht in dwarsdoorsnee van
de uitvoering van fig. 1, genomen volgens III-III van fig. 1,

fig. 4 een vlak aanzicht in dwarsdoorsnee van
de uitvoering getoond in fig. 1, genomen volgens IV-IV van
35 fig. 3,

fig. 5 een isometrisch aanzicht van een
testinrichting, voorzien van thermokoppels A t/m E,
geplaatst over een centrale plaat van het tweede thermo-
dynamische medium,

40 fig. 6 een grafiek van temperatuur als functie

8300549

van de tijd voor de vijf thermokoppels van fig. 5,

fig. 7 een grafiek van de temperatuur als
functie van de tijd voor een paar thermokoppels, geplaatst
aan de tegenover gelegen einden van een testinrichting,
5 overeenkomstig aan die, getoond in fig. 5,

fig. 8 een schematische karakteristiek van
de energiestroom $\dot{H}(z)$ als functie van de plaats binnen
een uitvoeringsvorm van de uitvinding zoals getoond in
fig. 5, genomen direkt nadat de akoestische energie is
10 omgekeerd en voordat er zich een temperatuurgradiënt heeft
ontwikkeld in het tweede medium,

fig. 9 een isometrisch aanzicht van een
tweede uitvoeringsvorm van de uitvinding, waarbij het
tweede thermodynamische medium bestaat uit een stel
15 draadmaasroosters,

fig. 10 een zijaanzicht van de uitvoerings-
vorm, getoond in fig. 9, en

fig. 11 een dwarsdoorsnede-aanzicht van een
voorkeursuitvoering van een akoestisch gedreven warmte-
20 pomp, geconstrueerd in overeenstemming met de uitvinding.

De fig. 1-4 tonen schematisch een eenvoudige
uitvoering van een warmtepomp, geconstrueerd in overeen-
stemming met de onderhavige uitvinding.

De warmtepomp bestaat uit een cilindrisch
25 huis 10, dat een gesloten einde 10A heeft, en een
zuiger 12, die verschuifbaar is gepositioneerd in het
open einde daarvan. De zuiger 12 is via een polspen
(wrist pin) 13 verbonden door een stang 14 met een krukas
16. De krukas is verbonden met elke geschikte bron
30 van mechanisch vermogen teneinde de zuiger 12 aan te
drijven in heen en weergaande beweging binnen het
cilinderhuis 10.

De cilinder 10 bevat gas, bijv. helium,
dat een eerste thermodynamisch medium vormt, en dat
35 afwisselend wordt gecomprimeerd en geëxpandeerd door
de heen en weergaande beweging van de zuiger 12.

De zuiger 12 verplaatst zich in heen en
weergaande beweging tussen de standen A en B, getoond
in fig. 1. Wanneer de zuiger 12 zich bevindt in zijn
40 positie A, is het gas op zijn maximale volume, en

8300549

wanneer de zuiger 12 is in de positie B, is het gas gecompriëerd tot zijn minimale volume en maximale druk.

5 Een tweede thermodynamisch medium 16 is gelegen binnen het cilinderhuis 10 aangrenzend aan het gesloten einde 10a. Het tweede medium 16 bestaat uit een stel parallelle, op onderlinge afstand gelegen platen 18. Elke plaat 18 is algemeen rechthoekig in configuratie en strekt zich longitudinaal uit binnen
10 het cilinderhuis 10 vanaf een punt aangrenzend aan het gesloten einde 10a tot een punt juist kort voor de positie B, welke de positie van maximale verplaatsing van de zuiger 12 representeert. De dikte van elk der platen 18 is overdreven in de figuren terwille van de
15 illustratie.

Elke plaat 18 bestaat uit drie delen: kopereindsecties 18a en 18b, en een fiberglas-tussen-gelegen sectie 18c. De eindsecties 18a en 18b strekken zich uit volledig langs het cilinderhuis 10 en zijn
20 vastgesmolten aan de wanden van het cilinderhuis 10, teneinde warmtegeleiding tussen het huis 10 en de eindsecties te verhogen. Elke tussengelegen fiberglas-sectie 18c heeft een relatief kleinere breedte dan de respectievelijke eindsecties 18a en 18b, zodat
25 de randen van elke tussengelegen sectie 18c op afstand gelegen zijn van de wanden van het cilinderhuis 10.

De warmtemotor van de fig. 1-4 omvat verder warmtewisselaars 20 en 22, die het cilinderhuis 10 omringen aangrenzend aan de eindsecties 18a en 18b
30 van het tweede thermodynamische medium 16. De warmtewisselaar 20 is bedoeld als de koude warmtewisselaar, en de warmtewisselaar 22 is bedoeld als de warme warmtewisselaar voor redenen, die in het onderstaande duidelijk zullen worden.

35 Bij bedrijf wordt de zuiger 12 aangedreven door de krukas 16 in heen en weergaande beweging, teneinde het gas, aanwezig in de cilinder 10, afwisselend te comprimeren en te expanderen. Als gevolg van een dergelijke operatie worden de eindsecties 18a van het tweede
40 thermodynamische medium koud, terwijl de eindsecties 18b

8300549

warm worden ten opzichte van hun gemeenschappelijke omringende uitgangstemperatuur. Teneinde de inrichting te bedrijven als een koelmachine kan de warme warmtewisselaar 22 worden gekoeld door elk geschikt middel, 5 bijv. door circulatie van leidingwater, teneinde de warmte af te voeren, die wordt geaccumuleerd aan de eindsecties 18b, hetgeen resulteert in relatief koelen van de eindsecties 18a en de daarmee geassocieerde koude warmtewisselaar 20 ruim beneden de omgevende 10 uitgangstemperatuur.

Het is de heen en weergaande beweging van het gas, gekoppeld met het afwisselend comprimeren en expanderen daarvan, het onvolmaakte warmtecontact en de verbroken thermodynamische symmetrie tussen het 15 gas en het tweede thermodynamische medium, welke zorgen voor de warmtestroom langs het tweede thermodynamische medium. Dit effect wordt verkregen ongeacht het middel, dat wordt gebruikt voor het drijven van het gas. Het drijforgaan kan een mechanische inrichting zijn, zoals 20 de zuiger in de hierboven beschreven uitvoering. Evenwel zijn elektromagnetische drijvers, die werken bij akoestische frequenties, bijzonder bruikbaar gebleken, daar zij kunnen worden gebruikt voor het produceren van een inrichting, die geen uitwendige bewegende 25 delen bezit en geen fluïdumdichte beweegbare afdichtingen. Additioneel resulteren dergelijke drijforganen in hogere energiedichtheden en hogere prestatiefactoren.

Fig. 5 toont een eenvoudige demonstratie-inrichting, die ongeveer 10 cm lang is en uitgerust met 30 een stel van vijf thermokoppels (A t/m E), geplaatst langs de centrale plaat van het tweede thermodynamische medium. De platen zijn gevormd van fiberglas, geïmpregneerd met polyesterhars. De inrichting was gevuld met helium tot een druk van ongeveer 5 atmosfeer, en 35 werd gedreven door een akoestische drijver (niet getoond) bij een frequentie van 400 Hz.

Fig. 6 toont de responsie van de inrichting van fig. 5 gedurende de eerste paar seconden, nadat de akoestische drijver was bekrachtigd. In deze figuur 40 is de temperatuur van elk thermokoppel weergegeven als

8300549

het verschil tussen instantane temperatuur T en zijn
initiële temperatuur T_i . De initiële temperatuur T_i was
dezelfde voor elk thermokoppel en was de omgevingstempe-
ratuur ten tijde van de demonstratie. Er valt te zien,
5 dat de thermokoppels A en E, die zijn gelegen aan de
tegenover gelegen einden van de platen, waaruit het
tweede thermodynamische medium bestaat, onmiddellijke
en aanzienlijke temperatuurveranderingen ondergaan in
tegenovergestelde richtingen van hun gemeenschappelijke
10 initiële uitgangstemperatuur T_i . De tussengelegen
thermokoppels B, C en D ondergaan minder geprononceerde
temperatuurveranderingen.

Fig. 7 geeft daadwerkelijke testresultaten
gedurende een langere tijdsperiode. De testresultaten,
15 weergegeven in fig. 7, werden verkregen met een andere
overeenkomstige uitvoering, die negentien parallelle
fiberglasplaten bevatte, geplaatst in een inconel-buis
met een inwendige diameter van 2,81 cm. De inconel-buis
was recht, horizontaal en niet geïsoleerd. De platen
20 waren elk 10 cm lang, 0,0125 cm dik, en waren op
afstand geplaatst over 0,094 cm. De breedtes van de
platen varieerden op de wijze, zoals getoond in fig. 5.
De einden van de platen, het dichtst bij het gesloten
einde van de buis, waren gepositioneerd op een afstand
25 van 6 cm van het gesloten einde. De buis was gevuld
met helium tot een druk van 1,903 atm. en werd aangedreven
door een akoestische drijver met een frequentie van
268 Hz. Een paar thermokoppels was gelegen aan de
tegenovergelegen einden van de centrale plaat. De
30 temperaturen, die werden geregistreerd door de twee
thermokoppels als functie van de tijd, zijn aangegeven
door de twee krommen in fig. 7.

De platen en het omringende gas werden in
staat gesteld om in evenwicht te komen bij kamertemperatuur
35 gedurende een tijdsperiode voorafgaand aan het bekrachti-
gen van de akoestische drijver. Deze periode is aangegeven
door de initiële delen van de krommen over een tijds-
interval van 0 tot 1 min. Gedurende dit interval zijn
de twee krommen vlak en op elkaar gesuperponeerd bij
40 de kamertemperatuur van $18,44^{\circ}\text{C}$. Nadat zich thermisch

8300549

evenwicht had ingesteld, werd de akoestische drijver aan-
gezet op een tijdstip, aangegeven als 1 min. Zoals aan-
gegeven door de grafiek, registreerden de thermokoppels
onmiddellijke temperatuurveranderingen binnen een periode
5 van seconden. Het thermokoppel aan het koude einde van
de platen bereikte een minimumtemperatuur van ongeveer
-3,7°C na ongeveer 1 min., en warmde daarna iets op tot
een temperatuur van ongeveer 1,4°C gedurende een periode
van ongeveer 14 min. Het thermokoppel aan het warme
10 einde warmde snel op gedurende een periode van verschillende
minuten en bereikte ten slotte een constante temperatuur
van ongeveer 93,8°C.

De werking van de motor kan worden verklaard
door analyse van de energiestroom binnen de cilinder
15 van een eenvoudige uitvoering zoals de testinrichting
van fig. 5. Terwille van de duidelijkheid van de uiteen-
zetting zal het effect van de viscositeit worden ver-
waarloosd. Allereerst zij in beschouwing genomen een
lege cilinder, waarin een compressibel gas wordt onder-
20 worpen aan compressie vanaf het ene einde, bijv. door
een zuiger, die in het proces omlaag gedreven wordt in
de cilinder. Voor een cilinder met een dwarsdoorsnee-
oppervlak A, wordt het incrementele volume gas dV ,
dat gaat door enig vast punt van de cilinder, gegeven
25 door de vergelijking:

$$dV = Avdt, \quad (1)$$

waarin v de instantane snelheid is van het gas bij dit
vaste punt en t de tijd. De massa van het incrementele
volume gas, dat dit vaste punt passeert, wordt gegeven
30 door:

$$dm = \rho dV, \quad (2)$$

waarin ρ de dichtheid van het gas is. Door vergelijking
(1) in vergelijking (2) te substituëren, verkrijgt men:

$$dm = \rho Avdt \quad (3)$$

35 De incrementele hoeveelheid energie, die
stroomt langs het vaste punt in de tijd dt , is de som
van de inwendige energie van de incrementele gasmassa
 dm en de arbeid, verricht door het gas dm . Dit wordt
gerepresenteerd door de vergelijking:

40 $dE = udm + PdV, \quad (4)$

8300549

waarin u de inwendige energie per eenheidsmassa, of de soortelijke inwendige energie van het gas is, en P de druk van het gas in de cilinder. De bovengegeven vergelijking kan ook worden geschreven als:

5
$$dE = (u + Pv)dm, \quad (5)$$

waarin v het soortelijk volume is, of het volume per eenheidsmassa ($1/\rho$) van het gas.

Voor een eenatomig gas zoals helium wordt de molaire inwendige energie U gegeven door de vergelijking:

10
$$U = (3/2)RT \quad (6)$$

De soortelijke inwendige energie u wordt dan gegeven door de vergelijking:

$$u = \frac{(3/2)RT}{M.W.} \quad (7)$$

15 waarin $M.W.$ het moleculair gewicht van het gas is.

Uit de klassieke thermodynamica heeft men de vergelijking voor molaire enthalpie H (waarbij V_m het molair volume is):

$$H = U + PV_m \quad (8)$$

20 De soortelijke enthalpie h wordt dan gegeven door:

$$h = u + Pv, \quad (9)$$

en uit vergelijking (5) verkrijgt men dan:

$$dE = hdm \quad (10)$$

Door de uitdrukking voor dm in vergelijking 25 (3) te substituëren in de bovengegeven vergelijking, verkrijgt men:

$$dE = h\rho Avdt \quad (11)$$

De grootte van de energiestroom door het vaste punt in de cilinder kan dan worden uitgedrukt 30 als $\dot{H}$ en worden geschreven als:

$$\dot{H} \equiv \frac{dE}{dt} = h\rho Av \quad (12)$$

Uit de vergelijkingen (7) en (9) kan h worden uitgedrukt door de vergelijking:

35
$$h = u + Pv = \frac{(3/2)RT}{M.W.} + Pv \quad (13)$$

Door de ideale gaswet $PV = nRT$ in te voeren, kan men de bovengegeven vergelijking (13) schrijven als:

40
$$h = \frac{(3/2)RT}{M.W.} + \frac{RT}{M.W.} = \frac{(5/2)RT}{M.W.} \quad (14)$$

8300549

Vergelijking (12) kan zodoende door invoering van de bovengegeven vergelijking voor h worden geschreven als:

$$\dot{H} = \frac{(5/2)RT\rho Av}{M.W.} \quad (15)$$

5 Uit de thermodynamica heeft men de uitdrukking voor de soortelijke warmtecapaciteit van een gas bij constante temperatuur, C_p , die is gegeven als:

$$C_p = \frac{dh}{dT} \quad (16)$$

10 Uit vergelijking (14) kan vergelijking (16) voor C_p nu worden gegeven als:

$$C_p = \frac{(5/2)R}{M.W.} \quad (17)$$

15 Zodoende kan vergelijking (15) worden herschreven als:

$$\dot{H} = \rho C_p T \Delta v \quad (18)$$

 Voor een gas, dat een temperatuurverandering δT ten opzichte van een gemiddelde temperatuur $\bar{T}$ ondergaat, zodat $T = \bar{T} + \delta T = \bar{T} + T_a \cos \omega t$, waarin de laatste vorm
20 geschikt is voor het gas afgelegd van de wanden van het huis, is er een corresponderende enthalpieverandering δh , die kan worden geschreven als:

$$h = \bar{h} + \delta h \quad (19)$$

25 Door deze vergelijking uit te drukken in de termen van vergelijking (14), verkrijgt men:

$$h = \frac{(5/2)R\bar{T}}{M.W.} + \frac{(5/2)R\delta T}{M.W.} \quad (20)$$

 Door substituering van vergelijking (17) in vergelijking (20) verkrijgt men dan:

$$30 \quad h = C_p \bar{T} + C_p \delta T \quad (21)$$

 Thans zij de in de tijd gemiddelde grootte van de energiestroom in beschouwing genomen, welke wordt gerepresenteerd door $\dot{H}$. Deze grootte kan worden gerepresenteerd door het tijdsgemiddelde te nemen van
35 vergelijking (12) op de volgende wijze:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \overline{\rho h \Delta v} = \overline{\rho (\bar{h} + \delta h) \Delta v} \\ &= \overline{\rho \bar{h} \Delta v} + \overline{\rho \delta h \Delta v} \end{aligned} \quad (22)$$

Indien het gas oscilleert op een heen en weergaande wijze, is de in de tijd gemiddelde snelheid $\bar{v}$ gelijk aan nul, en de term $\bar{p}h_{Av}$ in vergelijking (22) eveneens gelijk aan nul, terwijl de andere variabelen constanten zijn, zodat dan geldt:

$$\bar{H} = \overline{\rho \delta h_{Av}} \quad (23)$$

Door de uitdrukking voor δh in vergelijking (21) te substitueren in de hierboven gegeven vergelijking verkrijgt men:

$$\bar{H} = \overline{\rho C_p \delta T_{Av}} \quad (24)$$

Aangenomen, dat het gas oscilleert op een sinusoidale heen en weer gaande wijze, zal de druk P variëren in een mate δP rond een gemiddelde druk $\bar{P}$ op een wijze, bepaald door:

$$p = \bar{P} + \delta P = \bar{P} + P_a \cos \omega t \quad (25)$$

, waarbij de fase van de oscillerende druk dezelfde is gekozen als de fase van de oscillerende temperatuur afgelegen van de wanden. Indien de expansie en compressie van het gas adiabatisch is, kan worden aangetoond, dat δP in verband staat met de temperatuurverandering van de wanden door de vergelijking:

$$\delta P = P_a \cos \omega t = \rho C_p \delta T \quad (26)$$

Het gas ondergaat tevens een heen en weer gaande verplaatsing aan elk punt, welke in afwezigheid van viscositeit wordt gegeven door:

$$x = x_a \cos \omega t \quad (27)$$

, waarin x de instantane verplaatsing ten opzichte van een gemiddelde initiële positie is, en x_a de maximale verplaatsing in elke richting ten opzichte van deze positie. Zodoende variëren de parameters x , δP en δT van de wanden van het huis in fase met elkaar.

De snelheid v van het gas bij enig punt wordt gegeven door:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_a \sin \omega t \quad (28)$$

In aanmerking genomen, dat $\bar{H} = \overline{\rho C_p \delta T_{Av}}$ (vergelijking 24), kunnen de bovengegeven vergelijkingen

(26) en (28) worden ingevoegd in vergelijking (24), zodat men verkrijgt:

$$\dot{H} = \frac{(P_a \cos \omega t) (-\omega x_a \sin \omega t) (A)}{A \sin \omega t \cos \omega t} \quad (29)$$

5 Aangezien $\frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = (1/2) \frac{\sin 2\omega t}{\cos \omega t}$, kan de bovengegeven vergelijking worden gereduceerd tot

$$\dot{H} = \frac{(1/2) P_a x_a \omega A \sin 2\omega t}{\cos \omega t} \quad (30)$$

10 en aangezien het tijdsgemiddelde van de sinusfunctie nul bedraagt, is het resultaat, dat $\dot{H} = 0$. Bijgevolg is er geen netto-stroomenergie in het heen en weergaande gas in een cilinder, waarvan de wanden geen warmte-effekt hebben.

Indien een plaat met temperatuur $\bar{T}$, georiënteerd parallel aan de richting van de gasbeweging, wordt ingevoerd in de cilinder (normaal ten opzichte van de 15 plaat loodrecht op de cilinderas), verandert de situatie. Naast de plaat zal er een grenslaag gas zijn met een dikte δ_k , waarin het warmtegedrag kan worden benadert door te stellen, dat de temperatuur van het gas niet adiabatisch varieert, maar in plaats daarvan de temperatuur 20 van de plaat aanneemt. Dat betekent, dat het gas in de grenslaag expandeert en samentrekt op isotherme wijze, terwijl het gas buiten de grenslaag adiabatisch expandeert en samentrekt, zoals hierboven besproken. Dit houdt in, dat de warmtecapaciteit en het warmtegeleidingsvermogen 25 van de plaat voldoende groot zijn, opdat de temperatuur van de plaat niet varieert.

De warmtestroom $\dot{Q}$ in de plaat kan worden weergegeven door de vergelijking:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -k a \frac{dT}{dy} \quad (31)$$

30 , waarin dT/dy de plaatselijke temperatuurgradiënt is weg van het oppervlak van de plaat, a het oppervlak van de plaat, en k de warmtegeleidingscoëfficiënt van het gas.

Indien de condities $\rho C_p \delta T = 0$ voor $y = 0$ en $\rho C_p \delta T = \rho C_p \delta T_a \cos \omega t$ voor grote Y worden opgelegd, kan 35 de vergelijking van de warmte-overdracht in de limiet van het Prandtl getal nul en een longitudinale temperatuurgradiënt nul gemakkelijk worden opgelost en gegeven als:

$$\rho C_p \delta T = \rho C_p \delta T_a \cos \omega t - \quad (32)$$

$$\rho C_p \delta T_a e^{-y/\delta_\kappa} \cos(\omega t - y/\delta_\kappa)$$

5 waarin δ_κ de warmtepenetratiediepte in het gas is, en gedefinieerd als $\delta_\kappa = (2\kappa/\omega)^{1/2}$, waarbij κ de thermische diffusiecoëfficiënt van het gas is.

De term $\cos(\omega t - y/\delta_\kappa)$ in de bovengegeven vergelijking kan worden ontwikkeld, waardoor men de volgende vergelijking krijgt:

$$\rho C_p \delta T = \rho C_p \delta T_a (\cos \omega t) (1 - e^{-y/\delta_\kappa} \cos y/\delta_\kappa) - \quad (33)$$

$$10 \quad \rho C_p \delta T_a (\sin \omega t) e^{-y/\delta_\kappa} \sin y/\delta_\kappa$$

In aanmerking genomen, dat $\dot{H} = \rho C_p \delta T v_a A$, waarbij de dubbele strepen het middelen aangeven zowel over plaats als tijd, kan de waarde van $\dot{H}$ worden bepaald. In aanmerking genomen, dat het tijdsgemiddelde van het
15 produkt van de termen $\cos \omega t$ en $\sin \omega t$ gelijk is aan nul, en dat het tijdsgemiddelde van de term $\sin^2 \omega t$ gelijk is aan $1/2$, kan de bovengegevens vergelijking worden gereduceerd tot:

$$\dot{H} = (-\rho C_p \delta T_a) (-v_a) \overline{\sin^2 \omega t} \int_0^\infty dy e^{-y/\delta_\kappa} \sin y/\delta_\kappa \quad (34)$$

20 , waarin Π de perimeter of de afstand rondom de hypothetische plaat, ingebracht in de cilinder. Dat wil zeggen, voor een plaat met een breedte w en een dikte d geldt dan d , $dA = \Pi dy = (2w + 2d)dy$. Dit bedoelt verder te zeggen, dat Π voor meer gecompliceerde geometrieën het oppervlakte-
25 gebied per eenheidslengte is van het tweede thermodynamische medium, gelegen in de cilinder.

De bovengegeven vergelijking reduceert dan tot:

$$\dot{H} = (1/4) \rho C_p \delta T_a v_a \Pi \delta_\kappa \quad (35)$$

30 , en door te nemen $\rho C_p \delta T_a = P_a$, verkrijgt men:

$$\dot{H} = (1/4) P_a v_a \Pi \delta_\kappa \quad (36)$$

Zodoende valt te zien, dat de netto-energiestroom $\dot{H}$ in het gas langs de cilinder afhangt van het

totale oppervlaktegebied per eenheidslengte van de
cilinder en van enig tweede thermodynamische medium,
aanwezig in de cilinder. Aangezien deze grootheid,
weergegeven door Π , een discontinuïteit ondergaat aan
5 de uiteinden van een tweede thermodynamische medium van
het type, getoond in de fig. 1-5, ondergaat de funktie
 $\dot{H}(z)$ tevens een discontinuïteit aan de einden van het
medium. Dit is grafisch weergegeven in fig. 8.

Aan het eind van het medium het dichtst nabij
10 het gesloten einde van de cilinder vermindert de netto-
energiestroom $\dot{H}$ in het gas naar het gesloten einde op
discontinue wijze, zodat door conservering van energie
warmte moet worden overgedragen aan het tweede medium
aan dit einde, en het tweede medium warm wordt.

15 Omgekeerd neemt aan het einde, dat het meest
nabij is aan het drijforgaan, de energiestroom in het gas
toe in een discontinue stapfunctie bij het gaan naar het
gesloten einde. Bijgevolg moet warmte worden weggenomen
van het tweede medium aan dit einde.

20 Hoewel Π discontinu verandert aan elk einde
van het tweede medium, verandert $\dot{H}$ daadwerkelijk snel
maar continu in deze gebieden met een breedte van bij
benadering de som van δ_k en x_a bij het punt in kwestie.

Er valt verder uit de bovengegeven vergelijking
25 (36) op te maken, dat $\dot{H}$ gestadig afneemt naar het gesloten
einde van de cilinder, aangezien de term v_a gestadig
afneemt naar nul aan het gesloten einde. Zodoende is er
een constante stroom warmte in de wanden van de cilinder
aan alle punten, maar deze warmtestroom kan veel kleiner
30 zijn dan de warmtestroomhoeveelheden, veroorzaakt door
het invoeren van het tweede medium.

De fig. 9 en 10 toont een uitvoeringsvorm
van de uitvinding, waarin het tweede thermodynamische
medium bestaat uit een stel cirkelvormige draadmaasroosters
35 24. De roosters zijn georiënteerd loodrecht op de as
van de cilinder, en worden in hun positie gehouden door
smalle afstandsstukken 26.

Er valt op te merken in de fig. 9 en 10, dat
de onderlinge afstand tussen de maasroosters 24 op
40 progressieve wijze varieert over de lengte van de cilinder.

8300549

In het bijzonder zijn de roosters op progressieve wijze meer dicht op elkaar geplaatst nabij het gesloten einde van de cilinder. Dit aspect is geen noodzakelijk element van de uitvinding, maar is geïllustreerd, teneinde een principe van de uitvinding te belichten. Dat principe is, dat de onderlinge afstand tussen aangrenzende elementen van het tweede thermodynamische medium op enig punt over de cilinder minder moet zijn dan de dubbele amplitude, of de heen en weergaande verplaatsing, van het gas aan dat punt. Aan de prestatie zal afbreuk worden gedaan, indien de onderlinge afstand groter is dan de plaatselijke heen en weergaande verplaatsing van het gas. Aangezien de heen en weergaande verplaatsing van het gas progressief afneemt naar het gesloten einde van de cilinder toe, vermindert de maximaal toegelaten onderlinge afstand tussen de elementen van dit type tweede thermodynamische medium eveneens naar het gesloten einde toe. Dit type tweede thermodynamische medium kan ook worden gebruikt met een uniforme afstandsverdeling, maar dan moet de onderlinge afstand overal kleiner zijn dan de minimale heen en weergaande verplaatsing van het gas.

Een derde en voorkeursuitvoering van de uitvinding is een akoestische warmtepomp 30, die is getoond in fig. 11, en welke een J-vormig, algemeen cilindrisch of buisvormig huis 32 heeft, dat een U-bocht heeft, een kortere steel en een langere steel. De langere steel is afgesloten door een houder van een akoestische drijver 34, ondersteund op een basisplaat 36 en daaraan gemonteerd door bouten 38 voor het vormen van een afdichting tegen drukfluïdum tussen de basisplaat 36 en de houder 34. De basisplaat 36 is in de voorkeursuitvoering gezeteld op een flens 40, die zich buitenwaarts uitstrekt van de wand van het huis 32. De akoestische drijverhouder 34 omsluit een magneet 42, een membraan 44, en een stemspoel 46. Draden 48 en 50, die gaan door een afdichting 58 in een basisplaat 36, strekken zich uit tot een audio-frequente stroombron 56. Het stemspoel-membraansamenstel is door een flexibele ring 54 gemonteerd op een basis 52, bevestigd aan magneet 42. Het zal de vakman duidelijk zijn, dat de akoestische drijver, zoals getoond, conventio-

8300549

neel van aard is. In de voorkeursuitvoering werkt de drijver in het 400 Hz gebied. In de voorkeursuitvoering kan evenwel gewerkt worden in het gebied van 100 tot 1000 Hz. In de voorkeursuitvoering was het huis 32 gevuld met
5 helium, maar wederom zal het de vakman duidelijk zijn, dat andere fluïda, waaronder gassen zoals lucht of waterstof, of vloeistoffen zoals freons, propeen, of vloeibare metalen, zoals een vloeibaar natrium-kalium-eutecticum, gemakkelijk kunnen worden gebruikt om de uitvinding in
10 toepassing te brengen. Een flens 60 is bevestigd op de korte steel, bijv. door lassen. Een eindkap 62 is geplaatst boven op flens 60 en is daaraan bevestigd door bouten 64, teneinde een drukfluïdumdichte afdichting te vormen. Een tweede thermodynamisch medium 66, dat in de voorkeurs-
15 uitvoering van fig. 11 overeenkomstig is aan dat, getoond in de fig. 1-4, omvat bij voorkeur parallelle platen 66b van een materiaal zoals Mylar, Nylon, Kapton, epoxy of fiberglas; en warmtegeleidende eindsecties 66a en 66c, gevormd van koper, of ander geschikt materiaal. Het
20 materiaal moet in staat zijn tot warmtewisseling met het fluïdum binnen het huis 32. Elke vaste stof, waarvoor de effectieve warmtecapaciteit per eenheidsoppervlak bij de bedrijfsfrequentie veel groter is dan die van het aangrenzende fluïdum, en welke een adequaat laag longitu-
25 dinaal warmtegeleidingsvermogen bezit, kan functioneren als tweede thermodynamische medium. Er valt op te merken, dat er een eindruimte is tussen de eindkap 62 en de top van het thermodynamische medium 66. Het huis 32 in de nabijheid van deze eindruimte en de top het van
30 medium 66 communiceren met een warmteput 70 via leiding 68, waardoor hete warmtewisseling wordt verkregen. Aan het huis 32 aan het onderende van het thermodynamische medium 66 communiceert een tweede leiding 72 met een warmtebron 74, en zorgt voor een koude warmtewisseling.
35 Een gewenste of gekozen druk wordt via een leiding 78 en klep 80 aangebracht van een fluïdumdruktoevoer 84. Deze druk kan worden bewaakt door een drukmeter 82. Het akoestisch drijversamenstel, dat de permanente magneet 42 heeft, welke zorgt voor een radiaal
40 magneetveld, dat werkt op de stromen in de stemspoel 46

8300549

voor het voortbrengen van de kracht op het membraan 44 teneinde akoestische trillingen aan te drijven binnen het fluïdum, is mechanisch gekoppeld met het huis 32, een J-tubevormige akoestische resonator, waarvan het ene
5 einde gesloten is door de eindkap 62. In een kenmerkende inrichting kan de resonator bijna een kwart golflengte lang zijn bij zijn grondresonantie, dit is niet cruciaal voor de werking van de inrichting. Er is geen mechanische traagheidsinrichting nodig, aangezien elke noodzakelijke
10 traagheid wordt verschaft door het primaire fluïdum zelf, dat resoneert in de J-buis. Het tweede thermodynamische medium, dat bestaat uit de lagen 66, dient een klein longitudinaal warmtegeleidingsvermogen te bezitten, teneinde warmteverliezen te reduceren. In de voorkeursuitvoering
15 is de onderlinge afstand tussen de platen van het medium 66 een uniforme afstand d. Een andere vereiste van het tweede medium is, dat de effectieve warmtecapaciteit per eenheidsoppervlak C_{A_2} ervan groter dient te zijn dan die C_{A_1} , van het aangrenzende primaire medium. Deze grootheden
20 worden mathematisch gerepresenteerd door de volgende formules:

$$C_{A_1} = C_1 \frac{d}{a} ; \quad C_{A_2} = C_2 \delta_2$$

, waarin C_1 en C_2 de warmtecapaciteiten per eenheidsvolume van resp. het primaire fluïdummedium en het secundaire
25 vaste medium 66 zijn, en $\delta_2 = (2\kappa_2/\omega)^{1/2}$, waarin δ_2 de warmtepenetratiediepte in het tweede medium van het warmtediffusievermogen κ_2 , bij een hoekfrequentie $\omega = 2\pi f$, waarin f de akoestische frequentie is. De voorwaarde $C_{A_2} \gg C_{A_1}$ wordt gemakkelijk bereikt, tezamen met een
30 groot longitudinaal warmteverlies, indien het tweede medium een materiaal is zoals Kapton, Mylar, Nylon, epoxies of roestvrij staal voor frequenties van een paar honderd Hz bij heliumgasdruk van ongeveer 10 atmosfeer. Voor efficiënt bedrijf is het nodig, dat de visceuze
35 verliezen klein zijn. Dit kan worden bereikt, indien $L/\lambda \ll 1$, waarbij L de lengte van het tweede medium is en λ de radiale lengte van de akoestische golf, gegeven door $\lambda = \lambda/2\pi = c/2\pi f$, waarbij c de geluidssnelheid in het fluïdummedium is. Bij het dimensioneren van de

8300549

motor neemt men een redelijke L en vervolgens een
 algemene frequentie van $L/\lambda \ll 1$. Voor een L van ongeveer
 10 tot 15 cm is een redelijke frequentie 300 tot 400 Hz
 voor helium bij kamertemperatuur. De onderlinge afstand
 5 d wordt dan bepaald bij benadering door de eis $\omega\tau_K \gtrsim 1$,
 nodig om de noodzakelijke temperatuurvariaties te
 verkrijgen en de noodzakelijke fase-instelling tussen
 de temperatuurveranderingen en de snelheid van het
 primaire fluïdum. Hierbij is τ_K de warmtediffusierelaxatie-
 10 tijd, gegeven voor een parallelle plaatgeometrie door

$$\tau_K = \frac{d^2}{\pi^2 \kappa_1}$$

, waarin κ_1 het warmtediffusievermogen is van het primaire
 fluïdummedium. Voor gassen is κ in nauwe benadering om-
 15 gekeerd evenredig aan de druk. De onderlinge afstand
 d wordt dan bij benadering vastgesteld door de ongelijk-
 heid

$$d \gtrsim \frac{\pi^2 \kappa_1}{\omega}^{1/2}$$

20 Een druk van 10 atm. met heliumgas geeft
 zeer redelijke waarden voor d , d.w.z. ongeveer 254 μ .

Deze overwegingen zijn kenmerkend voor het
 dimensioneren van de motor. In fig. 11 werkt het
 bedrijven als warmtepomp of koelmachine als volgt.
 25 De akoestische drijver is gemonteerd in een kamer om
 de druk van het werkfluïdum te weerstaan, en mechanisch
 op fluïdumdichte wijze gekoppeld met de resonator,
 bestaande uit de J-vormige buis 32. Stroomleidingen van
 de stemspeel worden gevoerd door de afdichting 58 naar
 30 een audiofrequente stroombron 56. Het akoestische systeem
 wordt op een druk p gebracht via klep 80 onder gebruik-
 making van de fluïdumdruktoevoer 84. De frequentie
 en amplitude van de audiofrequente stroombron zijn
 zodanig gekozen, dat de grondresonantie wordt voortge-
 35 bracht, die correspondeert met ongeveer een kwart golf-
 lengte in de J-vormige buis 32. Een drijver, bijv. een
 JBL 375AB, vervaardigd door James B. Lansing Sound, Inc.
 zal gemakkelijk in ^4He gas een één atmosfeerpiek produ-

ceren tot piekdrukvariaties aan eindkap 62, wanneer de gemiddelde druk binnen het huis ongeveer 10 atmosfeer is, en de diameter van de J-vormige buis 32 2,54 cm bedraagt.

5 Aangezien de lengte van het medium 66 veel kleiner is dan λ , is de druk nagenoeg uniform over het tweede thermodynamische medium. De effecten zijn zodoende in wezen dezelfde, als deze zouden zijn met een gewoon mechanisch zuiger en cilinderarrangement, dat dezelfde
10 drukvariaties bij deze hoge frequentie produceert.

 De warmtepompwerking is als volgt. Men beschouwe een klein fluïdumincrement nabij het tweede medium op een ogenblik, dat de oscillatiedruk nul is, en bezig positief te worden. Als de druk toeneemt, verplaatst
15 het fluïdumincrement zich naar de eindkap 62 en warmt dit op tijdens het bewegen. Men een tijdsvertraging τ_k wordt warmte overgedragen aan het tweede medium 66 van het hete fluïdumincrement, nadat het fluïdum zich heeft bewogen naar de eindkap vanuit een evenwichtspositie,
20 waardoor warmte wordt overgedragen naar de eindkap. De druk neemt dan af, en daarmee de temperatuur. Deze temperatuurafname staat evenwel niet in verbinding met het tweede medium, totdat hetzelfde fluïdumincrement zich heeft bewogen over een aanzienlijke afstand van zijn
25 evenwichtspositie weg van eindkap 62 naar de U-bocht, waardoor koude wordt overgedragen naar de U-bocht. Binnen het tweede medium worden onder initiële condities van nultemperatuurgradiënt de verwarmings- en koeleffecten van naburige fluïdumdeeltjes vrijwel gecompenseerd,
30 maar aan het einde van het tweede medium, nabij de eindkap 62 vindt deze concentratie niet plaats en treedt verhitting op. Op overeenkomstige wijze zal het einde van het tweede medium weg van de eindkap 62 afkoelen. Het koelen aan de bodem zal voortgaan, totdat de
35 temperatuurgradiënt en de verliezen zodanig zijn, dat, als het fluïdum beweegt, de temperatuur van het tweede medium zich aanpast aan die van het aangrenzende bewegende fluïdum. Instelling van de grootte van de eindruimte onder de eindkap bepaalt de volumetrische
40 verplaatsing van het fluïdum aan het einde van de warmte-

8300549

vertragingsruimte en speelt bijgevolg een belangrijke rol bij het bepalen van de hoeveelheid gepompte warmte.

Er zij op gewezen, dat, aangezien de bodem koud is, het J-buis arrangement, dat is getoond, gravitatie-
5 tationeel stabiel is ten opzichte van natuurlijke convection van het primair fluïdum. Indien een apparaat volgens de uitvinding wordt geconstrueerd voor het werken in een zwaartekrachtsvrije omgeving, zoals de buitenaardse ruimte, is de J-vorm van de buis niet nodig. De J-vorm
10 van de buis 32 kan ook worden gemodificeerd, evenals zijn hoogte, indien enige vermindering van prestatie aanvaardbaar is. Er kunnen bijv. rechte en U-vormige buizen worden gebruikt.

De voorgaande beschrijving van een aantal
15 uitvoeringen van de uitvinding is uitsluitend getoond bij wijze van illustratie en toelichting. Deze is niet bedoeld als uitputtend of om de uitvinding te beperken tot de nauwkeurig omschreven vormen, en het zal duidelijk zijn, dat er tal van modificaties en variaties mogelijk
20 zijn in het licht van de bovengegeven beschrijving. De toegelichte uitvoeringsvormen werden gekozen en beschreven teneinde de principes van de uitvinding zo goed mogelijk uit te leggen, alsook de praktische toepassing ervan, teneinde de vakman in staat te stellen
25 om de uitvinding op de best mogelijke wijze toe te passen in verschillende uitvoeringsvormen en met verschillende modificaties, al naar geschikt voor het speciale beoogde doel.

- conclusies -

8300549

- C o n c l u s i e s -

1. Warmtemotor met een eerste medium en een tweede medium, die in warmtecontact met elkaar staan, m e t h e t k e n m e r k, dat het eerste en het tweede medium in onvolmaakt warmtecontact met elkaar staan,
5 dat het eerste medium beweegbaar is in heen en weergaande beweging ten opzichte van het tweede medium langs een weg van heen en weergaande beweging, welke heen en weergaande beweging van het eerste medium vergezeld gaat van een temperatuurverandering in het eerste medium zodanig,
10 dat de temperatuur van het eerste medium progressief varieert als funktie van zijn verplaatsing ten opzichte van het tweede medium, dat de gemiddelde warmtestroom tussen het eerste en het tweede medium per eenheidslengte over het genoemde pad van heen en weergaande beweging
15 toeneemt langs het genoemde pad van heen en weergaande beweging in een eerste gebied en afneemt langs het genoemde pad van heen en weergaande beweging in het tweede gebied, waarbij de warmtemotor kan werken of als een warmtepomp door het drijven van het eerste medium in de genoemde
20 heen en weergaande beweging, teneinde een bruikbare differentiële temperatuurverdeling voort te brengen in het tweede medium, of als arbeidsgenerator door het induceren van een differentiële temperatuurverdeling in het genoemde tweede medium, teneinde daardoor het
25 eerste medium te doen bewegen in een cyclische heen en weergaande beweging, die kan worden benut voor het uitvoeren van nuttige mechanische arbeid.

2. Warmtepomp volgens conclusie 1, m e t h e t k e n m e r k, dat er een drijforgaan is gekoppeld met
30 het eerste medium voor het drijven van het eerste medium in de genoemde heen en weergaande beweging, waarbij het drijven van dit eerste medium in deze heen en weergaande beweging resulteert in de voortbrenging van een differentiële temperatuurverdeling in het tweede medium.

35 3. Warmtepomp volgens conclusie 2, m e t h e t k e n m e r k, dat het drijforgaan een akoestische drijver

8300549

is, en dat het eerste medium een fluïdum is, dat wordt
gehouden in een huis.

4. Warmtepomp volgens conclusie 2, met het
k e n m e r k, dat het drijforgaan een akoestische drijver
5 is, en dat het eerste medium een gas is, dat wordt
gehouden in een huis, waarbij het tweede medium gelegen
is in het huis in onvolmaakt warmtecontact met het genoemde
gas, en dat het tweede medium een structuur heeft, die
een lage gasstroomimpedantie heeft in de richting van
10 heen en weergaande beweging van het gas, en een warmte-
capaciteit hoger dan de warmtecapaciteit van het gas.

5. Warmtepomp volgens conclusie 4, met het
k e n m e r k, dat het gas wordt gedreven door de
akoestische drijver bij een resonantiefrequentie.

6. Warmtepomp volgens conclusie 4, met het
k e n m e r k, dat het tweede thermodynamische medium
een aantal langwerpige op onderlinge afstand gelegen platen
bevat, die zodanig georiënteerd zijn, dat zij zich parallel
aan de richting van de heen en weergaande beweging van
20 het gas uitstrekken.

7. Warmtepomp volgens conclusie 6, met het
k e n m e r k, dat het gas wordt gedreven bij een akoestische
frequentie, die ongeveer omgekeerd evenredig is aan de
warmterelaxatietijd van het gas ten opzichte van het
25 tweede medium.

8. Warmtepomp volgens conclusie 6, met het
k e n m e r k, dat deze verder warmteafvoermiddelen bezit,
gekoppeld aan de einden van het tweede thermodynamische
medium, waardoor warmte, afgenomen van het ene einde van
30 het genoemde tweede medium een koelingseffekt tot resultaat
heeft aan het tegenover gelegen einde van het tweede medium.

9. Warmtepomp volgens conclusie 8, met het
k e n m e r k, dat elk van de genoemde platen een paar
eindsecties bevat, gevormd van een eerste materiaal met

8300549

een hoog warmtegeleidingsvermogen en een tussengelegen sectie, gevormd van een materiaal met een relatief laag warmtegeleidingsvermogen.

10. Warmtepomp volgens conclusie 9, met het
5 k e n m e r k, dat het huis een cilindrisch buisvormig huis is, en dat de genoemde warmteafvoermiddelen in warmtecontact zijn met delen van het huis aangrenzend aan de genoemde eindsecties van de platen, en dat de genoemde eindsecties van de platen in warmtecontact zijn
10 met het huis, en dat de genoemde tussengelegen secties op afstand gelegen zijn van het huis.

11. Warmtepomp volgens conclusie 4, met het
k e n m e r k, dat het tweede thermodynamische medium bestaat uit een aantal nagenoeg vlakke draadmaasroosters,
15 elk georiënteerd zodanig, dat zij zich uitstrekken parallel ten opzichte van elkaar en dwars ten opzichte van de richting van de heen en weergaande beweging van het gas, en dat de genoemde draadroosters op onderlinge afstand van elkaar gelegen zijn.

20 12. Warmtepomp volgens conclusie 4, met het k e n m e r k, dat het eerste thermodynamische medium gasvormig helium is, bewaard bij een druk aanzienlijk boven atmosferische druk.

13. Warmtepomp volgens conclusie 4, met het
25 k e n m e r k, dat het tweede medium een aantal elementen heeft, waarvan elk een lage impedantie heeft ten opzichte van de fluïdumstroom in de richting van heen en weergaande beweging van het gas, en dat de genoemde elementen op onderlinge afstand zijn gelegen in de richting van
30 de genoemde heen en weergaande beweging over nagenoeg de afstand van de plaatselijke heen en weergaande verplaatsing van het genoemde gas.

14. Warmtepomp volgens conclusie 6, met het
k e n m e r k, dat het huis een nagenoeg buisvormig
35 langwerpige huis is, dat aan één eind gesloten is, en

8300549

dat de genoemde akoestische drijver een elektromagnetische akoestische drijver is, gelegen aan het tegenovergestelde einde van het huis, en dat het aantal platen, waaruit het tweede thermodynamische medium bestaat, is gelegen tussen
5 de genoemde drijver en het genoemde gesloten einde van het huis.

15. Arbeidsgenerator volgens conclusie 1, m e t h e t k e n m e r k, dat er middelen zijn, thermisch verbonden met het tweede medium voor het induceren van
10 een differentiële temperatuurverdeling in het tweede medium, teneinde daardoor een cyclische heen en weergaande beweging te veroorzaken van het eerste medium, die kan worden benut voor het verrichten van nuttige mechanische arbeid.

15 16. Arbeidsgenerator volgens conclusie 15, m e t h e t k e n m e r k, dat het eerste thermodynamische medium fluïdum is, bevat in een huis, en dat het tweede thermodynamische medium is gelegen in het huis in on-
volmaakt warmtecontact met het fluïdum.

20 17. Arbeidsgenerator volgens conclusie 16, m e t h e t k e n m e r k, dat het tweede thermodynamische medium een structuur is met een lage impedantie ten opzichte van fluïdumstroom in de richting van heen en weergaande beweging van dit fluïdum, en dat het tweede
25 thermodynamische medium een aanzienlijke warmtecapaciteit heeft ten opzichte van dat van het fluïdum.

18. Arbeidsgenerator volgens conclusie 17, m e t h e t k e n m e r k, dat het tweede thermodynamische medium een aantal langwerpige op onderlinge afstand
30 gelegen platen bevat, zodanig georiënteerd, dat zij zich parallel uitstrekken aan de richting van de heen en weergaande beweging van het fluïdum.

19. Arbeidsgenerator volgens conclusie 18, m e t h e t k e n m e r k, dat fluïdum differentieel wordt
35 verhit door het tweede medium, zodanig, dat het wordt

8300549

aangedreven bij een resonantiefrequentie, die ongeveer omgekeerd evenredig is aan de warmterelaxatietijd van het genoemde fluïdum ten opzichte van het tweede medium.

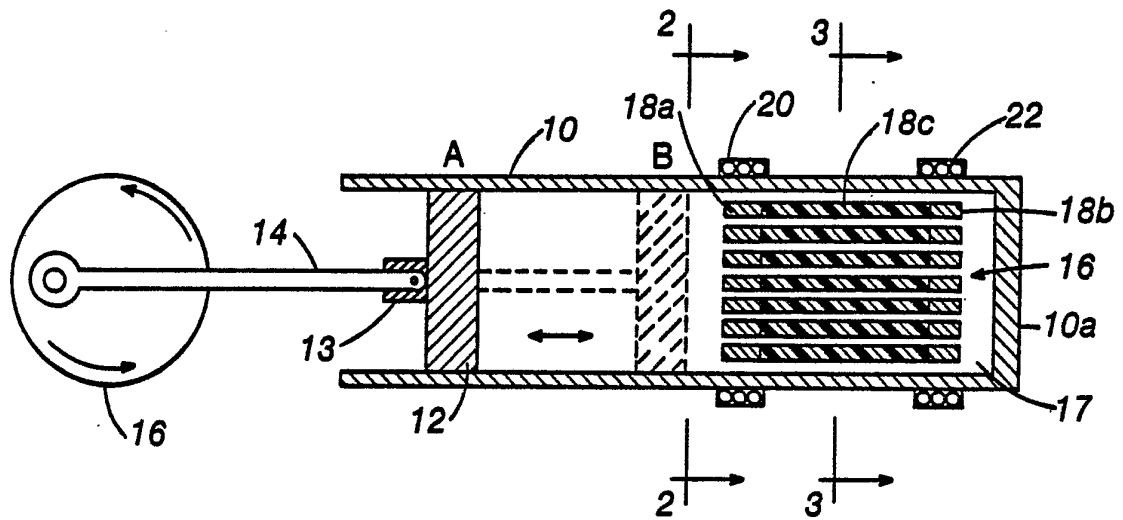
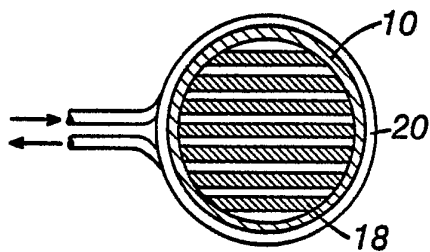
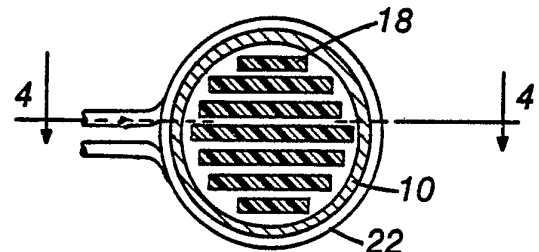
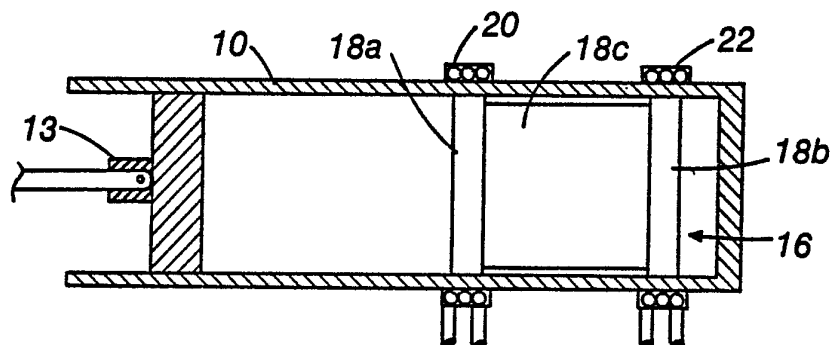
20. Arbeidsgenerator volgens conclusie 19, m e t
5 h e t k e n m e r k, dat deze verder warmtewisselings-organen heeft, gekoppeld aan de einden van het genoemde tweede thermodynamische medium voor het differentieel verhitten van het tweede medium.

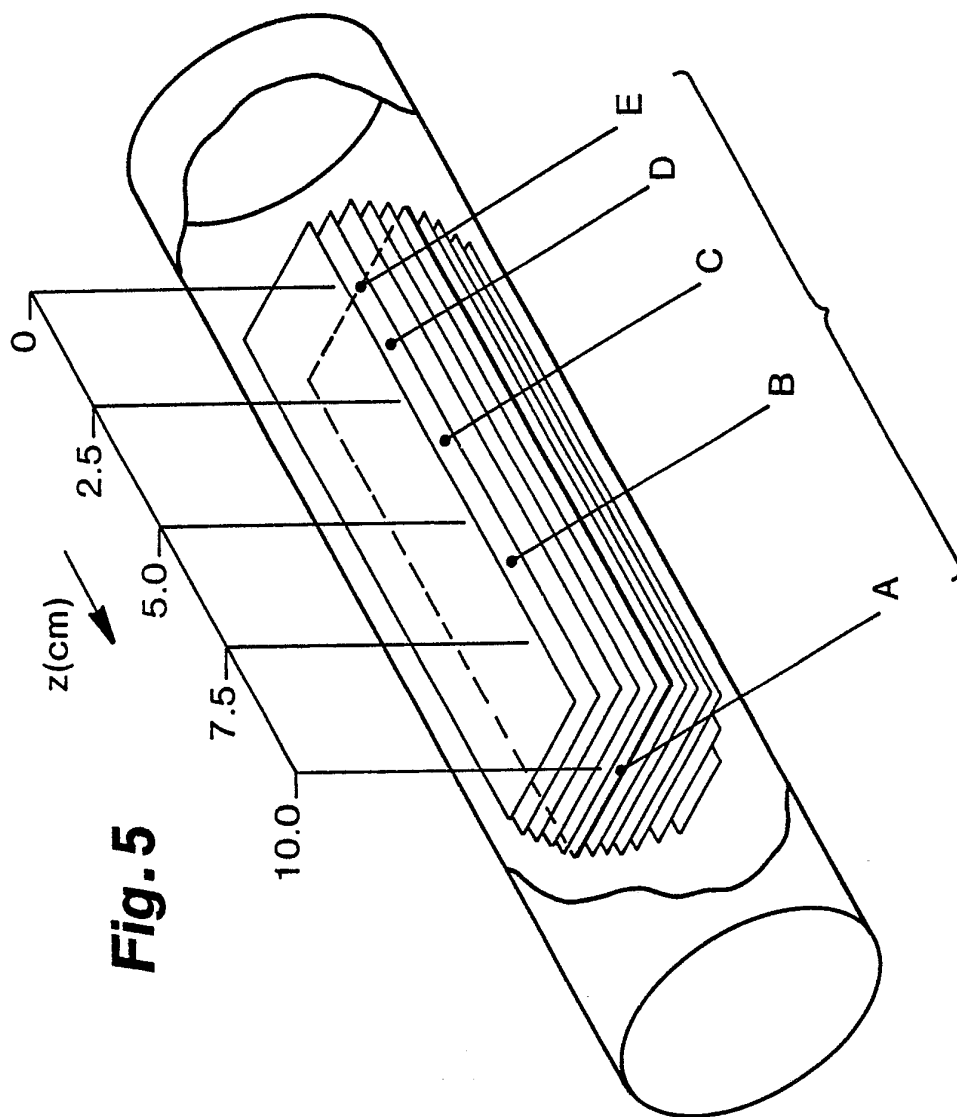
21. Arbeidsgenerator volgens conclusie 20, m e t
10 h e t k e n m e r k, dat elk van de genoemde platen een paar eindsecties heeft, gevormd van een eerste materiaal met hoog warmtegeleidingsvermogen en een tussensectie, gevormd van een materiaal met een relatief laag warmtegeleidingsvermogen.

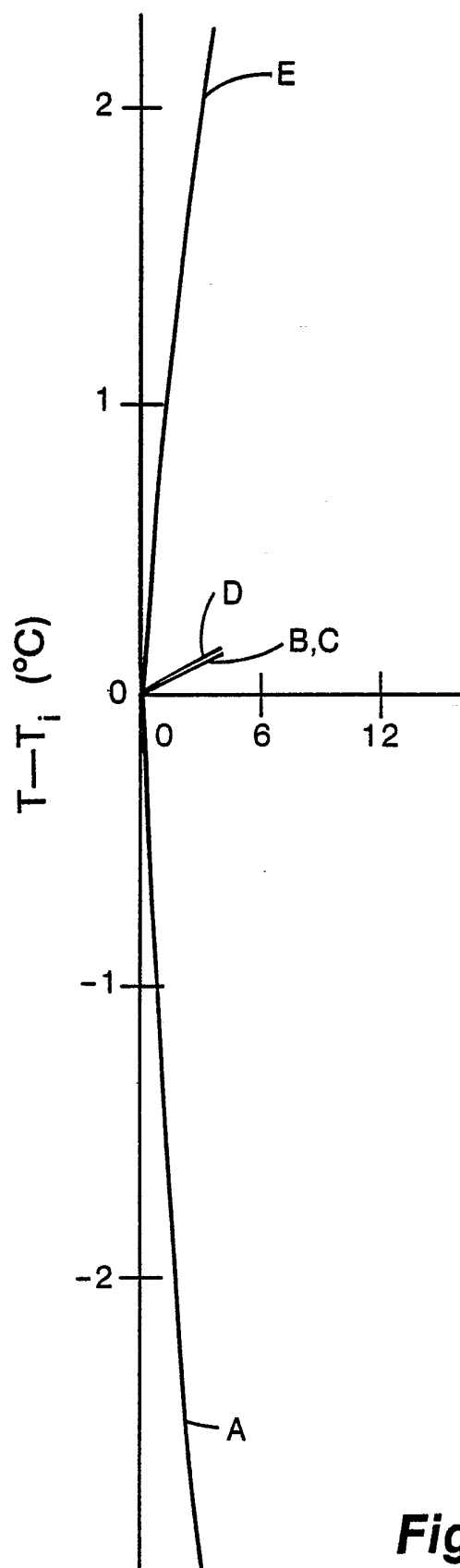
15 22. Arbeidsgenerator volgens conclusie 21, m e t
h e t k e n m e r k, dat het huis een cilindrisch buisvormig huis is, en dat de warmtewisselingsmiddelen in warmtecontact zijn met delen van het huis aangrenzend aan de eindsectie van de genoemde platen, en dat de genoemde
20 eindsecties van de platen in de warmtecontact zijn met het huis en de tussengelegen secties op afstand gelegen zijn van het huis.

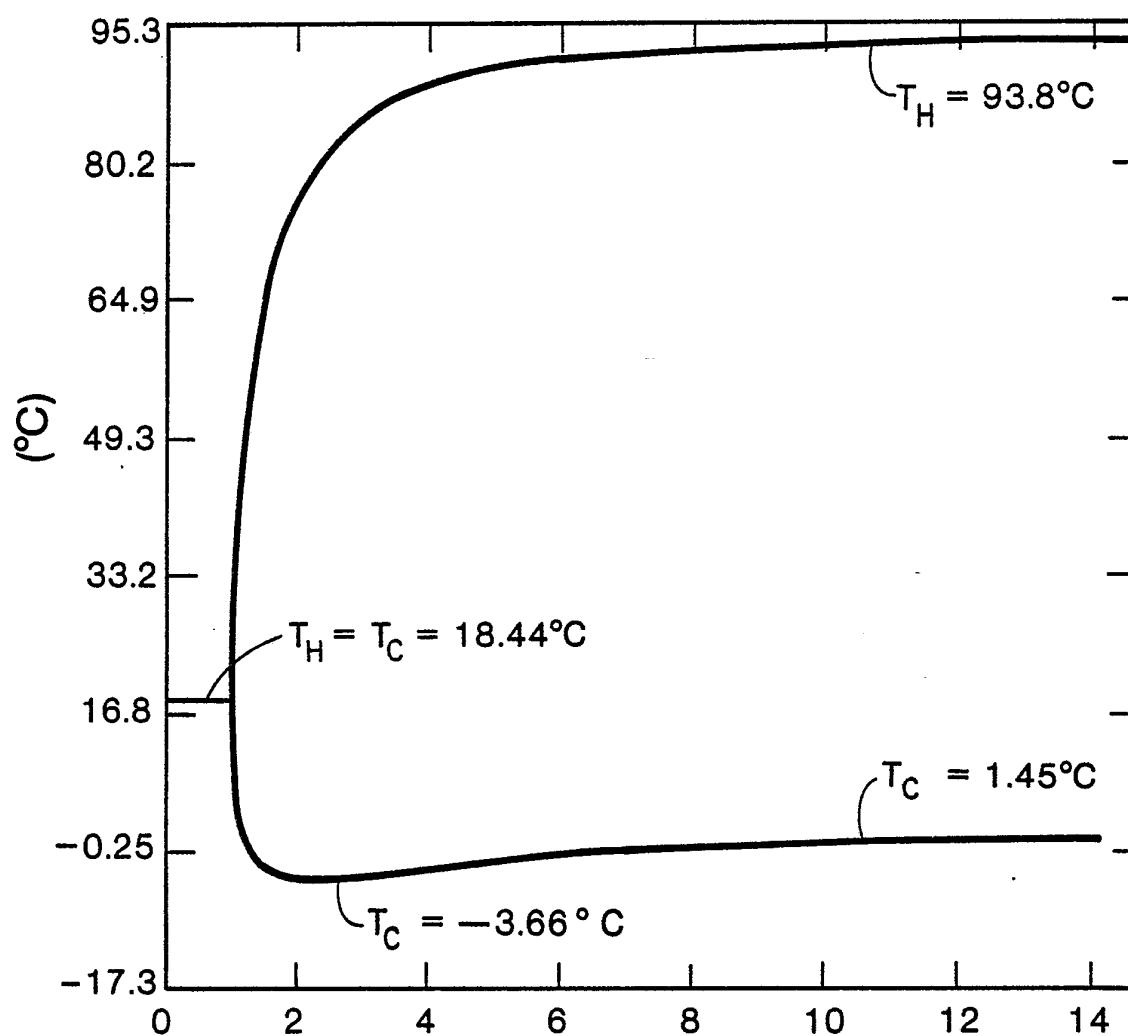
23. Arbeidsgenerator volgens conclusie 16, m e t
h e t k e n m e r k, dat het eerste thermodynamische
25 medium een gas is, dat differentieel verhit wordt door het genoemde tweede thermodynamische medium, teneinde te worden gedreven tot oscilleren in heen en weergaande beweging bij een akoestische resonantiefrequentie.

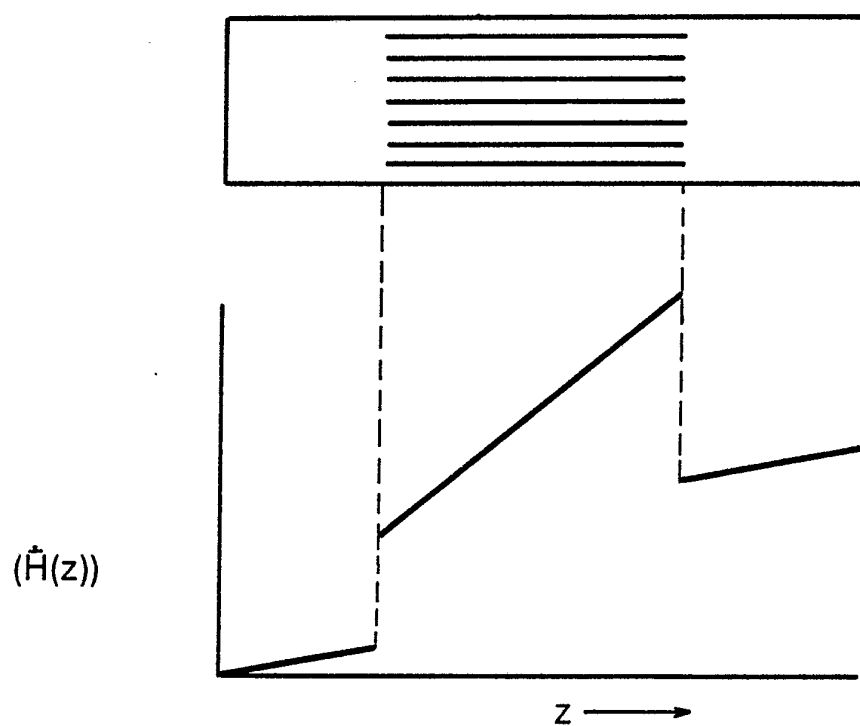
24. Arbeidsgenerator volgens conclusie 23, m e t
30 h e t k e n m e r k, dat het gas helium is, dat wordt verwarmd bij een druk, aanzienlijk boven atmosferische druk.

**Fig. 1****Fig. 2****Fig. 3****Fig. 4**

**Fig. 5**

**Fig. 6**

**Fig. 7**

**Fig. 8**

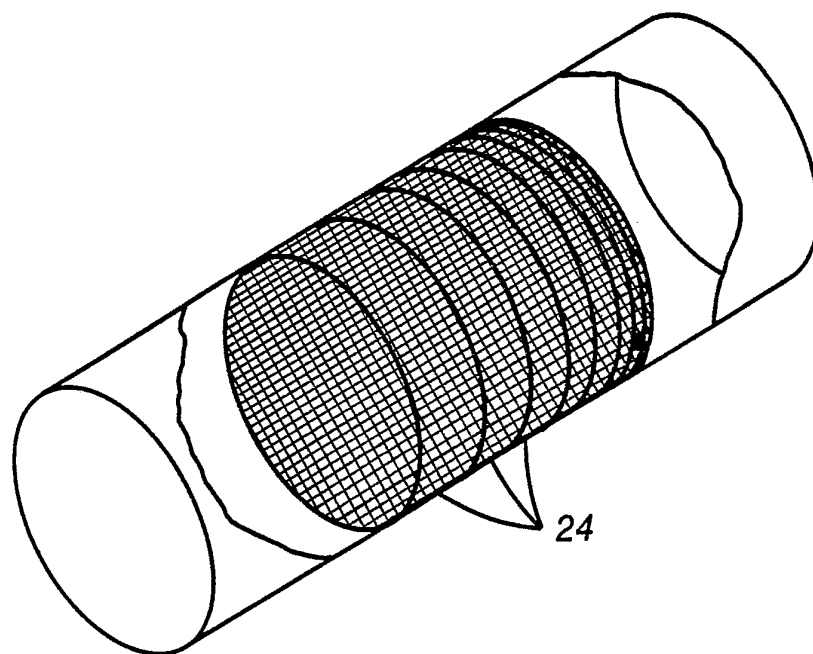


Fig. 9

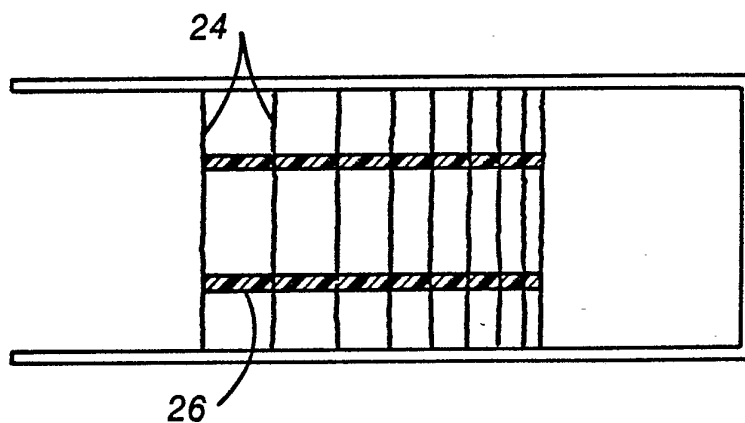


Fig. 10

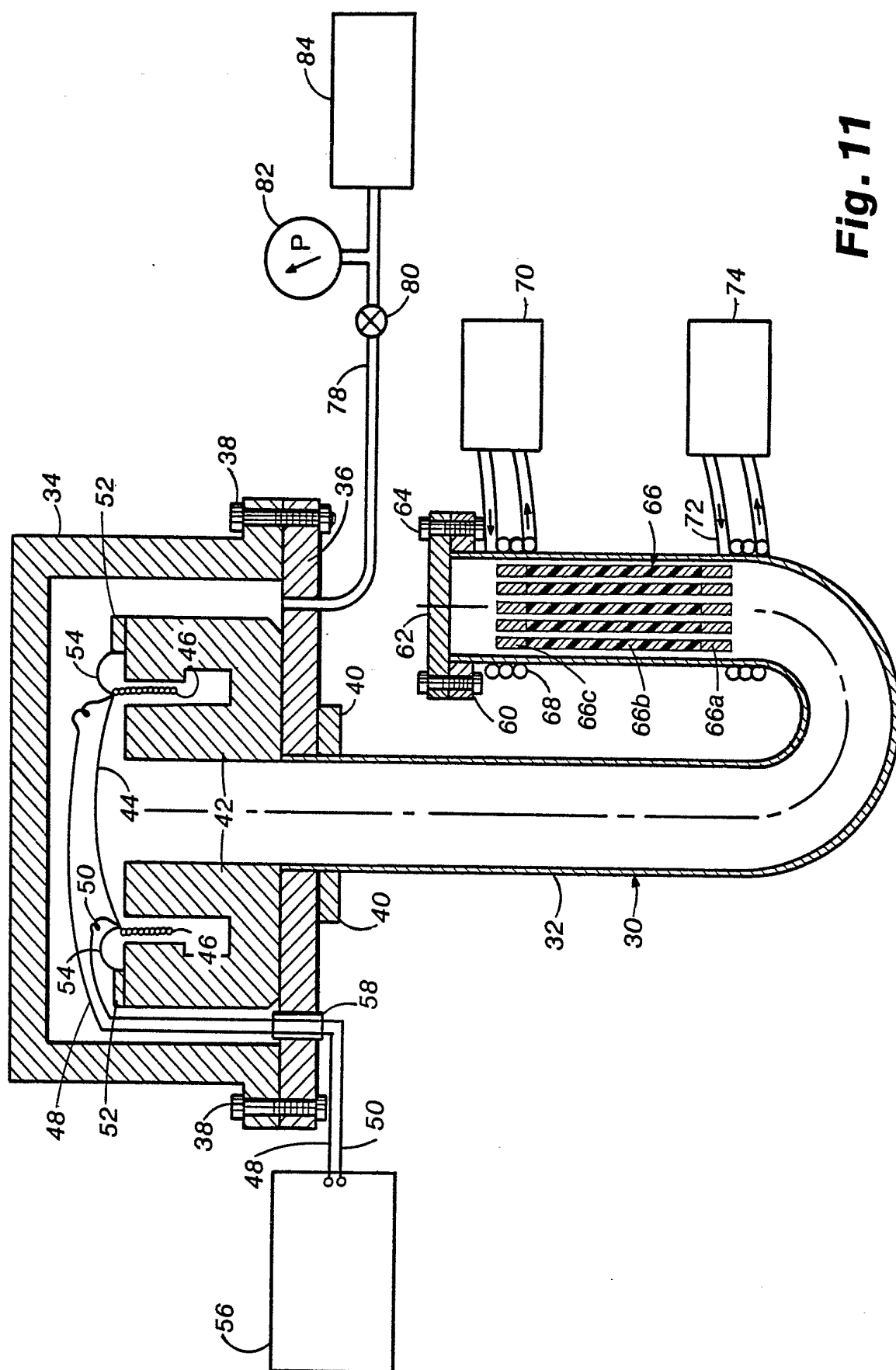


Fig. 11