NORGE

(12) **UTLEGNINGSSKRIFT**

(19) NO (11) **173708** (13) B

(51) Int Cl[5] F 02 G 3/00, F 25 B 9/00, F 23 C 11/04

Styret for det industrielle rettsvern

(21) Søknadsnr 874621
(22) Inng. dag 05.11.87
(24) Løpedag 05.11.87
(41) Alm. tilgj. 09.05.88
(44) Utlegningsdato 11.10.93

(86) Int. inng. dag og søknadsnummer
(85) Videreføringsdag
(30) Prioritet 06.11.86, GB, 8626562

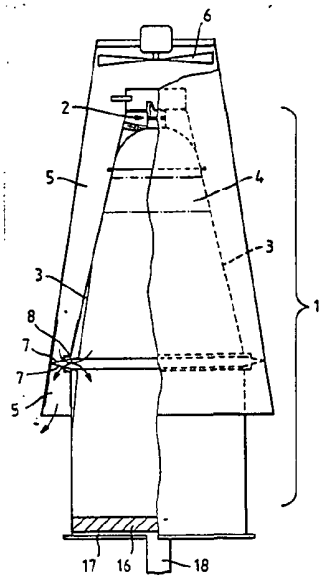
(71) Patentsøker Haser Company Limited, Moray House, 16 Bank Street, Inverness IV1 1QY, Skottland, GB
(72) Oppfinner Alan Arthur Wells, Ely, Cambridgeshire, England, GB
(74) Fullmektig Pål Gulbrandsen, Bryn & Aarflot AS, Oslo

(54) Benevnelse **Gassresonansanordning**

(56) Anførte publikasjoner US 2717637, 3545211, 4650413.

(57) Sammendrag

Termisk drevet gassresonansanordning omfattende et resonansrør (3) med tverrsnitt som utvides i lengderetningen fra den ene ende til den annen, en varmekilde (2) ved den ene ende av resonansrøret, og midler (2, 4) for utløsing av svingninger i en gass i resonansrøret. Varmekilden (2) er fortrinnsvis av pulserende type med en pulsrepetisjonsfrekvens i motsvarighet til en resonansfrekvens for gassen i resonansrøret (3). Den mekaniske energi som frembringes i den oscillerende gass i gassresonansanordningen, kan utnyttes for drift av en trykksvingningsgasseparator, ved å innføye et leie (16) av molekylsiktmateriale i den annen ende av resonansrøret (3). Den mekaniske energi kan alternativt anvendes for drift av en varmepumpe (19). En varmekappe (21) er i såfall anordnet ved den annen ende av resonansrøret (3), en regenerator (20) er likeledes anbragt ved den annen ende, og regeneratoren (20) er på den side som er vendt mot varmekilden (2), forsynt med midler (8) for opprettelse av varmeveksling mellom gassen i resonansrøret (3) og en lavvarmekilde.



Oppfinnelsen angår en termisk drevet gassresonans-anordning, omfattende et forbrenningskammer med midler inkludert en varmekilde for utløsing av svingninger i en gass i forbrenningskammeret.

I en svingende gassøyle blir en liten gassone først forskjøvet i én retning, hvoretter den komprimeres, tilbakeføres i den motsatte retning og ekspanderer. Gassen oppvarmes under komprimeringen og avkjøles under ekspanderingen. Når en slik svingende gassøyle bringes i kontakt med et stasjonært, fast medium, oppstår en varmeoverføring mellom gassen og mediet. Et medium med en høy, effektiv varmekapasitet, jevnført med gassens, og en lav varmeledningsevne i gassvingningenes forover-retning, vil lagre varme som oppstår som følge av den adiabatiske komprimering av gassen, og deretter tilbakeføre denne lagrede varme til gassen etter at denne har ekspandert. Mens dette gjelder for gassoner som alltid befinner seg nær mediet, er situasjonen en annen ved endene av mediet. Ved den bakre ende av mediet, sett i svingningens forover-retning, blir en gassone i varmekontakt med mediets endepartier forflyttet i den ene retning bort fra mediet, og komprimert under oscilleringen. Gassen oppvarmes under komprimering. Ved påfølgende bevegelse i den annen retning og ved komprimering vil gassen tilbakeføres til stillingen ved mediets endeparti. Her vil gassen, grunnet avkjølingen under ekspanderingen, atter motta varme fra mediet. Det dannes derved en sone av oppvarmet gass bakenfor mediets bakre endeparti. Ved mediets fremre ende vil derimot gasspartikler som normalt ikke er i kontakt med mediet, beveges fremad i den ene retning under oscilleringen, komprimeres og oppvarmes og deretter bringes i varmekontakt med mediet i sin fremre stilling, og avgi varme til mediet. Når denne gassone beveges bakover i den motsatte retning under tilbakeføringen til utgangsstillingen, vil den ekspandere og avkjøles. Da gasspartiklene i sin utgangsstilling er ute av varmekontakt med mediet, vil det dannes en kald sone foran mediets fremre ende.

Et slikt medium som befinner seg i en svingende gassøyle, betegnes vanligvis som en regenerator, og er ofte brukt ved sterlingsyklus-motorer. En slik regenerator må typisk ha en størst mulig overflate, en stor, effektiv varmekapasitet i

forhold til gassens og en lav varmeledingsevne langs gassbevegelsesretningen. Patroner av tilfeldig tettpakket metalltråd er konvensjonelt brukt som regenerator, men det kan også anvendes tettpakkede stabler av ikke-metalliske plater, og dette er gunstigere med tanke på gassfriksjonstap og varmeoverføring. Anvendelsen av en regenerator gjør det således mulig å opprette en temperaturdifferanse av en oscillerende gasstrøm. Omvendt, er det også kjent at hvis det opprettes en temperaturdifferanse av tilstrekkelig størrelse langs en slik regenerator, vil det momentant oppstå svingninger i gassen som omgir denne regenerator.

Det er også kjent at det i en gassøyle i et resonanskammer kan frembringes svingninger helt enkelt ved overføring av varme til den ene ende av kammeret, dersom det er opprettet en tilstrekkelig høy temperaturforskjell. Det kan f.eks. nevnes at det kan fremkalles resonans i gass i en orgelpipe ved hjelp av en hydrogenflamme i bunnen av pipen, som beskrevet av Higgins så langt tilbake som i 1777, og at det ved plassering av et rør ved romtemperatur i en kryogenisk lagertank, oppstår taconis-svingninger, som rapportert i 1949.

En fornuftsbegrunnet redegjørelse over disse virkninger er gitt i en artikkel av Wheatley, Hofler, Swift og Migliori, med titel "An intrinsically irreversible thermoacoustic engine", offentliggjort i the American Journal of Physics, bind 53 (2), side 147, februar 1985.

Fra US 3 545 211 er det kjent en gassresonansanordning av den innledningsvis angitte art. Denmne kjente anordning er slik konstruert at det dannes en venturi i overgangen mellom forbrenningskammeret og den etterfølgende gass-utløpsdyse, hvilket virker til å øke gassens hastighet idet den strømmer gjennom venturien. Ettersom friksjonstap i et oscillerende system av den ovenfor omtalte art er proporsjonale med tredje potens av gasshastigheten, innebærer dette kjente arrangement store friksjonstap ved sideveggen som gassen strømmer langs. Som ytterligere eksempler på kjent teknikk kan nevnes US 2 717 637 og US 4 650 413.

Hovedformålet med foreliggende oppfinnelse er å komme frem til en gassresonansanordning av den innledningsvis angitte art, med lavest mulig friksjonstap, og dette oppnås ved at forbrenningskammeret er i form av et resonansrør med tverrsnitt som utvides i lengderetningen fra den ene ende til den annen, at resonansrøret er av avkortet spissbueform, sett i lengdesnitt, med sidevegger som er buet utad, og at midlene for utløsing av svingninger er anordnet inne i resonansrøret ved en ende av dette.

Det kan være anordnet et enkelt og indirekte varmesystem hvori varmekilden, eksempelvis i form av et elektrisk varmeelement eller et gass- eller oljebrenneraggregat, tjener for oppvarming av en plate som danner eller er plassert i den ene ende av gassresonansrøret. Platen er fortrinnsvis forsynt med finner ved den ene ende av resonansrøret. En regenerator kan være innmontert i resonansrøret umiddelbart ved men ute av berøring med den oppvarmede plate og i avstand fra innretningen for utløsing av svingningene. Regeneratoren består av et materiale med stor overflate, en høyeffektiv varmekapasitet, jevnført med gassen i resonansrøret, og en lav varmeledingsevne i resonansrørets lengderetning, og under drift vil varmekilden bevirke, at det langs regeneratoren opprettes en temperaturgradient som utløser svingningene i gassen i resonansrøret.

Imidlertid vil det i høy grad foretrekkes at både varmekilden og innretningen for utløsing av svingningene i gassen i resonansrøret består av en pulserende varmekilde med en pulsrepetisjonsfrekvens i motsvarighet til en resonansfrekvens for gassresonansrøret. En slik pulserende varmekilde kan bestå av et pulserende forbrenningskammer eller en resonansflamme som mottar en forutblandet tilførsel av lettantennelig gass eller damp og luft gjennom en ventil med en bakenforliggende flammefelle og en tennanordning som først vil antenne blandingen i den ene ende av resonansrøret eller i et forbrenningskammer som utmunner i resonansrøret. Blandingen tilføres fortrinnsvis gjennom en justert énveisventil som, i avhengighet av den pulserende forbrenning, oscillerer mellom åpen og lukket

stilling, for innføring av blandingsporsjoner i den ene ende av resonansrøret eller forbrenningskammeret, for påfølgende antenning. Anvendelsen av den pulserende varmekilde for utløsing av svingningene i gassen i resonansrøret gir lett starting under vidt forskjellige forhold, med etterfølgende, stabil resonansfunksjon. Det kan benyttes en tennanordning i form av en tennplugg for innledende antenning av den pulserende varmekilde, men det foretrekkes at denne, etter å være antent, er selv-underholdende. Dette kan oppnås ved at etterfølgende blandingssatser antennes av den svinnende flamme fra en forutgående forbrenningspuls, ved spontan antenning som følge av en kompresjonsbølge eller ved hjelp av en tennanordning i form av en glødeplugg som fremkaller et lokalt, varmt punkt som forårsaker antennelse.

Den pulserende varmekilde kan også innbefatte en indirekte oppvarmer som er plassert ved den ene ende av resonansrøret. Denne indirekte oppvarmer kan bestå av en varmevekslingsflate som oppvarmes av den pulserende varmekilde og derved fordeler forbrenningsvarmen stort sett jevnt over tverrsnittsflaten ved den ene ende av resonansrøret. Hvis gassresonansanordningen innbefatter et pulserende forbrenningskammer, er den ene ende av resonansrøret fortrinnsvis utformet som en parabolreflektor som vil fordele effekten fra den pulserende forbrenning mer ensartet over den ene ende av resonansrøret. Det vil i såfall sørges for at den pulserte forbrenning finner sted stort sett i parabolreflektorens brennpunkt. Hvis gassresonansanordningen innbefatter en pulserende varmekilde, kan den også være forsynt med en regenerator som samvirker med en opprettet temperaturgradient, og derved forsterker de svingninger som fremkalles av den pulserende varmekilde.

Med alle disse anordninger for frembringelse av svingninger i gassen må resonansrøret være utformet både for frembringelse av de nødvendige, relative trykk og adiabatiske temperaturamplituder ved de to ender av røret og for minsking av gassens veggfriksjonstap som vil hemme gassens resonanssvingninger. Ved at resonansrøret øker i tverrsnitt fra den ene

ende mot den annen, vil det i den snevre ende utvikles trykk- og adiabatiske amplituder som er større enn i den vide ende, som nærmere beskrevet i det etterfølgende. Resonansrøret er fortrinnsvis av stort sett rettavkortet kjegleform, hvor forholdet mellom grunnflatediameteren og høyden er tilnærmelsesvis lik 1:3. For den langsgående svingning som kan betraktes som et gasstempel, vil dette for det første gi det størst mulige forhold mellom diameter og lengde, med derav følgende minsking av veggfriksjonstapene. Resonansrørets resonansfrekvens avhenger hovedsakelig av rørlengden, og er uavhengig av rørformen. Ved å sørge for at resonansrøret øker i tverrsnittsstørrelse fra den ene ende til den annen, er det mulig å øke gassmengden som svinger og derved minske gassens hastighet for et gitt forhold mellom volum og kompresjon. Friksjonstapene er proporsjonal med gasshastigheten i tredje potens, og dette vil følgelig redusere friksjonstapene betydelig til fordel for resonansanordningens virkemåte. Sett i lengdesnitt har resonansrøret fortrinnsvis en rettavkortet spissbueform med sidevegge som er bueformet, sett i tverrsnitt. Dette gir en ekstra økning i mengden av svingende gass nærmest den ene ende, hvorved friksjonstapene reduseres ytterligere.

Den mekaniske energi som produseres i den oscillerende gass i gassresonansanordningen, kan utnyttes for drift av en trykksvingnings-gasseparator med et molekylsiktmateriale. Ved en av de enkleste metoder anvendes gassresonansanordningen i et apparat for trykksvigningsseparasjon av oksygen fra luft. Den annen ende av resonansrøret inneholder i dette tilfelle et molekylsiktmateriale, og en gassvekslingsåpning er anordnet på den side av molekylsiktmaterialet som er vendt mot varmekilden, og et gassutløp er anordnet på den side av molekylsiktmaterialet som er vendt fra varmekilden. Når oscillerende luft beveges fremad gjennom leiet av molekylsiktmaterialet, vil fortrinnsvis nitrogen adsorberes av materialet. Under luftens bevegelse bakover oppstår et redusert trykk, og adsorberte gasser på overflaten av molekylsiktmaterialet desorberes. Når molekylsiktmaterialet således utsettes for svingningene som oppstår i resonansrøret, vil nitrogen som fortrinns-

vis er adsorbert av molekylsiktmaterialet føres tilbake til resonansrørets innerside og videre ut gjennom gassvekslingsåpningen, mens derimot oksygen som i mindre grad er adsorbert av molekylsiktmaterialet, vil ledes gjennom leiet av molekylsiktmaterialet og ut fra gassutløpet ved den bakre side av materialet. De endelige forflyttinger av gassen, som foregår under oscillasjonen, skaper et middeltrykk som er litt høyere enn det rådende trykk i resonansrøret, og en kontinuerlig strøm av separert oksygen vil derved avledes fra undersiden av siktmaterialleiet.

Molekylsiktmaterialet består typisk av ekspandert zeolitt, men aktivt karbon kan også brukes. Molekylsiktmaterialet har fortrinnsvis en overflate av tilstrekkelig størrelse for oppnåelse av en høy nitrogenadsorbsjonshastighet, og det har vist seg at den kumulative adsorpsjons- og desorpsjonsmengde er proporsjonal med trykksvigningen og praktisk talt uavhengig av syklushastigheten.

Ved en alternativ versjon blir den mekaniske energi som frembringes i den oscillerende gass i resonansrøret, utnyttet for drift av en varmepumpe. Gassresonansanordningen er i dette tilfelle utstyrt med en varmekappe i den annen ende, en regenerator ved den annen ende og en innretning på regeneratorens side mot varmekilden, for opprettelse av varmeveksling mellom gassen i resonansrøret og en lav-varmekilde.

Med denne anordning blir de tidligere beskrevne effekter utnyttet for frembringelse av en varmemotordrevet varmepumpe. Svingningene i gassen i resonansrøret overføres derved til regeneratoren, for opprettelse av en temperturdifferanse langs denne, slik at gassen bakenfor regeneratoren ved den annen ende av resonansrøret oppvarmes mens gassen foran regeneratoren avkjøles. Varmevekslingen som finner sted foran regeneratoren gir varme for ekspandering av gassen foran regeneratoren og danner kilden for den varme som pumpes og som utgjør en del av varmen som fjernes ved hjelp av varmekappen ved den annen ende av resonansrøret. I tillegg til dette vil varmekappen ved den annen ende av resonansrøret også motta varme fra varmekilden. Patentsøkeren har laget et nytt bokstavord HASER

som skal beskrive denne type av varmemotordrevet varmepumpe og som, analogt med bokstavordene laser og maser, betyr "Heat Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

Hvis atmosfæren danner lav-varmekilde, er det å foretrekke at en direkte varmeveksling finner sted mellom atmosfæren og gass i en sone foran regeneratoren. For å oppnå dette, er det anordnet gassvekslingsåpninger i resonansrørets sidevegg i trykknullpunkts-posisjonen. Idet de langsgående vibrasjoner passerer nedad gjennom resonansrøret, vil ytterluften innsuges i resonansrøret gjennom åpningene, etter at kompresjonssvingningen har passert disse. Gassen som innsuges i resonansrøret fra atmosfæren, blandes deretter med gassen i resonansrøret, og det oppstår derved en varmeveksling mellom gassen fra atmosfæren og den tilstedeværende gassen i resonansrøret. Den etterfølgende svingning vil deretter drive den på dette tidspunkt avkjølte, atmosfæriske luft ut av åpningene.

Fortrinnsvis er imidlertid haseren også utstyrt med en vifte for leding av luft fra atmosfæren gjennom gassvekslingsåpningene og inn i resonansrøret. Resonansrøret er fortrinnsvis omsluttet av et ytterkammer med viften montert i den øvre ende, dvs. den ende av resonansrøret som er forbundet med varmekilden, og en ringformet, korrugert ledeplate er anordnet ved gassvekslingsåpningene, for leding av luft som innblåses av viften, gjennom halvdelen av åpningene mens avkjølt luft forlater den annen halvdel av åpningene og strømmer gjennom den nedre del av ytterkammeret. Luften som gjennomstrømmer ytterkammeret, absorberer varme som avgis fra varmekilden og den øvre del av gassresonansrøret, og denne varme gjeninnføres i systemet som en del av lav-varmen, for ytterligere øking av haserens varmeutstrømning.

Utvidelsen av resonansrørtverrsnittet fra den ene ende til den annen medfører ytterligere fordeler i en haser. Forholdet mellom de to endepartiers tverrsnittsflater er bestemmende for kompresjonsforholdet som oppstår ved tverrsnittsflaten. Et trangt tverrsnitt gir et høyt kompresjonsforhold og omvendt. Virkningen av dette kan avledes av en akustisk teori for små fortrengninger, og er utviklet for det

spesielle, etterfølgende eksempel. Resonansrørtverrsnittet som utvides fra den ene ende til den annen, gir et høyt kompresjonsforhold ved drivenden og et lavt kompresjonsforhold ved pumpeenden, og det oppnås derved en optimal varmevirkningsgrad.

Varmekappen ved den annen ende av resonansrøret kan inneholde et grunt vannreservoar, og det foretrekkes i såfall at finner, eksempelvis av metall, med god varmeledingsevne befinner seg i varmekontakt med vannreservoaret og strekker seg inn i rommet mellom dette og den bakre side av regeneratoren. En slik
varmekappe har god varmekontakt med den varme gassen bakenfor regeneratoren. Vannet i reservoaret sirkulerer gjennom et system som tjener for avleding av varme fra den annen ende av resonansrøret og som kan være utstyrt med énveisventiler på begge sider av reservoaret, slik at vannet drives gjennom systemet som følge av de trykksvingninger innvendig i resonansrøret, som virker mot overflaten av vannet i reservoaret.

En slik haser er spesielt egnet for anvendelse som en varmtvannsgenerator for oppvarming og avkjøling av et boligbus. Haseren vil vanligvis plasseres i bygningens takrom, og dette blir om vinteren ventilert eller tilført ytterluft som derved danner lav-varmekilden. Varmekappen ved resonansrørets annenn ende tjener for oppvarming av vann til en temperatur av ca. 40°C, og dette vannet som skal dekke behovet for varmtvann i boligene, sirkulerer gjennom et sentralvarmesystem i bygningen. Om sommeren benyttes haseren for avkjøling av bygningen, idet takromsventilasjonen avstenges og kjøleåpninger i værelsetakene under takrommet åpnes, eller luften som forlater haseren, ledes gjennom kanaler til rommene. Vann fra varmekappen ved den annen ende av resonanskammeret anvendes for boligens varmtvannsbehov og avledes dessuten til en varmeveksler på utsiden av bygningen, hvor det avkjøles. Den resulterende, avkjølte luftstrøm fra resonansrøret avkjøler takrommet og deretter bygningen, gjennom kjøleåpningene i takene eller gjennom kanalsystemet.

En trykksvingnings-gasseparator kan kombineres med en haser ved å anbringe molekylsiktmateriale i resonanskammeret ovenfor regeneratoren. Med denne kombinasjon vil utgangen fra utløpsåpningene være avkjølt og rik på nitrogen. Den er derfor gunstig for bevaring av lettbedervelige varer, og en slik kombinert anordning danner en lett bærbar og selvunderholdende kilde for nitrogenanriket, kald luft.

Oppfinnelsen er nærmere beskrevet i det etterfølgende under henvisning til de medfølgende tegninger, hvori:

Figur 1 viser et sideriss, delvis i snitt, av en trykksvingnings-gasseparator.

Figur 2 viser et sideriss, delvis i snitt, av en haser.

Figur 3 viser et snitt gjennom en varmekilde.

Figur 4 viser et diagram som angir resonansrørdimensjonene og gassfortrengningene.

Figur 5 viser et diagram som illustrerer resonansrørets egenskaper.

Figur 6 viser et annet diagram hvorav det fremgår hvordan fortrengnings- og tetthetsamplituder varierer, i forhold til tiden, langs resonansrøret.

Figur 7 viser et ytterligere diagram som illustrerer virkningen av ogivalkorrigering.

Figur 8 viser et diagram hvor tempertur er avsatt mot posisjon, for illustrering av regeneratorens virkemåte.

Både trykksvingnings-gasseparatoren og haseren som er vist i henholdsvis figur 1 og figur 2, omfatter en varmemotor 1 bestående av en pulserende varmekilde 2 som er montert i den ene ende av et resonansrør 3 som i lengdesnitt er spissbueformet. Resonansrøret 3 har slike totaldimensjoner at høyden tilsvarer ca. tre ganger grunnflatediameteren. En regenerator 4 kan være innmontert mot resonansrørets øvre ende og er av en ikke-metallisk bikake-type som typisk er tilvirket av glass eller glasslignende materiale. Et ytre, konsentrisk ringkammer 5 omslutter resonansrøret 3, og en elektrisk drevet vifte 6 er montert øverst, for blåsing av luft nedad gjennom kammeret 5. En ringformet, korrugert skjermplate 7 leder luftstrømmen gjennom vekselvis åpne kanaler 8 som er anordnet i et

trykknullpunkt i resonansrørets 3 sidevegg. Luft utstrømmer gjennom de andre kanaler 8 og et nedre parti av ytterkammeret 5. De åpne kanaler 8 frembringer en munningsstrøm, og den innadrettede luftstrøm gjennom de vekselvise kanaler 8 er derfor sterkt konvergerende, hvilket forebygger uønsket blanding av innstrømningen og utstrømningen gjennom kanalene 8.

Den pulserende varmekilde 2 som er vist mer detaljert i figur 3, omfatter et gassblandekammer 9 hvori tilført gass og luft sammenblandes, en énveis-resonansventil 10 med lignende resonansfrekvens som resonansrøret 3, og en flammefelle 11. Énveis-resonansventilen 10 kan være av samme type som den som er innmontert i totakts-motorer, og innbefatter en åpning 12 som dekkes av en fjærende plate 13 som langs den ene kant er fastgjort til åpningen 12. Når det øyeblikkelig rådende trykk i resonansrøret 3 er større enn i gassblandekammeret 9, vil ventilen holdes lukket, idet den fjærende plate 13 danner en avtetning mot kantene av åpningen 12, og under innvirkning av en øyeblikkelig minskning i trykk i resonansrøret 3 i forhold til trykket i gassblandekammeret 9, vil fjærplaten 13 bøyes slik at blandingen av gass og luft kan passere gjennom åpningen 12 og inn i resonansrøret 3. I en foretrukket utførelse som fører til at gassblandingen leveres mer i fase med resonanskammer-trykkpulsen, med deravfølgende forbedret puls-forbrenning, består énveis-resonansventilen av en metallskive med forholdsvis stor diameter, plassert koaksialt med forbrenningskammeret, fastspent ved sine kanter til en noe konkav underlagsplate hvor flammefellen er sentralt beliggende. Gassblanding innføres med lavt trykk til et innvendig ringrom nær de fastspente kanter, og blir derved ført radielt innad i pulser mot flammefellen. Skiven har en slik tykkelse at dens egen frekvens ved aksiell svingning er lavere enn resonanshulrommets egen frekvens, slik at gassdempingen og hulrom-trykkpulsene sammen virker til å frembringe vesentlig anti-fase-svingninger i skiven ved hulrommets resonansfrekvens. Disse svingninger innfører gassblanding gjennom flammefellen til forbrenningskammeret på tidspunktet for trykkstigning istedenfor på tidspunktet for maksimal sugevirkning, og først-

nevnte minsker graden av for tidlig forbrenning, hvilket er ineffektivt med hensyn til varmemotor-funksjon. Den pulserende varmekilde 2 omfatter videre en tennplugg 14, og den øvre ende av resonansrøret 3 danner en parabolreflektor 15 som fordeler effekten fra den pulserende varmekilde stort sett jevnt over enden av resonansrøret 3.

Varmemotoren 1 driver en gassvingning nedad langs resonansrøret 3, og den vertikalt oscillerende gassmengde fungerer som et stempel som frembringer trykk- og adiabatiske temperatursvingninger øverst og nederst i røret 3. Svingningene utløses av tennpluggen 14 som først antenner gass-luftblandingen som er innført i den øvre ende av resonansrøret 3, og når gassen i røret 3 bringes i resonanssvingninger og det gjennom ventilen 10 innføres innbyrdes påfølgende ladninger av blanding, vil disse deretter antennes av den svinnende flammen fra den foregående antennelse. Derved frembringes en pulsert forbrenning som får en repitisjonsfrekvens av ca. 200 Hz i et resonansrør av lengde ca. 1 m. Regeneratoren 4 øker ytelsen av varmemotoren 1 ved å øke temperaturen i den øvre ende av resonansrøret 3 og øke amplituden i de fremkalte svingninger.

Den nettopp beskrevne varmemotor 1 kan anvendes for frembringelse av den mekaniske inngangsenergi for en trykksvingnings-gasseparator, og det vil i såfall, som vist i figur 1, være anordnet et grunt leie 16 av en zeolitt som fortrinnsvis adsorberer nitrogen, ved den nedre ende av resonansrøret 3, hvis underside er lukket av en plate 17 med et gassutløp 18. Under resonanssvingningen i resonansrøret 3 mens luften ledes fremad i zeolittleiet 16, vil særlig nitrogen adsorberes av zeolitten. Under luftens tilbakegående bevegelse oppstår et redusert trykk, og gassene som er adsorbert på zeolittytterflaten, desorberes, hvorved nitrogenanriket luft desorberes. Som følge av de endelige gassfortrengninger som foregår under oscilleringen, blir middeltrykket innvendig i resonansrøret 3 større enn atmosfæretrykket, slik at en gasstrøm som passerer gjennom zeolittleiet 16, forårsaker en oksygenanriket gassutstrømning fra utløpet 18, mens strømmen av gass gjennom åpnin-

gene 8 og gjennom den nedre del av kammeret 5 er rik på nitrogen.

Varmemotoren 1 kan alternativt benyttes for frembringelse av mekanisk energi for drift av en varmepumpe 19. En varmemotordrevet varmepumpe har en total virkningsgrad (COP):

$$COP = \frac{\text{lavvarme, ut}}{\text{høyvarme, inn}}$$

større enn én, forutsatt at det adiabatiske temperaturforhold er betydelig større hos den førstnevnte enn hos den sistnevnte. Varmeytelsen kan således suppleres direkte med varme som utgår fra varmemotoren 1. Anordningens varmepumpedel 19 omfatter en regenerator 20 av en ikke-metallisk cellekonstruksjon, typisk bestående av glass eller glasslignende materiale, og en varmekappe 21. Varmekappen 21 er dannet av et grunt reservoar av vann 22 i den videste ende av resonansrøret 3 og metalliske finner 23 i varmekontakt med det grunne reservoar av vann 22, som strekker seg inn i resonansrøret 3 mot regeneratoren 20. Luft som i dette tilfelle danner lav-varmekilden innstrømmer og utstrømmer gjennom åpningene 8, og fra denne luft ekstraheres varme ved hjelp av varmepumpen 19, for overføring til vannet 22 i varmekappen 21.

Under drift vil varmemotoren 1 fremkalle gassvingninger innvendig i resonansrøret 3. Disse svingninger gir drivkraft for varmepumpen 19 samt regeneratoren 20. Når gassen svinger rundt regeneratoren 20, blir rommet under regeneratoren 20 oppvarmet og rommet over regeneratoren 20 avkjølt. Luftstrømmen gjennom åpningene 8 blandes med gass i resonansrøret 3, og avgir varme til gassen i resonansrøret 3 ovenfor regeneratoren 20. Gjennom varmekappen 21 fjernes varmen som oppsamles under regeneratoren 20.

Nivået i det grunne reservoar 22 av sirkulerende vann i varmekappen 21 reguleres av en flottørventil (ikke vist). Et vanninnløp og et -utløp for reservoaret 22 innbefatter énveis-ventiler (ikke vist), og gassvingningene som oppstår i resonansrøret 3, virker mot overflaten av vannet i reservoaret 22 og bringer vannet i sirkulasjon gjennom énveis-ventilene i innløpet og utløpet. Vannutløpstemperaturen vil typisk ligge

på ca. 40°C, og utløpet kan benyttes som en bolig-varmtvannskilde eller en varmtvannskilde for drift av et sentralvarmesystem. En haser som vist i dette eksempel, kan vanligvis innmonteres i takrommet i en bygning som ventileres om vinteren, slik at ytterluft kan danne lav-varmekilden og innstrømme og utstrømme gjennom åpningene 8. Hvis bygningen ønskes avkjølt i sommermånedene, kan takromsventilatorene stenges og taksjalusiene åpnes slik at den avkjølte luft som frembringes av haseren, kan synke ned i huset. Varmtvannet som utstrømmer fra varmekappen 21 vil i dette tilfelle, etter at behovene for varmtvann i boligen er dekket, ledes til en atmosfærisk utendørs-varmeveksler, for avleding av varmen som er frembragt i haseren, innen luften resirkuleres. COP-måleverdien for en slik haser vil under oppvarming være lik 2.

Detaljene ved gassresonansdynamikken, ønskeligheten av et spissbueformet resonanskammer, en beskrivelse av veggfriksjonstapene og en beskrivelse av regeneratorens 20 karakteristika omfattes av det etterfølgende.

Gassresonans-dynamikken

For å konstruere en haser er det nødvendig å utvikle en kvantitativ behandling av gassbevegelser. Lineære, elastiske fortrengninger av et ensartet, fast stoff eller fluidum i en parallell utforming (figur 3A) bestemmes ved hjelp av en velkjent ligning:

$$\partial^2\alpha/\partial t^2 = c^2 \partial^2\alpha/\partial x^2 \qquad (1)$$

hvor α er forskyvningen ved referanseavstanden x, t er anvendt tid og c er lydhastigheten. For en stående bølge i et rør med uforandret tverrsnitt og lukkede ender er α proporsjonal med:

$$\sin \frac{\pi x}{1} \quad \frac{\pi ct}{1}$$

Den motsvarende bestemmelsesligning for sfærisk symmetri, som kan anvendes for svingende strømning i en rettavkortet kjegle, har vært kjent fra Cauchys og Poissons tid, og lyder slik:

$$\frac{\partial^2 (r\alpha)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (r\alpha)}{\partial r^2} \qquad (2)$$

hvor r er definert som i figur 4b. I begge tilfeller

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_o}{\rho_o}} ,$$

hvor γ betegner det spesifikke varmeforhold og p_o er middeltrykket ved tettheten ρ_o. Hvis den rettavkortede kjegle har radiene b og a, kan det lett verifiseres at løsningen for en stående bølge med vilkårlig konstant A er:

$$r\alpha = \frac{Al}{\pi} \sin \frac{\pi}{l} (r-b) \sin \frac{\pi c t}{l}$$

slik at:

$$\alpha = A \frac{\sin \frac{\pi}{l} (r-b)}{\frac{\pi r}{l}} \sin \frac{\pi c t}{l} \qquad (3)$$

som blir null både ved r=b og r=a, da a-b=1. Uttrykket kan forenkles slik:

$\frac{\pi r}{l} = \theta$, $\frac{\pi b}{l} = \theta_o$, $\frac{\pi \alpha}{l} = \Theta'$, $\frac{\pi A}{l} = \mu$, og $\frac{\pi c}{l} = \omega$ slik at

$$\theta' = \mu \frac{\sin (\Theta - \Theta_o) \sin \omega t}{\theta} \qquad (4)$$

Θ' oppnår et maksimum når $\partial\Theta'/\partial\Theta = 0$, og følgelig når $\Theta = tg (\Theta-\Theta_o)$,
som kan løses, uttrykt ved Θ_o, for spesielle verdier av Θ, som i figur 5, idet:

$b/a = \Theta_o / \pi + \Theta_o$ og $d/l = \Theta - \Theta_o / \pi$,

hvor d er maksimumsposisjonens avstand fra smalenden.

Ved å utelate mindre kvantiteter av andre orden kan det vises at det øyeblikkelige tetthetsforhold er:

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \left[1 + \frac{2a}{r} + \frac{\partial a}{\partial r} \right]^{-1}$$

$$= \left[1 + \frac{A}{r} \cos \omega t \left\{ \cos (\Theta - \Theta_o) + \frac{\sin (\theta - \theta_o)}{\theta} \right\} \right]^{-1} \qquad (5)$$

som er én når $\Theta = - tg (\Theta - \Theta_o)$, og løses på samme måte ved beregning av d'/l med resultatene avsatt i figur 5. Det at maksimalforskyvningen og -hastigheten oppstår i en posisjon som er forskjøvet fra midtpunktet og mot kjeglens smalende, mens tetthets- og trykknullpunktet er forskjøvet en motsvarende avstand mot videnden.

Grenseverdiene for ρ_o fra ligning (5) oppnåes når cos ωt og cos $(\Theta-\Theta_o)$ begge er lik ± 1, slik at volumkompresjons-forholdene m_o og m_1 kan defineres i forbindelse med henholdsvis den smale og den vide ende. Derav:

$$m_o = \frac{1 + \frac{A}{b}}{1 - \frac{A}{b}}, \quad m_1 = \frac{1 + \frac{A}{a}}{1 - \frac{A}{a}} \qquad (6)$$

Hvis m_o og b/a er spesifisert, kan A elimineres ved utleding av ligning (6):

$$\frac{A}{b} = \frac{m_o - 1}{m_o + 1}$$

hvoretter:

$$m_1 = 1 + a/b \cdot m_o - 1/m_o + 1 \; / \; 1 - b/a, \; m_o - 1/m_o + 1 \qquad (7)$$

Videre kan det for enhver punktavstand x fra den smale ende utledes av ligning (3) eller (4), i kombinasjon med figur 5, at:

$$\Theta' = \pi\alpha/1 = m_o - 1/m_o + 1 \cdot \sin \pi x/1 \; / \; 1 + x/1 \; (a/b - 1) \qquad (8)$$

Særlig gjelder at x = d for maksimumsforskyvning eller -hastighet, og x = d' for den motsvarende forskyvning eller hastighet i nullpunktet for tetthet eller trykkforandring. Ved å ta i betraktning de endelige forskyvninger som angitt i diagrammet over grenseverdier for $\rho/\rho o$ mot $x/1$ som er vist i figur 6, fremgår imidlertid at den faktiske verdi av $\rho/\rho o$ ved nullpunktet er proporsjonalt redusert i forhold til referanseenhetsverdien. Verdien for denne proporsjonale reduksjon $\Delta \rho/\rho o$ kan beregnes ut fra hellingen av de kurver som er avledet fra ligning (5), henført til nullpunktet og multiplisert med den angjeldende forskyvning. Av ligning (8) med x = d' fremkommer således:

$$\Delta \frac{\rho}{\rho_o} = \left(\frac{\pi\alpha}{1} \right)^2 \qquad (9)$$

Det fremgår av dette at det er ekvivalent, overskytende middel-tetthet og trykk i åpensyklus-tilfeller, fordi innstrømning og utstrømning må balanseres.

Ovenstående analyse er som nevnt basert på lineær-elastiske forhold som for gasser bare oppnås ved små forskyvninger. Adiabatisk funksjonsmønster er ulineært, men virkningene av ulineæriteten er blitt inngående studert for frittstempel-anvendelser og har vist seg å være av betydning utelukkende ved høye kompresjonsforhold som selv er marginalt øket fra verdier som er beregnet ved hjelp av lineær-elastiske metoder, og endringstempoet er momentant øket slik at frekvensene er noe høyere enn beregnet. Lineærteorien gir vellykket forutsigelse av trykknullpunkts-plasseringen i eksperimenter med den svingende haser, men observerte resonansfrekvenser er høyere enn de forutsagte verdier vedrørende såvel den ovennevnte ulineæritet ved den adiabatiske gasskomprimering som lydhastighetens øking

med temperaturen i den øvre del av resonansrøret. Det kan derfor hevdes at den fremlagte teori er tilstrekkelig nøyaktig til å kunne benyttes trygt, og at motsvarende og proporsjonale, adiabatiske utslag i trykk og absolutt temperatur kan utledes av de proporsjonale tetthetsutslag ved at disse opphøyes i potensene henholdsvis γ og $\gamma-1$.

Virkningsgrad

Da den termodynamiske virkningsgrad i den oppvarmede rørende, bestemt av forholdet mellom absolutte temperaturer i syklusen, er:

$$\frac{m_o^{\gamma-1} - 1}{m_o^{\gamma-1}},$$

og den motsvarende varmepumpe-vinding, bestemt av forholdet mellom absolutte temperaturer i syklusen i absorberingsenden, er:

$$\frac{m_1^{\gamma-1}}{m_1^{\gamma-1} - 1},$$

følger at den ideelle virkningsgrad er:

$$COP = \frac{m_o^{\gamma-1} - 1}{m_o^{\gamma-1}} \cdot \frac{m_1^{\gamma-1}}{m_1^{\gamma-1} - 1} \qquad (10)$$

Med $\gamma = 1,4$ for luft er denne verdi 2,77 for eksempelet i figur 6, men den vil bli modifisert med flere faktorer.

For det første kan det hevdes at varmen ikke avvises ved den lave temperatur i motsvarighet til ekspansjonen i den oppvarmede rørende, og heller ikke absorberes ved en temperatur i motsvarighet til fullstendig kompresjon ved absorberingsenden. Dette er tatt i betraktning senere i forbindelse med regeneratorene, idet det demonstreres at regeneratorenes funksjon er å heve middeltemperaturene i begge ender, for å komme nærmere idealet.

For det andre bør det bemerkes, at selv om en del av veggfriksjonsvarmen vil kunne gjenvinnes med en vannkappe, på

samme måte som den varme som avvises ved enden av varmemotoren, vil den førstnevnte mått frembringes som mekanisk kraft underlagt den begrensede, termiske virkningsgrad ved varmemotorfunksjonen, og derved påvirket av et betydelig moment. Mekanisk kraft forbrukes også ved luftens innstrømming og utstrømming gjennom åpningene 7 og 8, men en del av dette tap er felles med veggfriksjonstapet, da begge har tilknytning til grenselaget.

Modifisering av spissbueformen

Ved gitte endediametre har dette som formål å øke mengden av oscillerende gass og derved minske gasshastigheten ved gitte volumkompresjonsforhold. Virkningen har sin verdi, fordi friksjonstapet er proporsjonalt med hastigheten i tredje potens. En fullstendig, numerisk analyse kan gjennomføres, men virkningen vil med sannsynlighet dekkes med en korrigering.

Nøkkelen til korreksjonsprosessen ligger i avhengigheten hos den naturlige frekvens f av lengden l av første orden, uavhengig av formen som kan være parallell, konisk eller spissbuet, slik at:

$$f = \frac{c}{2l}$$

Vinkelfrekvensen ω for et oscillerende system er også avhengig av:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

hvor k er stivheten og m er massen slik at stivheten, i spissbuetilfellet, må ansees å økes proporsjonalt med massen. Følgen av dette fremgår av figur 7 som viser tre imaginære, konsentriske kjegler OA, OB og OC. OA er den som inneholder diametrene av de to ender, og OB omskriver den spissbueformede kurve. Det vil fremgå at den foregående teori er uforandret i forhold til de tre kjegler, da forholdet b/a er det samme for samtlige. Kjeglen OC skjærer spissbuekurven og avgrenser derved en massesone og to stivhetssoner. Hvis diameterforholdet mellom OA og OC er 1 + e vil det, ved betraktning av volum og tverrsnittsflate, fremgå at stivheten også økes med forholdet 1 + e. Uavhengig av defini-

sjonen av e vil imidlertid det omsluttede volum som betegnes som masse, økes med en forholdsmessig del større enn 1 + 2e, og denne anomali kan forklares uttrykt ved det hydrodynamiske begrep om virtuell masse som i dette tilfelle er negativ på grunn av hastighetene som er lavere i den utvidede tverrsnittssone. Da stivheten kan beregnes uten tvetydighet, er det hensiktsmessig å anta at både stivhet og tilsynelatende masse er øket med 1 + e, og at OC defineres som den nøytrale akse i spissbuekurven mellom de to ender (samme tverrsnittsflate), slik at BC = e/2. I forhold til friksjonstap men ikke til kompresjonsforhold eller utgangsytelse vil spissbueformen fungere som en kjegle med diametre som økes i forholdet 1 + e, men med topphastigheter som avtar i forholdet

$$\frac{1}{1 + 2e}$$

Spissbueformen som er vist i figur 1 og 2, har den virkning at friksjonstapet reduseres med 50% under ellers like forhold.

Veggfriksjonstap

I mangel av spesielle data for svingende strømning i kjegler er det hensiktsmessig å betrakte stabiltilstands-friksjonen ved grenselag i et parallellrør av tilsvarende lengde og diameter. Friksjonskoeffisienten c_f avhenger av Reynolds tall, den er proporsjonal med flateruheten og er gitt ved Nikuradses standard-data. For Reynolds tall $>10^6$ og overflateruhet <50 mikron, vil en passende verdi for c_f være 0,0035.

Hvis aksialforskyvningen i et sylindrisk rør av radius R og halv bølgelengde l er gitt ved:

$$\alpha = \alpha_o \cos \frac{\pi x}{l} \cos \omega t$$

er aksialhastigheten $u = \partial\alpha / \partial t$, vegg-skyvespenningen $c_f \rho u^2/2$, og den lokale, øyeblikkelige driftshastighet $c_f \rho u^3/2$. Middel-driftshastigheten W, integrert over lengden av røret og i forhold til tiden, er:

$$W = \pi c_f \rho R l \omega^3 \alpha_o^3 \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 \theta d\theta \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^3 \Phi \cdot d\Phi \right]$$

Under hensyntaging til at kvantiteten i klammer er $1/\pi\ (r(2)/r(2,5))^2$, og ved beregning av Gamma-funksjonene fremkommer

$$W = 0,5666\ c_f \rho\ Rl\ \omega^3 \alpha_o^3$$
$$= c_f A\ \rho u_1^3/2, \text{ hvor } u_1 = 0,565 u_o . \qquad (11)$$

u_o er amplituden for aksialhastigheten og A er den totale veggflate.

Uttrykt som en brøk η av den kinetiske maksimumsenergi av gassen i røret, blir det samlede friksjonsarbeide gjennom en halvtakt:

$$\eta = \frac{0,72\ \pi\ c_f \alpha}{R} \qquad (12)$$

Det fremgår av disse betraktninger, at selv om friksjonstapene utgjør en betydelig del av den utviklede, mekaniske kraft, kan de kontrolleres særlig ved bruk av spissbueformen.

Regeneratoregenskaper

Helt siden Stirlingsyklus-motorer første gang ble konstruert har regeneratorer vært i bruk, og det er anerkjent at de gir store ytelsesøkninger. Deres funksjon som varmefiltre er å lagre varme som oppstår under en del av en frem- og tilbakegående syklus når gass passerer under en adiabatisk volumforandring, og tilbakeføre varmen til gassen når syklusen reverseres. Deres to viktigste kjennetegn består følgelig i et stort overflateareal som er tilgjengelig for gassen, i forening med en liten varmeledingsevne i gassens bevegelsesretning. De består typisk av oppstablede og innbyrdes adskilte, ikke-metalliske plater, da disse fungerer gunstig med hensyn til gassfriksjonstap og varmeoverføring.

Den fordelaktige bruk av regenerering i det foreliggende tilfelle fremgår av et diagram over grenseverdier for adiabatisk temperaturforandring (figur 7) som er utviklet av det motsvarende tetthetsforholds-diagram i figur 5. Skrålinjene i figur 7 angir kvantitativt de baner som følges av gassladninger som gjennomgår adiabatiske temperaturforandringer, men for enkelthets skyld på reverserbar måte, da linjene i praksis vil danne sløyfer på grunn av varmeoverføring. Posisjonene av regeneratorene 3 og 4 er vist, og det fremgår at disse ikke strekker seg til endene av resonansrøret, hvor varmeoverføringsflatene er anordnet. Mellomrommene er tilstrekkelig til å forebygge varmekontakt.

Linjene BB' og EE' representerer gassladninger som alltid er tilstede i regeneratorene. Disse gassladninger pumper varme mot en temperaturgradient, ved å motta varmen i ekspandert og kald tilstand i posisjoner mot midten av kammeret, og å avgi den ved varmeveksling i komprimert og varm tilstand i posisjoner mot enden av kammeret. I regeneratorene er det følgelig temperaturgradienter som skråner oppad ved endene av kammeret. Regeneratorenes middeltemperaturer er følgelig høyere enn omgivelsestemperaturen, fordi varmeveksling fra komprimert gass er mer effektiv enn fra fortynnet gass.

Den mest dyptgående virkning av regeneratorene finner sted ved deres ender nær endene av kammeret, fordi gassen innstrømmer i disse posisjoner i ekspandert og kald tilstand, og mottar varme. Den utstrømmer komprimert og varm slik at middeltemperaturen ved endene av kammeret øker betydelig. Virkningen kan spores med linjene AA' og FF'. Den omvendte virkning oppstår ved regeneratorenes innerender, som det fremgår av linjene CC' og DD'. Totalvirkningen er at middeltemperaturene øker betraktelig med opptil halve temperaturamplituden utenfor regeneratorene, og minsker i liten grad over en større mengde innenfor regeneratorene.

Regeneratorlengden bør overstige hovedforskyvningen i den foretrukne sone, og avstanden mellom den nedre regenerator og varmeabsorbereren bør være den praktisk minst mulige. Et optimalt kriterium for regeneratormaterialet er at den ledende varmeinntrengningsdybde for hver syklus ikke overstiger strimmeltykkelsen, og dette i forbindelse med den relevante transientvarmestrøm-behandling som:

$$t \sim 2\sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \qquad (13)$$

For $t = 0{,}1$ mm og $\omega = 817$/sek. angir dette en foretrukket varmeledingsevne α som er tilnærmelsesvis lik 10^{-2} cm^2/sek. som vil tilfredsstilles av glassmaterialer. Metaller har for stor ledingsevne.

P A T E N T K R A V

1. Termisk drevet gassresonansanordning, omfattende et forbrenningskammer med midler (2, 4) inkludert en varmekilde (2) for utløsing av svingninger i en gass i forbrenningskammeret, k a r a k t e r i s e r t v e d at forbrenningskammeret er i form av et resonansrør (3) med tverrsnitt som utvides i lengderetningen fra den ene ende til den annen, at resonansrøret (3) er av avkortet spissbueform, sett i lengdesnitt, med sidevegger som er buet utad, og at midlene (2, 4) for utløsing av svingninger er anordnet inne i resonansrøret (3) ved en ende av dette.

2. Gassresonansanordning ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den omfatter en avstemt énveis-ventil (10) for tilføring av en gass- eller damp/luft-blanding, hvilken ventil, i avhengighet av den pulserende forbrenning, svinger mellom åpen og lukket stilling, for innføring av blandingsporsjoner i den ene ende av resonansrøret (3), for påfølgende antenning.

3. Gassresonansanordning ifølge krav 1 eller 2, k a r a k t e r i s e r t v e d at en regenereator (4) er anbragt i resonansrøret (3) nær ved men ute av kontakt med den ene rørende.

4. Gassresonansanordning ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d at den annen ende av resonansrøret (3) innbefatter et leie av molekylsiktmateriale (16), at en gassvekslingsåpning (8) er anordnet på den side som er vendt mot varmekilden (2), og at det på den side av leiet som er vendt fra varmekilden (2) er anordnet et gassutløp (18) for opprettelse av en trykksvingnings-gasseparator.

5. Gassresonansanordning ifølge ett av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d at den er kombinert med en varmepumpe (19) som omfatter en varmekappe (21) ved den annen

ende av resonansrøret (3), en regenerator (20) i tilgrensning til den annen ende, og midler (8) på regeneratorens side mot varmekilden (2), for opprettelse av varmeveksling mellom gassen i resonansrøret (3) og en lav-varmekilde.

6. Gassresonansanordning ifølge krav 5, k a r a k t e r i s e r t v e d at varmekappen (21) ved den annen ende av resonansrøret (3) omfatter et grunt vannreservoar (22), og at finner (23) av en god varmeleder befinner seg i varmekontakt med vannreservoaret og strekker seg inn i rommet mellom vannreservoaret (22) og den bakre side av regeneratoren (20).

Fig. 1.

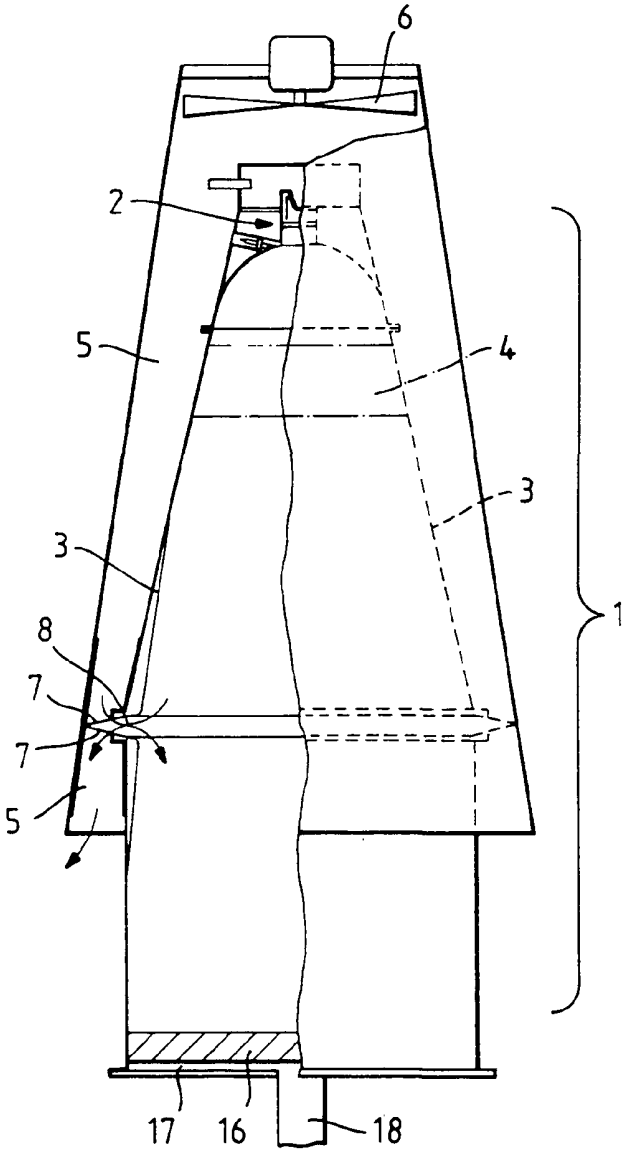


Fig.2.

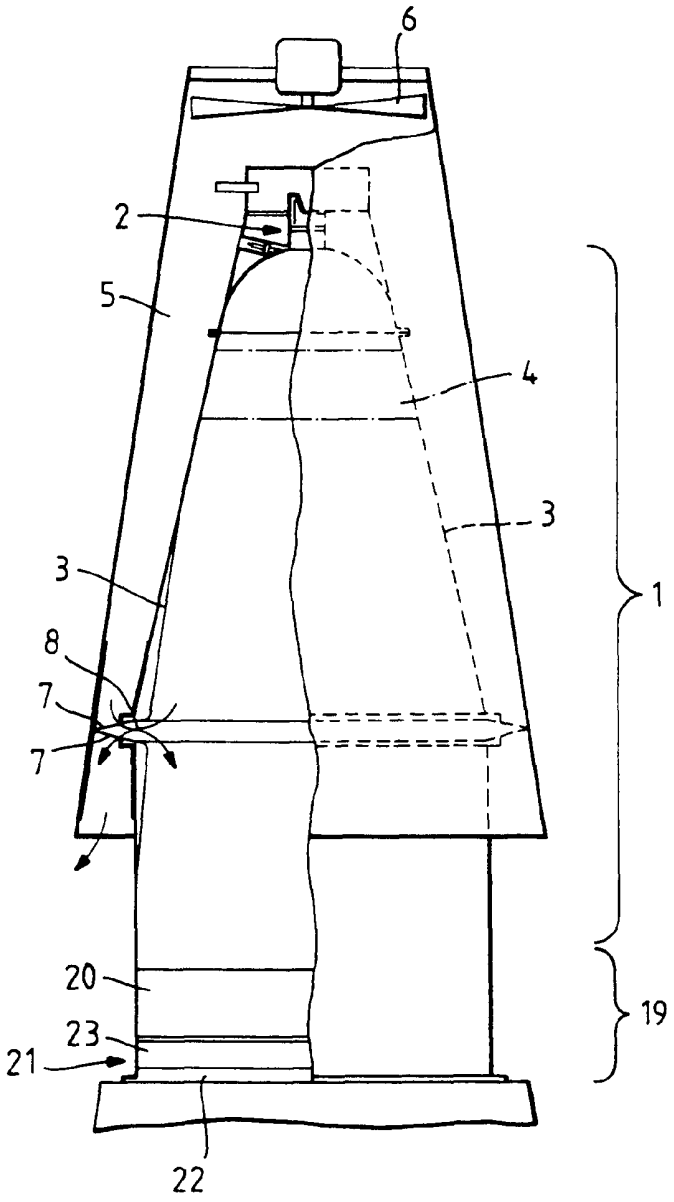


Fig.3.

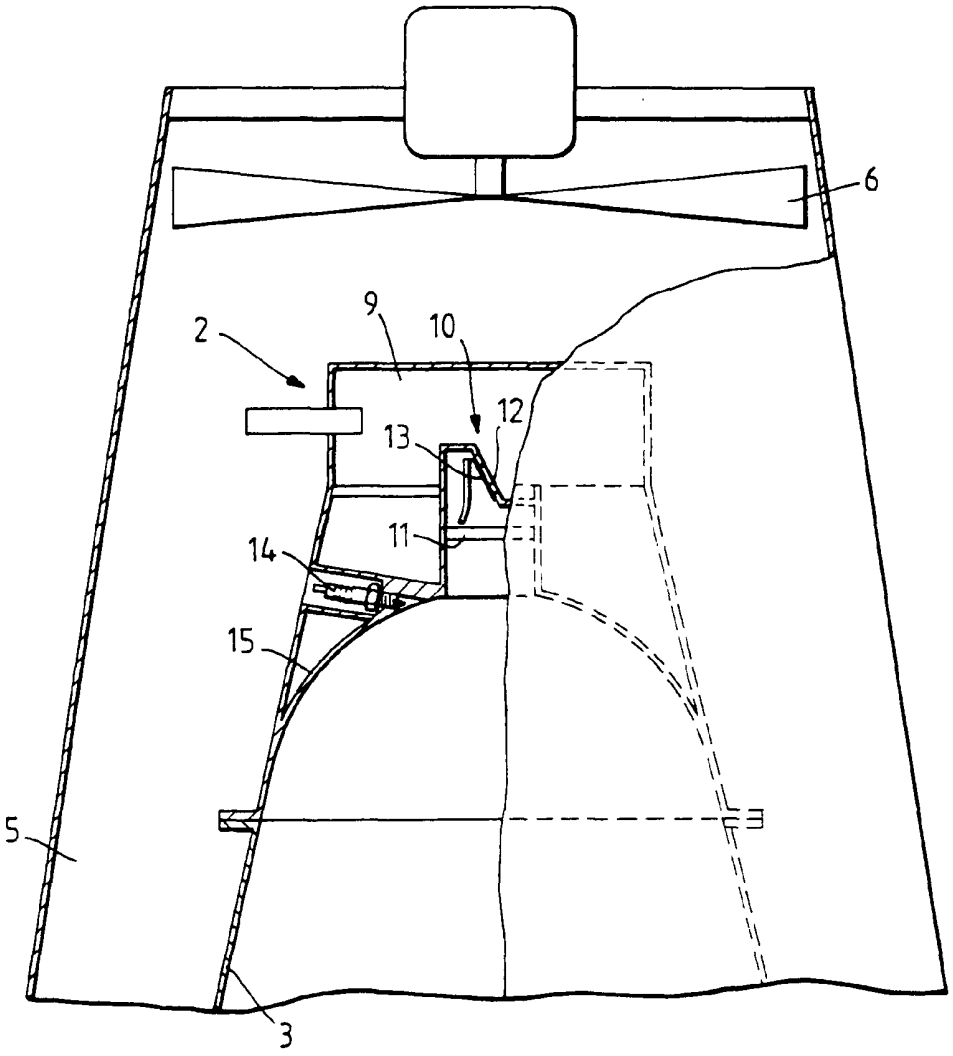


Fig.4a.

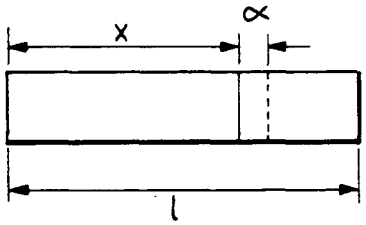


Fig.4b.

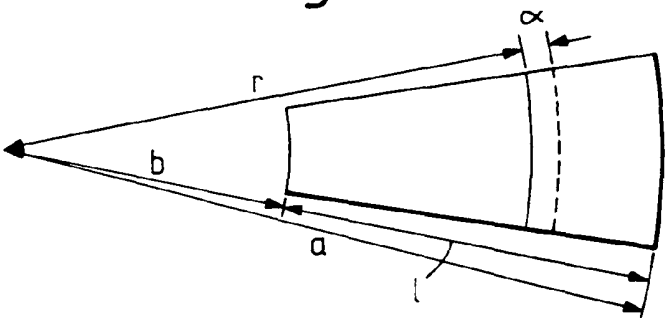


Fig.5.

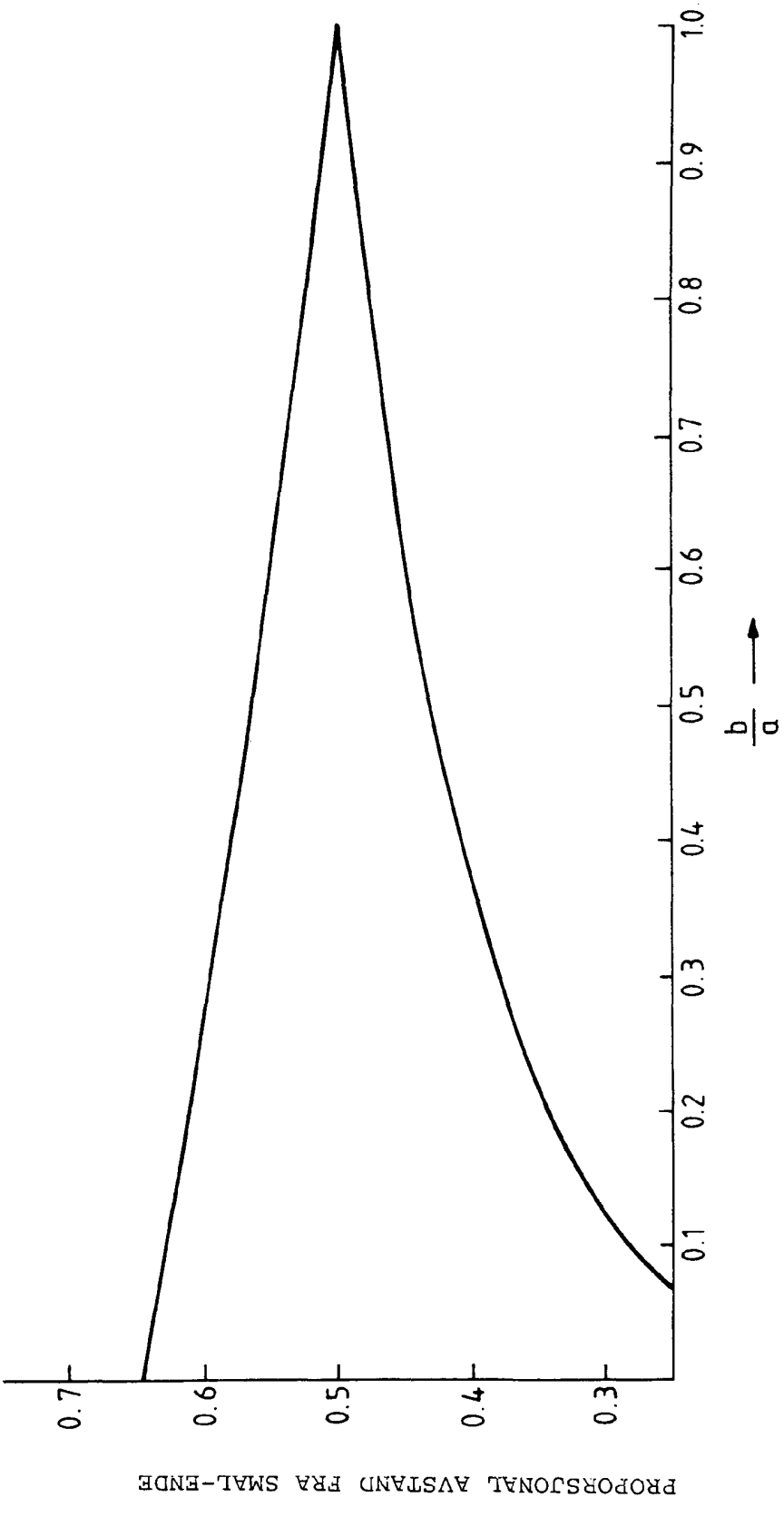

PROPORSJONAL AVSTAND FRA SMAL-ENDE
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
b/a

Fig. 6.

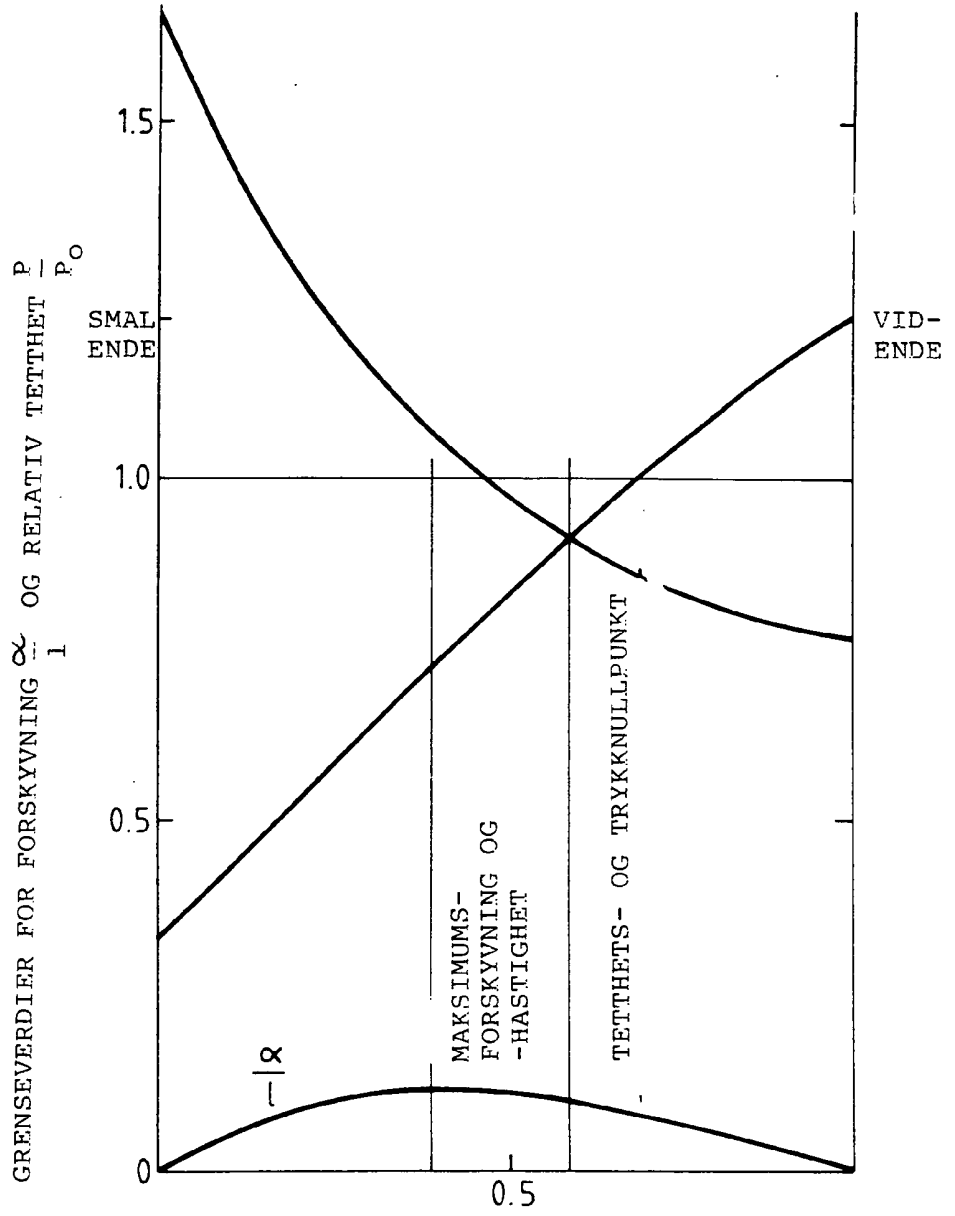

GRENSEVERDIER FOR FORSKYVNING $\frac{\alpha}{l}$ OG RELATIV TETTHET $\frac{P}{P_o}$
1.5
1.0
0.5
0
0.5
SMAL ENDE
VID-ENDE
$\frac{\alpha}{l}$
MAKSIMUMS-FORSKYVNING OG -HASTIGHET
TETTHETS- OG TRYKKNULLPUNKT

Fig. 7.

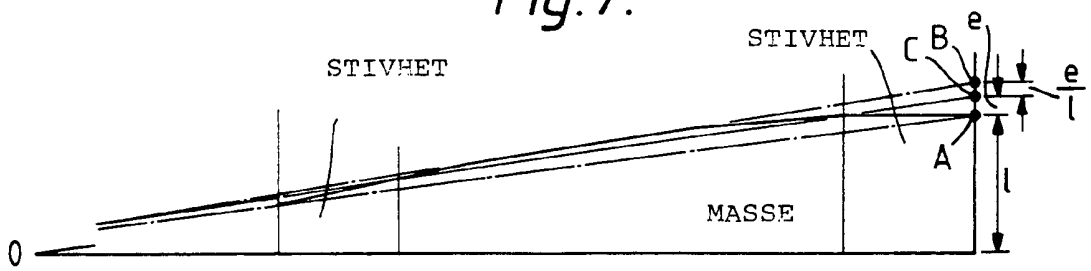
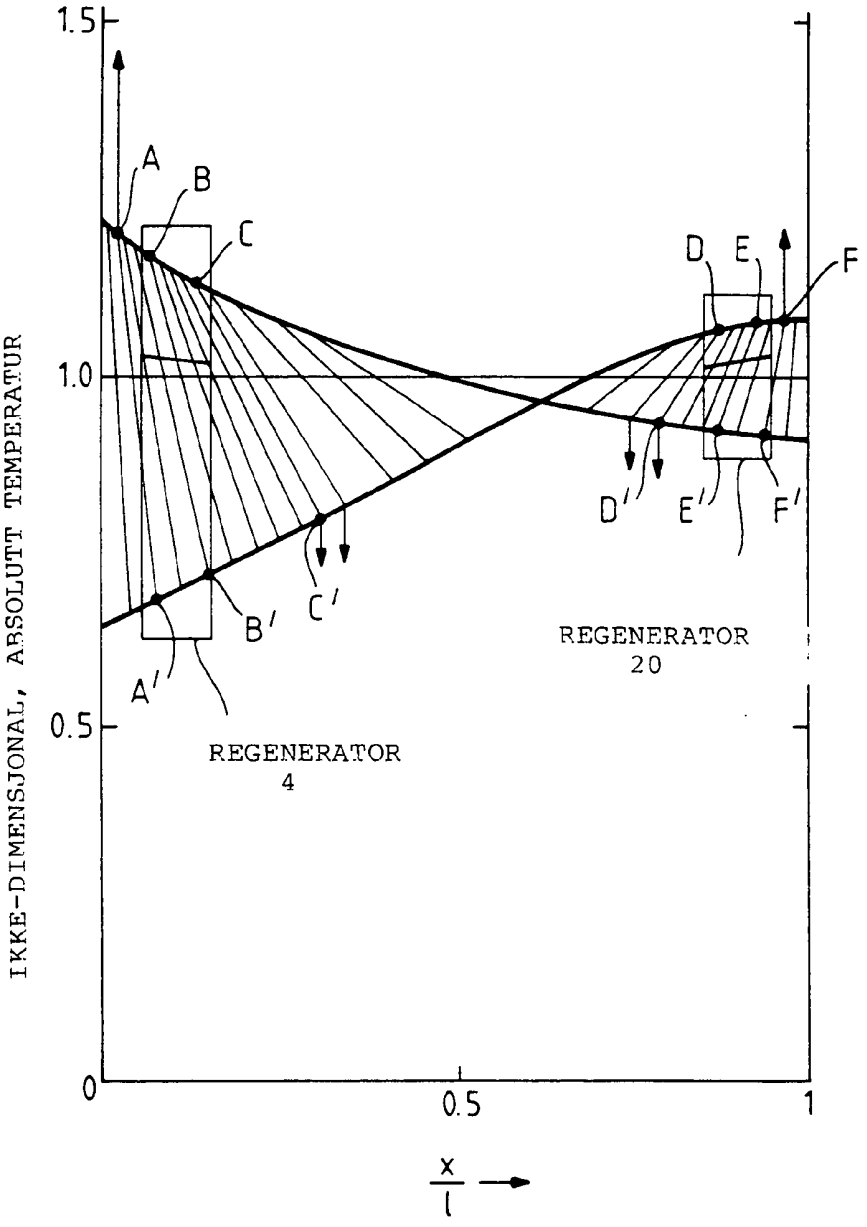

STIVHET
STIVHET
C
B
e
e
l
A
l
MASSE
0

Fig.8.


1.5
1.0
0.5
0
0.5
1
x/l
IKKE-DIMENSJONAL, ABSOLUTT TEMPERATUR
A
B
C
D
E
F
A'
B'
C'
D'
E'
F'
REGENERATOR 4
REGENERATOR 20