Stirling-koudgaskoelmachines met lineaire aandrijving*

F. Stolfi en A.K. de Jonge**

Stirling-koelmachines die worden aangedreven door lineaire elektromotoren, bieden het voordeel dat een ingewikkeld mechanisme voor het omzetten van een roterende in een heen en weer gaande beweging overbodig is. In zulke koudgaskoelmachines moeten de zuiger en de verdringer (met geïntegreerde regenerator) harmonische bewegingen met een faseverschil van $\pi/4$ tot $\pi/2$ uitvoeren. De zuiger wordt bij deze machines altijd voorzien van een lineaire motor; de verdringer kan òf worden aangedreven door een eigen lineaire motor òf vrij bewegen in en massa-veersysteem met een resonantiefrequentie die niet veel verschilt van de aandrijffrequentie. Beide mogelijkheden hebben geresulteerd in een praktisch ontwerp.

Het ontwerp met twee lineaire motoren heeft een koudeproduktie van 5 W bij een werktemperatuur van 65 K en is bedoeld voor toepassing in de ruimtevaart Deze koelmachine is ontwikkeld in het Philips-laboratorium in Briarcliff Manor, U S.A Een lange levensduur zonder onderhoud is bereikt door het toepassen van magnetische lagers voor de zuiger en de verdringer

De magnetische lagers werken zo nauwkeurig dat de nauwe ringvormige spleten rondom de zuiger en de verdringer tevens functioneren als labyrintafdichtingen Daardoor is er geen mechanische afdichting nodig, zodat mechanische slijtage in deze koelmachine geheel is geëlimineerd

Het andere ontwerp van een koelmachine, uitgerust met één lineaire elektromotor en een vrij bewegende verdringer, is afkomstig van Philips USFA B.V in Eindhoven. De fabricage omvat een serie van zes verschillende miniatuur-koudgaskoelmachines van 0,25 tot 1 W bij 80 K voor het koelen van onder andere infrarood-detectoren en elektronica De compressie- en expansieruimte zijn gescheiden, waardoor de geheel dichtgelaste machine makkelijk kan worden geïntegreerd in bestaande systemen De zuiger en de verdringer zijn gelagerd in ringen van versterkt PTFE, die tevens de afdichting van de spleten verzorgen. Door de goede mechanische eigenschappen van het lagermateriaal is een gegarandeerde levensduur van 2500 uur verkregen Beide typen koelmachines zijn voorzien van een trillingsdelger.

Inleiding

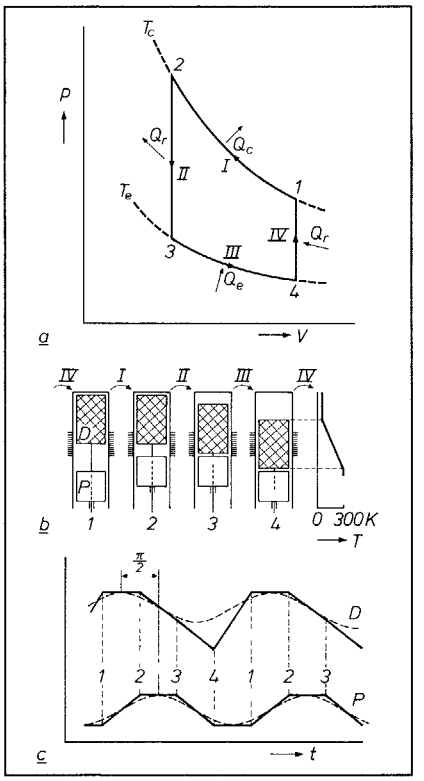
In 1864 bouwde de Schot Alexander Carnegie Kirk een op de Stirling-cyclus gebaseerde koudgaskoelmachine, die gedurende tien jaar dag en nacht heeft gewerkt, zie R Thévenot, A history of refrigeration throughout the world, Inst Int du Froid, Parijs 1979

Door Philips is de toepassing van de Stirling-cyclus voor de produktie van koude in de jaren vijftig onderzocht[1] Dit onderzoek resulteerde in de bekende Philips koudgaskoelmachines, die al vele jaren in serie worden geproduceerd. Met behulp van deze machines kan men in laboratoria en fabrieken bijvoorbeeld vloeibare stikstof produceren. Naast de vraag naar deze industriele machines bestaat er ook een behoefte aan veel kleinere machines voor het koelen van detectoren en elektronische schakelingen

Bij een koudgaskoelmachine bewegen een zuiger en een verdringer heen en weer in een ruimte die is gevuld met het werkgas helium. Om duidelijk te maken hoe de zuiger en verdringer ten opzichte van elkaar moeten bewegen, zullen we eerst de grondslagen van de Stirling-koudecyclus recapituleren Bij deze cyclus doorloopt een hoeveelheid helium in de machine een thermodynamisch kringproces Hierin kunnen we vier fasen onderscheiden (zie *figuur 1a*) comprimeren bij kamertemperatuur (*I*), afkoelen tot de werktemperatuur (*II*), expansie bij de werktemperatuur (*III*) en tenslotte weer opwarmen tot kamertemperatuur (*IV*)

De koude wordt geproduceerd gedurende de expansie van het werkgas in fase *III*

Het werkgas wordt gedwongen dit



Figuur 1 *a* Variaties van druk en volume bij de ideale Stirling-cyclus in een (*p,V*)-diagram Tijdens de isotherme compressie (fase *I*) bij temperatuur T_c wordt een hoeveelheid warmte Q_c aan het gas onttrokken, bij de isotherme expansie (fase *III*) bij temperatuur T_e neemt het gas de energie Q_e op Tijdens de isochore afkoeling (dat wil zeggen bij constant volume) in fase *II* wordt in de regenerator een hoeveelheid warmte Q_r opgeslagen, die tijdens de isochore verwarming in fase *IV* weer door het gas wordt opgenomen

b Posities van de zuiger *P* en de verdringer *D* In de verdringer is de regenerator opgenomen De posities *1-4* corresponderen met de in *a* aangegeven punten, de fasen *I-IV* zijn eveneens aangeduid Rechts is schematisch de temperatuurval langs de wand aangegeven Dit temperatuurverloop is gebonden aan de regenerator en verandert tijdens een cyclus van positie

c De positie van zuiger en verdringer als functie van de tijd *t* De verplaatsingen kunnen worden benaderd door harmonische bewegingen (streeplijnen) met een faseverschil van ongeveer $\pi/2$

---

* Dit artikel is eerder, in uitgebreidere vorm, gepubliceerd in Philips Techn T 42 (1984) nr 1, 1-10

** Ing A K de Jonge, medewerker van Philips USFA B V Eindhoven, destijds medewerker van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, en F Stolfi, medewerker van Philips Laboratories, Briarcliff Manor, N Y , U S A

kringproces te doorlopen door de bewegingen van de zuiger en de verdringer, *P* en *D* in *figuur 1b* De zuiger comprimeert het gas en laat het daarna weer expanderen De verdringer verplaatst het gas van de compressieruimte – de ruimte op kamertemperatuur tussen de zuiger en de verdringer – naar de expansieruimte, dit is de (koude) ruimte op de werktemperatuur boven de verdringer Daarbij wordt het gas door de regenerator gevoerd, die bij de hier te beschrijven koelmachines deel uitmaakt van de verdringer De regenerator, het "hart" van de machine, bestaat uit poreus materiaal (bijvoorbeeld kopersnippers of kopergaas) met grote warmtecapaciteit en groot warmteoverdragend oppervlak Bij het passeren van de regenerator wordt het gas afwisselend afgekoeld en weer opgewarmd door het afstaan en opnemen van de warmtehoeveelheid Q_r De bij vrijwel isotherme compressie *op* het gas verrichte arbeid wordt als warmte Q_c in een koeler afgestaan aan de omgeving De bij vrijwel isotherme expansie *door* het gas verrichte arbeid wordt als warmte Q_e aan de omgeving onttrokken Hierdoor daalt de bovenste begrenzing van de werkruimte – de "koude kop" of "koude vinger" – aanzienlijk in temperatuur Het temperatuurverloop over de lengterichting van de werkruimte is rechts in *figuur 1b* schematisch aangegeven

In *figuur 1c* zijn de geïdealiseerde bewegingspatronen van zuiger en verdringer weergegeven De geïdealiseerde bewegingen worden in koelmachines die hier worden besproken, benaderd door harmonische bewegingen Uit de figuur blijkt dat de beweging van de verdringer ongeveer een kwart periode moet voorijlen ten opzichte van de beweging van de zuiger, wat overeenkomt met een faseverschil van circa $\pi/2$

In de conventionele Stirling-koelmachines worden de zuiger en de verdringer mechanisch aangedreven Doorgaans worden deze machines voorzien van een kruk-drijfstangmechanisme, maar bij speciale toepassingen wordt ook wel het van de Stirling-motor bekende ruitdrijfwerk gebruikt, dat een bijzondere vorm van het kruk-drijfstangmechanisme is [2] Het voordeel van deze constructies is dat de bewegingen van de zuiger en verdringer nauwkeurig zijn bepaald, waardoor botsingen van deze bewegende delen zijn uitgesloten Het ruitdrijfwerk biedt bovendien het voordeel dat de massakrachten nagenoeg zijn gebalanceerd. De bezwaren zijn dat deze mechanismen nog gecompliceerder zijn dan het mechanisme van een verbrandingsmotor, dat het moeilijk is de werkruimte hermetisch af te dichten en dat er – vooral bij het conventionele kruk-drijfstangmechanisme – zijdelingse krachten worden uitgeoefend op de wanden van de werkruimte Hierdoor wordt slijtage veroorzaakt, tenzij de zuiger en de verdringer worden gesmeerd Smeermiddelen zijn echter ongewenst, omdat zij gassen afstaan die het werkgas verontreinigen

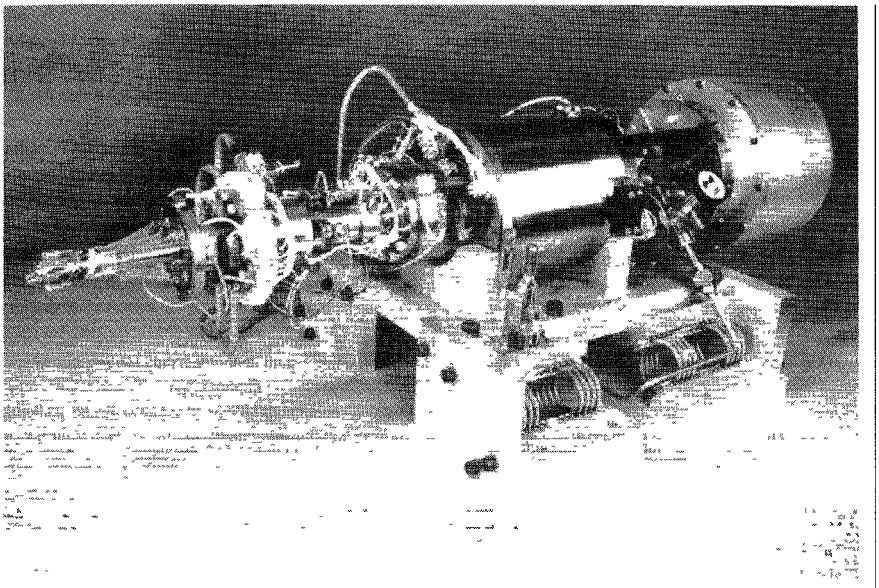
De genoemde problemen kunnen worden vermeden door zowel de zuiger als de verdringer rechtstreeks aan te drijven, dus zonder dat eerst een roterende beweging moet worden omgezet in een translerende Daarbij kan men gebruik maken van lineaire elektromotoren waarvan de werking ongeveer vergelijkbaar is met die van de conusaandrijving in luidsprekers Het is ook mogelijk de verdringer vrij te laten bewegen en alleen de zuiger aan te drijven De verdringer wordt dan door middel van een schroefveer met de wand verbonden Het werkgas oefent tijdens het passeren van de regenerator een kleine kracht uit op de verdringer Aangezien de resonantiefrequentie van het verdringermassaveersysteem niet veel verschilt van de aandrijffrequentie van de zuiger, wordt de bewegingsamplitude van de verdringer opgeslingerd De constructie van een machine met één lineaire motor is eenvoudiger dan die van een machine met twee motoren, maar het is moeilijk bij het ontwerpen de juiste parameters voor de gasdoorstroming en de veer te kiezen Het ontwikkelingswerk voor beide typen koudgaskoelmachines is uitgevoerd op twee plaatsen binnen het Philips-concern en heeft geleid tot een tweetal ontwerpen, die we beide in dit artikel zullen bespreken.

Door het Philips-laboratorium in Briarcliff Manor in de Verenigde Staten is een Stirling-koelmachine met twee lineaire motoren ontworpen, die een koelvermogen van 5 W heeft bij een temperatuur van de koude kop van 65 K Deze machine, die we verder Briarcliff-koelmachine zullen noemen, is in opdracht van de NASA (National Aeronautics and Space Administration) ontworpen voor het koelen van infrarooddetectoren in ruimtevaartuigen De koelmachine moet daarom – zonder enig onderhoud – vijf jaar onafgebroken kunnen werken Aan deze eis is (naar alle waarschijnlijkheid) voldaan door de bewegende delen van de machine in het geheel geen mechanisch contact te laten maken met de wanden van de werkruimte Dit is verwezenlijkt door de zuiger en de verdringer magnetisch te laten "zweven" in de werkruimte – voor zover ons bekend de eerste toepassing van magnetische lagers voor heen en weer gaande bewegingen in een machine De gebruikte lagersystemen zijn "actief", dat wil zeggen dat voor alle te beheersen vrijheidsgraden regelkringen zijn toegepast Daardoor is een vrij ingewikkelde configuratie met elektromagneten en gevoelige verplaatsingsopnemers ontstaan, die echter wel een grote stijfheid van de lagering heeft opgeleverd De uiterst nauwe spleten rondom de verdringer en de zuiger vormen daarbij tevens een labyrintafdichting, zodat er geen (slijtende) onderdelen voor het afdichten nodig zijn en smering geheel overbodig is

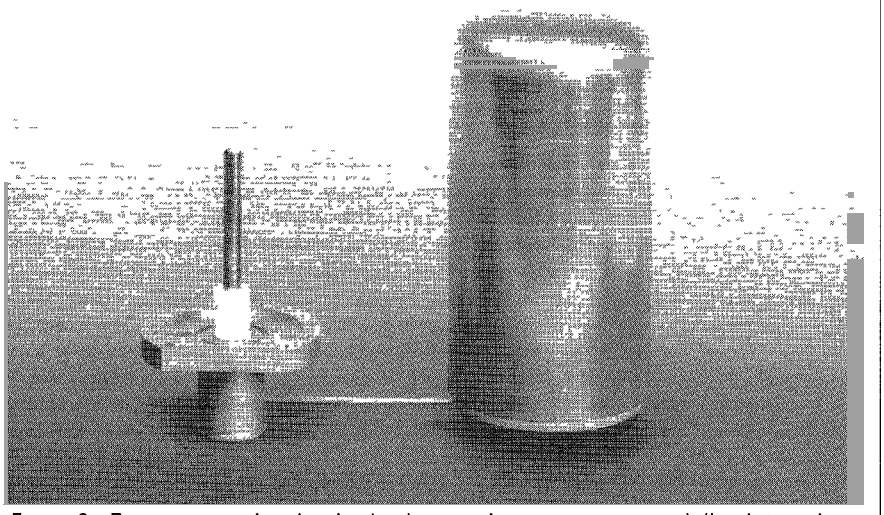
In tegenstelling tot de situatie bij mechanische aandrijving van de zuiger en de verdringer behoeft er alleen elektrisch vermogen aan de machine te worden toegevoerd, waardoor deze hermetisch kan worden afgedicht De amplitudes van de beweging van de zuiger en de verdringer, het onderlinge faseverschil en de aandrijffrequentie worden gestuurd door een elektronisch regelsysteem De belangrijkste parameters van de koelmachine zijn daardoor binnen een wijd gebied te varieren Dit maakt de machine ook zeer geschikt om de bewegingsparameters voor de Stirling-koudecyclus experimenteel te optimaliseren Bovendien kan eenvoudig worden overgegaan op een ander koelvermogen of een andere werktemperatuur

De toepassing van magnetische lagers en lineaire motoren betekent dat de levensduur en de betrouwbaarheid van de koelmachine alleen afhangen van de goede werking van de elektronische schakelingen Het prototype van de machine, zie *figuur 2*, die is voorzien van een trillingsdelger, heeft reeds meer dan een jaar onafgebroken gewerkt, zonder dat enige achteruitgang van het koelvermogen of verhoging van de werktemperatuur kon worden geconstateerd Het Amerikaanse Philips-laboratorium heeft door dit project en bijbehorende opdrachten aanzienlijke ervaring opgedaan in de toepassing van magnetische lagers voor heen en weer gaande bewegingen[3] Hierdoor is bredere toepassing van deze lagers – eventueel in projecten van derden – mogelijk geworden[4]

Het tweede onderwerp van dit artikel is een koelmachine met één lineaire motor Deze machine, zie *figuur 3*, is voor een heel ander toepassingsgebied ontwikkeld door Philips USFA B.V te Eindhoven. De machine wordt geproduceerd in een reeks van zes verschillende typen met koelvermogens van 0,25 tot 1 W bij een tempera-



Figuur 2 Prototype van de koudgaskoelmachine die in het Philips-laboratorium in Briarcliff Manor, U S A , is ontwikkeld De machine heeft een koudeproduktie van 5 W bij een werktemperatuur van 65 K De machine is ontworpen voor het koelen van infrarood-detectoren in ruimtevaartuigen De "koude kop" van de machine bevindt zich aan de linkerzijde, de trillingsdelger is uiterst rechts afgebeeld De totale lengte van de machine is ongeveer 100 cm



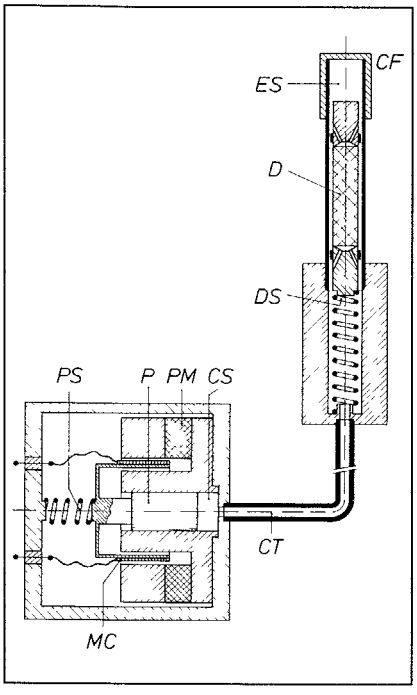
Figuur 3 Een miniatuur-koudgaskoelmahine uit de serie van zes verschillende type die in produktie is bij Philips USFA B V te Eindhoven De machines zijn leverbaar met een koudeproduktie tussen 0,25 en 1 W bij een werktemperatuur van 80 K De diameter van de "koude vinger" van de afgebeelde machine is ongeveer 7 mm, die van de kleinste en grootste machine uit de reeks zijn respectievelijk circa 5 en 10 mm Het expansiedeel (links) en het compressiedeel zijn gescheiden, waardoor de integratie in bestaande installaties eenvoudig is De hoogte van het compressiedeel is slechts 13 cm De koelmachines zijn bedoeld voor het koelen van bijvoorbeeld detectoren, lasers en elektronische onderdelen, ze zijn hermetisch dichtgelast en hebben een levensduur van ten minste 2500 uur In het compressiedeel is een trillingsdelger opgenomen

tuur van de koude vinger van 80 K De diameter van de kleinste koude vinger is iets minder dan 5 mm, die van de grootste is ongeveer 10 mm De USFA-machines zijn bedoeld voor het koelen van bijvoorbeeld detectoren, lasers en elektronische componenten in andere dan ruimtevaarttoepassingen Het bijzondere is dat de compressie- en expansieruimte zijn gescheiden Beide ruimten zijn slechts met elkaar verbonden door een dunne pijp, waarvoor een lengte van 300 mm en een diameter van 2,4 mm is gekozen. Daardoor is het eenvoudig de koelmachine in bestaande systemen te integreren. De machine is hermetisch dichtgelast, zodat er geen lekkage van werkgas mogelijk is De zuiger wordt aangedreven door een lineaire elektromotor, de vrij bewegende verdringer is, zoals gezegd, door middel van een schroefveer met de wand van de werkruimte verbonden Doordat de resonantiefrequentie van de verdringer circa 1,25 x de voedingsfrequentie van de motor bedraagt, is er een faseverschil tussen de beweging van de zuiger en de verdringer Bij een fasehoek van $\pi/2$, die in mechanisch aangedreven machines de grootste koudeproduktie oplevert, zou de verdringeramplitude nagenoeg nul zijn Als compromis is er daarom een faseverschil van circa $\pi/4$ gekozen De geleiding en tevens afdichting van de zuiger en verdringer wordt verzorgd door ringen van versterkt PTFE (polytetrafluoretheen), dat goede glij-eigenschappen paart aan een geringe slijtage en bovendien niet behoeft te worden gesmeerd De levensduur van de machine is daardoor gemiddeld circa 5000 uur en gegarandeerd 2500 uur Door het eenvoudige ontwerp is een verhoudingsgewijs lage kostprijs verkregen

In het volgende zullen we de beide koelmachines wat uitvoeriger bespreken

De USFA-koelmachine

Figuur 4 toont een doorsnede van de USFA-koelmachine Duidelijk is de splitsing te zien in een compressie- en een expansiegedeelte De zuiger is verbonden met een spoel, de stroom wordt als bij een luidspreker toegevoerd via soepele koperdraden De spoel bevindt zich in een nauwe "luchtspleet", waarin een magnetisch veld wordt opgewekt door een ringvormige permanente magneet De zuiger met motorspoel vormt samen met het werkgas en de schroefveer *PS* een massa-veersysteem (De schroefveer moet tevens voorkomen dat de zuiger door de zwaartekracht een excentrische positie inneemt) Uit berekeningen volgt dat het grootste rendement van de lineaire motor wordt verkregen als dit massa-veersysteem bij de werkfrequentie in resonantie is, dus als er een faseverschil van $\pi/2$ is tussen de wisselspanning aan de ingang van de motorspoel en de harmonische beweging van de zuiger, en dat het koelvermogen evenredig is met de werkfrequentie Daar het kwadraat van de resonantiefrequentie van de zuiger bij bepaalde veerstijfheid omgekeerd evenredig is met de zuigermassa, kan de werkfrequentie niet onbeperkt hoog worden opgevoerd (De veerstijfheid is onder andere afhankelijk van het slagvolume, de



Figuur 4 Langsdoorsnede van de USFA-koelmachine met links het compressiedeel en rechtsboven het expansiedeel (De trillingsdelger is niet getekend) *P* zuiger *D* verdringer met regenerator *PS* schroefveer voor de zuiger *PM* ringvormige permanente magneet *MC* motorspoel *CS* compressieruimte *CT* verbindingspijp *DS* schroefveer voor de verdringer *ES* expansieruimte *CF* koude vinger

compressibiliteit van het werkgas en de lekkage langs de zuiger) Een goed compromis is een voedingsfrequentie van 50 of 60 Hz[5]

Doordat de machine hermetisch is gesloten, stelt de druk van het werkgas achter de zuiger (dus rondom de spoel) zich in op een waarde die gelijk is aan de gemiddelde druk in de machine. In het expansiegedeelte doorloopt het heliumgas per periode twee keer de regenerator in de verdringer De geringe drukval van het werkgas tijdens het doorstromen van de regenerator is voldoende om de verdringer in beweging te houden De regenerator heeft voor de kleinste uitvoeringen van de machine een diameter van slechts 4 mm Over het bovenste gedeelte van het expansiegedeelte, de koude vinger, moet over een afstand van enkele centimeters een temperatuurverschil van circa 200 K worden overbrugd. Ten einde de "koudelek" zoveel mogelijk te beperken, is de cilinderwand van het expansiedeel vervaardigd van roestvast staal – dat een lage warmtegeleidingscoefficient heeft – met een dikte van slechts 0,1 mm. Het zal duidelijk zijn dat de fabricage van deze cilinderwand een moeilijke opgave is In *figuur 5a-c* zijn de resultaten van een aantal berekeningen en metingen aan de koelmachine weergegeven De rekenresultaten zijn verkregen met behulp van een computerprogramma dat door Philips is ontwikkeld voor berekeningen van de Stirling-cyclus. *Figuur 5a* toont de verdringeramplitude, *figuur 5b* de fasehoek tussen de zuiger- en verdringerbeweging en *figuur 5c* het nettokoelvermogen $P_{e,0}$, steeds als functie van de verhouding van de resonantiefrequentie van de verdringer, en de werkfrequentie Uit de resultaten blijkt duidelijk dat $\pi/4$ een goed compromis is voor de fasehoek Het gemeten netto-koelvermogen is kleiner dan het berekende, aangezien de berekende verliezen ongeveer 90% van het theoretische koelvermogen P_e vormen Een kleine afwijking in de berekening van verliezen heeft daarom grote invloed op het berekende netto-koelvermogen

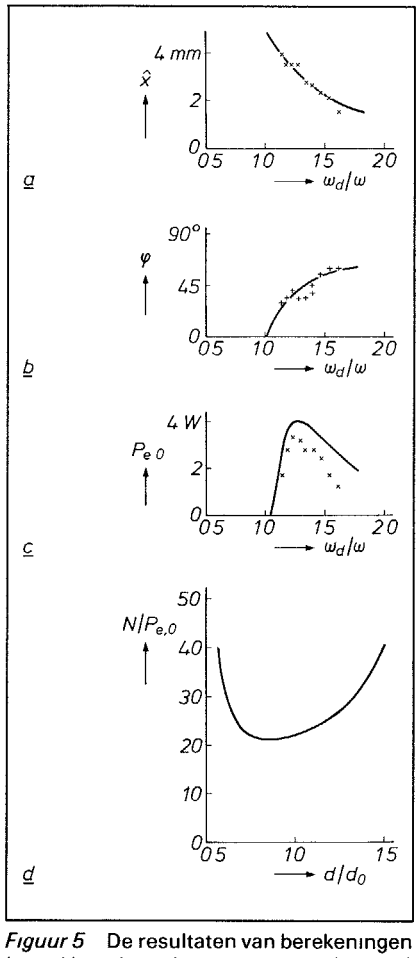
Een probleem vormt de keuze van de afmetingen van de verbindingspijp tussen de compressie- en de expansieruimte Een te grote lengte van de pijp vergroot het warmteoverdragend oppervlak tussen beide ruimten en vergroot bovendien de "schadelijke ruimte" voor het comprimeren Zoals gezegd, is er gekozen voor een lengte van 300 mm Daarnaast is om de genoemde redenen een kleine diameter van de pijp wenselijk, maar een te kleine diameter vergroot de stromingsweerstand *Figuur 5d* toont het resultaat van berekeningen van de optimale diameter De verhouding van het ingaande elektrisch vermogen en het netto-koelvermogen is uitgezet als functie van de dimensieloos gemaakte pijpdiameter Het is duidelijk dat er een optimum is

Een der typen van de hier beschreven koelmachine wordt ook gefabriceerd met een geintegreerde infrarood-detector, zie *figuur 6*. De koude vinger is daarbij in een Dewar-vat met detector gemonteerd (Dewar-vat en detector zijn van het fabrikaat Mullard en dragen tezamen het typenummer R170) Het vat heeft een gepolijst germanium venster dat transparant is voor infrarode straling met een golflengte tussen 8 en 12 μm De enige belasting van de koelmachine wordt gevormd door de straling die de detector bereikt, door de warmtetoevoer via de elektrische aansluitdraden van de detector en door de straling- en geleidingsverliezen in het Dewar-vat zelf Tot voor kort werden voor het koelen van dit soort infrarood-detectoren Joule-Thomson-koelsystemen gebruikt, werkend met behulp van vloeibare stikstof De voorraad stikstof in deze systemen is in enkele uren verbruikt Een infrarood-detector met USFA-koelmachine kan echter 2500 uur of langer zonder onderbreking werken

De Briarcliff-koelmachine

Het genoemde speciale Stirling-computerprogramma is ook gebruikt voor het berekenen van diverse parameters van de Briarcliff-koudgaskoelmachine[6]

Figuur 7a toont een langsdoorsnede van deze machine, waarin van links naar rechts het expansiegedeelte, het compressiegedeelte en de trillingsdelger zijn te onderscheiden De verdringer en de zuiger worden ieder, onafhankelijk van elkaar, aangedreven door een lineaire motor. In tegenstelling tot de motor van de USFA-machine bewegen hier de permanente magneten en staan de spoelen stil Het voordeel daarvan is dat de kans op breuk van de stroomtoevoerdraden geringer is Het nadeel van de grotere



Figuur 5 De resultaten van berekeningen (getrokken lijnen) en metingen (punten) aan de USFA-koelmachine

a De verdringeramplitude $\hat{x}$ als functie van de verhouding ω_d/ω van de hoekfrequentie van de verdringer bij resonantie, en de werk-hoekfrequentie

b De fasehoek φ als functie van ω_d/ω

c De netto-koudeproduktie $P_{e,0}$ als functie van ω_d/ω Een fasehoek van 45° is blijkbaar een goed compromis

d De verhouding $N/P_{e,0}$ van het ingaande vermogen en de netto-koudeproduktie als functie van de verhouding d/d_0 van de inwendige diameter van *CT* (zie *figuur 4*) en een constante (in mm)

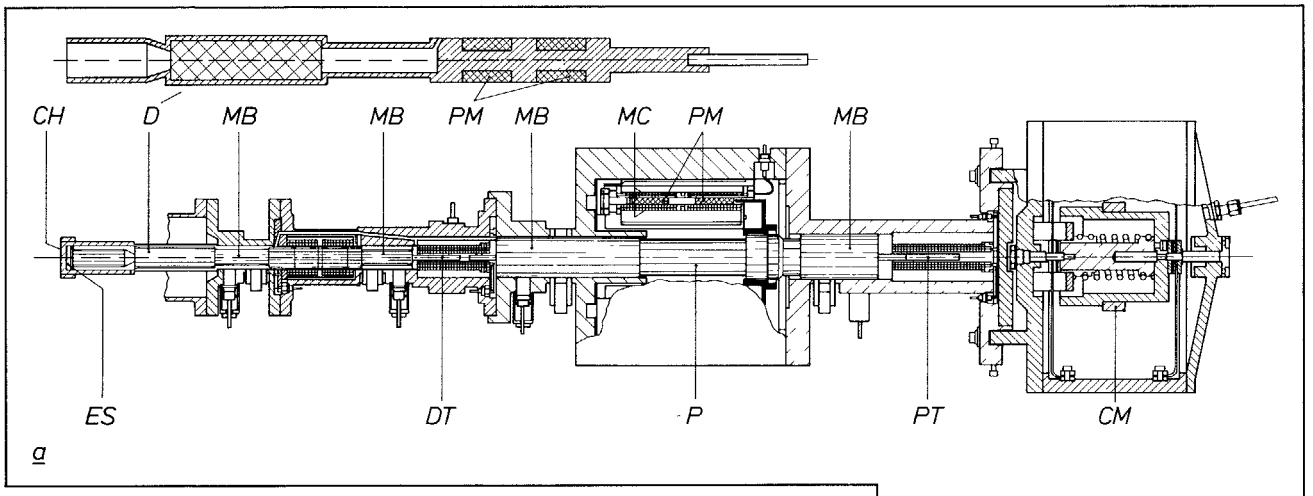
massa van de bewegende delen speelt een minder grote rol, omdat de zuiger en verdringer afzonderlijk worden aangedreven en omdat de werkfrequentie lager is 25 Hz De grotere zijdelingse krachten die het gevolg zijn van de aantrekking van de ijzeren stator door de permanente magneten, worden zonder problemen opgenomen door de magnetische lagers

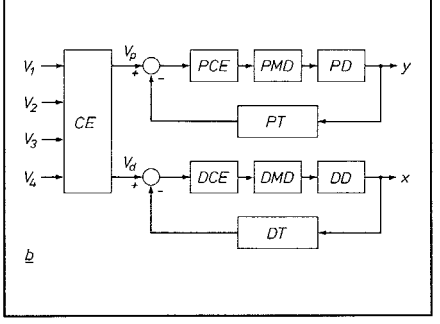
Het regelsysteem voor de gehele aandrijving is schematisch weergegeven in figuur *7b* De ingaande gelijkspanningen zijn een maat voor de gewenste waarden van de amplituden $\hat{x}$ en $\hat{y}$ van verdringer en zuiger, de hoekfrequentie ω en de fasehoek φ Hieruit worden door de elektronische schakeling wisselspanningen afgeleid die evenredig zijn met $\hat{x}\cos\omega t$ en $\hat{y}\cos(\omega t-\varphi)$.

Deze wisselspanningen vormen de ingaande grootheden voor de beide regelkringen die de bewegingen van de verdringer en de zuiger sturen In deze regelkringen worden de signalen teruggekoppeld die afkomstig zijn van opnemers voor het meten van de verplaatsingen van de verdringer en de zuiger De regelelektronica past de stroom door de spoelen van de lineaire motoren zodanig aan dat de zuiger en de verdringer nauwkeurig de ingaande wisselspanningen volgen

Zoals we hiervoor al vermeldden, maken de verdringer en de zuiger geen contact met de aangrenzende wanden van de werkruimte Dit is bereikt door het toepassen van magnetische lagers voor de rechtgeleiding van de bewegende delen[7], zie *figuur 8a*. Zowel de zuiger als de verdringer wordt gesteund door twee magnetische lagers Ieder magnetisch lager bestaat uit een viertal elektromagneten en een zelfde aantal verplaatsingsopnemers. Er zijn per lager twee verplaatsingsopnemers voor de verticale richting en twee voor de horizontale richting De twee opnemers voor iedere verplaatsingsrichting zijn ter vermijding van thermische drift opgenomen in een brugschakeling, zie *figuur 8b* Ieder meetsysteem is zo gevoelig dat verplaatsingen van 0,25 µm nog kunnen worden waargenomen De meetsignalen die behoren bij de verplaatsingen, worden teruggekoppeld in regelkringen die de stromen door de spoelen van de elektromagneten zo sturen dat de zuiger en de verdringer nauwkeurig gecentreerd blijven ten opzichte van de cilindervormige wan-

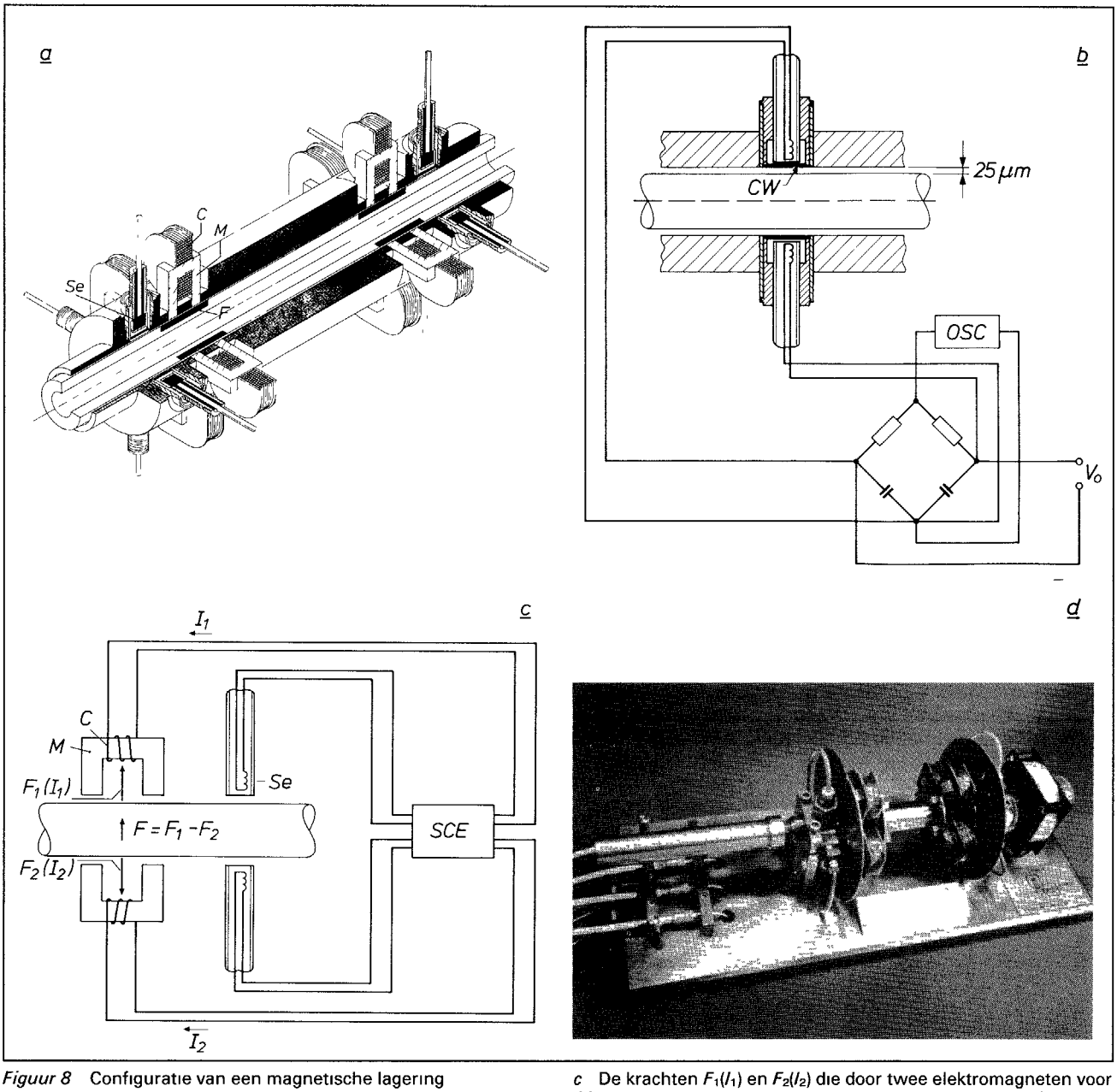
Figuur 6 De USFA-koelmachine geïntegreerd met een infrarood-detector in een Dewar-vat (rechts) Dewar-vat en detector worden aangeduid met het typenummer R170 (fabrikaat Mullard)





Figuur 7 *a* Langsdoorsnede van het prototype van de Briarcliff-koudgaskoelmachine *CH* "koude kop" *DT* verplaatsingsopnemer van de verdringer *PT* verplaatsingsopnemer van de zuiger *MB* magnetisch lager *CM* balanceergewicht van de trillingsdelger Zie verder het onderschrift van *figuur 4*

b Regelsysteem voor de aandrijving V_{1-4} gelijkspanningen die evenredig zijn met respectievelijk de amplitude $\hat{x}$ van de verdringerbeweging, de amplitude $\hat{y}$ van de zuigerbeweging, de hoeksnelheid ω en de fasehoek φ tussen de harmonische bewegingen van de zuiger en de verdringer *CE* elektronica voor het regelen van de werkfrequentie *f* en de fase V_p wisselspanning evenredig met $\hat{y}\cos(\omega t-\varphi)$ V_d wisselspanning evenredig met $\hat{x}\cos\omega t$ De grootheden *x* en *y* stellen de werkelijke verplaatsingen van respectievelijk de verdringer en de zuiger voor *PCE, DCE* regelaars voor de beweging van respectievelijk de zuiger en de verdringer *PMD, DMD* stroomgeneratoren voor respectievelijk de zuiger- en de verdringermotor *PD, DD* massa van respectievelijk de zuiger en de verdringer



Figuur 8 Configuratie van een magnetische lagering

a Geleiding van de verdringer met twee magnetische lagers, ieder met vier elektromagneten *M* met spoelen *C*, en met vier radiale verplaatsingsopnemers *Se* *F* materiaal met grote magnetische permeabiliteit

b Twee opnemers in detail *CW* keramisch "venster" De opnemers die behoren bij één bewegingsrichting van de verdringer, zijn ter vermijding van thermische drift opgenomen in een brugschakeling *OSC* wisselspanningsbron V_0 uitgangsspanning Door de grote gevoeligheid van het meetsysteem voor de verplaatsingen kan men volstaan met een spleethoogte van slechts 25 μm

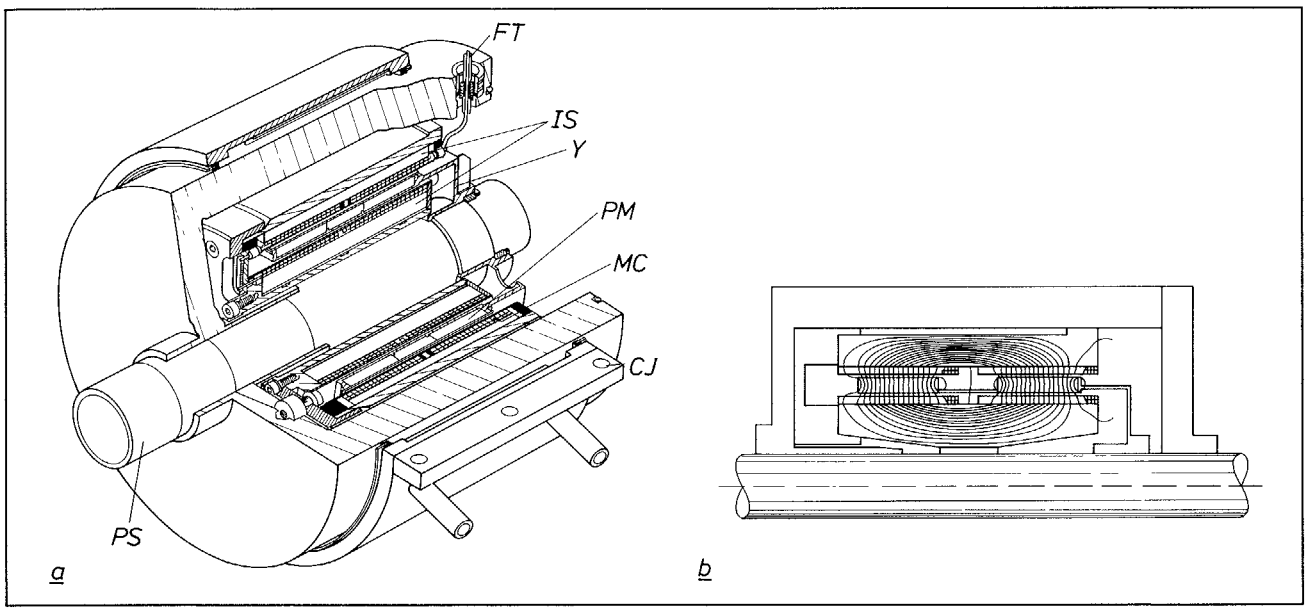
c De krachten $F_1(I_1)$ en $F_2(I_2)$ die door twee elektromagneten voor één bewegingsrichting op de verdringer worden uitgeoefend $F = F_1 - F_2$ is de resulterende kracht, die in evenwicht is met de uitwendige krachten die op de verdringer werken *SCE* elektronica voor de verplaatsingsopnemers en voor de stroomregeling Als het evenwicht wordt verstoord, wordt door de opnemers *Se* een verplaatsing van de verdringer waargenomen Vervolgens worden door *SCE* de stromen I_1 en I_2 door de spoelen van de elektromagneten zo aangepast dat er een nieuw evenwicht wordt gevonden bij ongeveer dezelfde spleethoogte van 25 μm

d De eerste experimentele opstelling voor de lagering van de verdringer

den van de werkruimte, zie *figuur 8c*. Door de grote gevoeligheid van de opnemers en de grote reactiesnelheid van de regelkringen konden de spleten rondom de verdringer en rondom de zuiger worden gereduceerd tot 25 μm Het spreekt vanzelf dat er daardoor hoge eisen worden gesteld aan de fabricagenauwkeurigheid van de diverse cilindervormige vlakken die deze spleten begrenzen *Figuur 8d* toont een eerste proefopstelling van de magnetische lagering van de verdringer.

De kleine spleten rondom de verdringer en de zuiger vormen ieder tevens een labyrintafdichting Dat wil zeggen dat de cilindervormige spleten voldoende nauw en lang zijn om de lekkage van het werkgas binnen aanvaardbare grenzen te houden. De lekkage van nauwe spleten is evenredig met de derde macht van de spleethoogte en omgekeerd evenredig met de lengte van de spleet. Een vergroting van de spleethoogte met 10% doet de lekkage dus met 33% toenemen.

Doordat er in de koelmachine in het geheel geen slijtage optreedt, wordt de levensduur niet begrensd door "verstopping" door slijtageprodukten. Er zou echter wel verstopping kunnen optreden doordat gassen die het



Figuur 9 De lineaire motor van de zuiger van de Briarcliff-koelmachine
a Scheve projectie van de gedeeltelijk doorgesneden motor *PS* as van de zuiger *CJ* koelmantel *PM* ringvormige permanente magneten *MC* tweedelige motorspoel *Y* titanium juk *IS* tweedelige ijzeren stator *FT* doorvoer voor de stroomvoorziening
b Radiale doorsnede, waarin de magnetische veldlijnen zijn aangegeven voor een niet-bekrachtigde spoel De veldlijnen zijn berekend met behulp van een computerprogramma dat is gebaseerd op de eindige-elementenmethode

werkgas helium verontreinigen, condenseren en stollen op de koude plaatsen in de machine De machine wordt daarom gevuld met zeer zuiver helium Alle onderdelen die contact maken met het werkgas, zijn bovendien vervaardigd uit metaal of keramiek De spoelen van de motor zijn bijvoorbeeld voorzien van een omhulling van titaanplaat, gassen uit de isolerende materialen van de spoel kunnen de werkruimte dus niet bereiken Keramiek wordt toegepast op die plaatsen waar thermische of elektrische isolatie nodig is, zoals bij de verplaatsingsopnemers in *figuur 8b* De onderdelen worden vóór de montage zorgvuldig gereinigd en ontvet en daarna in vacuum tot een temperatuur van 100 °C of meer verhit, ten einde geadsorbeerd gas te verwijderen

Figuur 9a toont een scheve projectie en *figuur 9b* een radiale doorsnede van de lineaire motor die de zuiger aandrijft De spoel is gesplitst in twee concentrische delen, die ieder grenzen aan een ijzeren statorjuk Door de gekozen magnetische configuratie wordt bereikt dat de zijdelingse krachten tussen de bewegende permanente magneten en de ijzeren stators zo klein mogelijk zijn De ringvormige permanente magneten zijn door middel van een (niet-magnetisch) titanium juk met de zuiger verbonden In figuur *9b* zijn ook de magnetische veldlijnen aangegeven die met behulp van een door Philips ontwikkeld computerprogramma, gebaseerd op de eindige-elementenmethode, zijn getekend voor een niet-bekrachtigde spoel. Met dit computerprogramma is eveneens de kracht op de permanente magneten geschat, deze kracht kan ook door middel van een energiebeschouwing worden berekend[8]

De verdringermotor is ongeveer op dezelfde manier uitgevoerd als de zuigermotor De ringvormige permanente magneten van deze motor hebben een uitwendige diameter die gelijk is aan die van de verdringer, zie *figuur 7a*. Ter plaatse van deze magneten is in de verdringer centrisch een (meebewegende) ijzeren kern aangebracht.

De trillingsdelger is eveneens in *figuur 7a* te onderkennen In het hier afgebeelde prototype van de koelmachine is de trillingsdelger passief en bestaat uit een balanceergewicht dat met de behuizing is verbonden door middel van een schroefveer, het gewicht is tevens opgehangen in bladveren. Het massa-veersysteem heeft een resonantiefrequentie die gelijk is aan de werkfrequentie Alleen trillingen van deze frequentie worden door de trillingsdelger onderdrukt, hogere harmonischen worden door dit passieve systeem echter wel doorgegeven Door de toevoeging van de trillingsdelger is in het prototype de amplitude van de eerste harmonische van de machinetrillingen in axiale richting onderdrukt met een factor $1/19$

Bij de bevestigingspunten van de bladveren van de trillingsdelger in het prototype kan slijtage optreden. In de definitieve versie van de machine – bedoeld voor daadwerkelijke lancering – is daarom de schroefveer vervangen door een hoeveelheid gas onder druk, waarbij het balanceergewicht is ondersteund door magnetische lagers De resonantiefrequentie wordt bij deze trillingsdelger met behulp van een regelkring en een derde lineaire motor afgestemd op de werkfrequentie van de machine Van de definitieve versie van de trillingsdelger wordt verwacht dat de eerste harmonische van de machinetrillingen nog beter wordt onderdrukt Bovendien zal deze trillingsdelger ook hogere harmonischen tegenhouden

Zoals gezegd, heeft het prototype van de machine meer dan één jaar zonder enige achteruitgang in koude-produktie gefunctioneerd Hierbij werd ruimschoots aan de eis voldaan om 5 W koude te produceren bij een temperatuur van 65 K Voorafgaand zijn uitgebreide proeven gedaan om de variatie van het koelvermogen te leren kennen als functie van de diverse parameters als zuiger- en verdringeramplitude, frequentie en faseverschil[9]. De koelmachines volgens het definitieve ontwerp zullen gedurende meer dan vijf jaar zonder toezicht in de ruimte moeten werken De ontwerpinspanningen zullen daarom ook worden gericht op het zodanig verbeteren van de elektronische circuits dat deze gedurende een zelfde tijd hun taak zonder onderbreking verrichten

Literatuur

[1] J W L Kohler en C O Jonkers, Grondslagen van de koudgaskoelmachine, Philips Techn T **16**, 33-43, 1954
[2] R J Meijer, De Philips heetgasmotor met ruitdrijfwerk, Philips Techn T **20**,

325-342, 1958
A Daniels en F K du Pré, Miniatuur-koelmachines voor elektronische schakelingen, Philips Techn T **32**, 20-28, 1971
[3] R L Maresca, An integrated magnetic actuator and sensor for use in linear or rotary magnetic bearings IEEE Trans **MAG-19**, 2094-2096, 1983
[4] Zowel het integrale ontwerp van de koelmachine als het ontwerp van de afzonderlijke magnetische lagers is in 1983 onderscheiden met een "IR 100 Award" van het tijdschrift Industrial Research and Development, zie het desbetreffende nummer van oktober 1983
[5] A K de Jonge, A small free-piston Stirling refrigerator, Proc 14th Intersoc Energy Conversion Eng Conf, Boston 1979, blz 1136-1141
A K de Jonge, Small split Stirling coolers for I R detectors, Proc Int Conf on Adv infrared detectors & syst London 1981, blz 55-59
[6] F Stolfi, M Goldowsky, J Ricciardelli en P Shapiro, A magnetically suspended linearly driven cryogenic refrigerator, Proc 2nd Biennial Conf on Refrigeration for cryogenic sensors & electronic syst Greenbelt, MD, 1982, blz 263-304
[7] Zie voor de principes van magnetische lagers E M H Kamerbeek, Magnetische lagers, Philips Techn T **41**, 362-376, 1983
[8] L Honds en K H Meyer, Een lineaire gelijkstroommotor met permanente magneten, Philips Techn T **40**, 340-349, 1981/82
A K de Jonge en A Sereny, Analysis and optimization of a linear motor for the compressor of a cryogenic refrigerator, in R W Fast (red), Advances in cryogenic engineering, Vol, 27, Plenum, New York 1982, blz 631-640
[9] A Daniels, F Stolfi, A Sherman and M Gasser, Magnetically suspended Stirling cryogenic space refrigerator test results, verschijnt in Advances in cryogenic engineering, Vol 29

Opleidingen Metaalinstituut TNO

Het Metaalinstituut TNO in Apeldoorn organiseert de komende periode de volgende korte kadercursussen

15-16-17-20-21-22 maart 1989
Inspectie van gereedschapwerktuigen
Het doelmatig controleren van geometrisch nauwkeurigheid, mechanische conditie en werking van gereedschapwerktuigen

21 maart (avond), 22 maart 1989
CNC-ponsen/nibbelen
Mogelijkheden en beperkingen van het CNC-pons/nibbelproces
Beheersing, kwaliteit, foutoorzaken

3-4-10-11 april 1989
Beoordeling van radiografieën (basiscursus)
Het volgens de regels beoordelen en interpreteren van "films" van laswerk. Vierdaagse basiscursus (Aanvullend cursusdeel ter voorbereiding op het SKNDO-examen 17, 18 en 19 april)

5-6 april 1989
"Spannen" in een flexibel produktieproces
Keuze van spansystemen voor een grote varieteit aan produkten. Economische en organisatorische betekenis van het spanproces Technisch stappenplan

6-7-13-14-20-21 april 1989
Materiaalaspecten tribotechniek
Fundamentele en praktische aspecten van de tribotechniek (smering, wrijving en slijtage), materialen, smeermiddelen, materiaalkeuze-procedures

13-14 april 1989
Workshop Gereedschapbeheer
Standaardisatie, codering, documentatie en beheer van gereedschappen
Samenstellen en instellen van gereedschappen

Voor nadere informatie Metaalinstituut TNO, Apeldoorn, Bureau Opleidingen, telefoon. (055) 77 33 44, tst. 2527

Symposium

"Elektronische functies in gebouwen in relatie tot de infrastructuur"

Vele functies in gebouwen en woningen zullen in de toekomst elektronisch bestuurd c q beheerd worden
Vele activiteiten in gebouwen en woningen vragen in de toekomst een communicatie-infrastructuur

Ontwikkelen deze systemen zich autonoom of zal er een integrale ontwikkeling plaatsvinden?
Zal de openbare communicatie-infrastructuur deze ontwikkeling kunnen bijhouden?
Hoe maken we er op een zinvolle wijze gebruik van en zorgen dat de technologische mogelijkheden in ons voordeel werken?
Hoe kunnen de ontwikkelingen binnen verschillende vakgebieden op elkaar afgestemd worden zodat de wegen naar integratie met elkaar convergeren?
Hoe zien we de toekomst met elektronische diensten mogelijk gemaakt door ontwikkelingen op gebied van telecommunicatie en datacommunicatie?
Welke normen en uitgangspunten hanteren we hierbij vanuit de ervaringen in de verschillende vakgebieden?
Hoe is de ontwikkeling in de telecommunicatie-infrastructuur om hierin binnen afzienbare termijn voldoende garanties te bieden van een kwalitatief hoog niveau)
Aan welke normen en waarden moeten de hierop aangesloten voorzieningen in de toekomst voldoen?

Deze en vele andere aspecten komen tijdens het symposium aan de orde, enerzijds door een inventarisatie en anderzijds door reeds in gang gezette ontwikkelingen te toetsen aan een gewenste of zinvolle integratie van de verschillende bij gebouwen betrokken vakgebieden

De inleidingen worden gegeven vanuit een aantal vakgebieden met een sterke onderlinge samenhang, in relatie tot de mogelijkheden van electronic mail en informatie c.q. dataservices via de Europese en landelijk geprojecteerde ISDN-telecommunicatienetwerken in de nabije toekomst (ISDN = Integrated Services Digital Network)

Aan de orde komen zaken zoals
- Koppeling functies van woningen en gebouwen naar buitenwereld en omgekeerd Toekomstverwachtingen/gewenste ontwikkelingen.
  Bijvoorbeeld digitaal verwerken van meterstanden, persoonlijke beveiliging, beheer- en andere afstandgebonden services
- Integratie van diensten
  Mogelijkheden? Wat is gewenst of juist niet?
  Een "gateway" per gebouw of per vakgebied?
- Ontwikkeling en opzet van telecommunicatie-infrastructuur en eisen aan de netwerken
  Benuttingsgraad/contentie/transmissiesnelheden.
  Eisen te stellen aan de toegang tot de openbare infrastructuur
- Overwegingen vanuit ervaringen met brandbeveiliging Een eigen systeem of geïntegreerd?
- Beveiligingsaspecten, beveiligingssystemen.
  Ervaringen en overwegingen vanuit de beveiligingswereld.

Het symposium zal plaatsvinden op 23 maart 1989 in de Congreszaal van de Irenehal van het Jaarbeursgebouw te Utrecht
Aanvang 09.00 uur, tot 16 30 uur
Informatie te verkrijgen bij het verenigingsbureau van de TVVL te Amersfoort, tel : 033-634388.