

Vacuümpompen

G.P.A. Frijlink en J. Verhoeven

FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica,
Kruislaan 407, 1098 RE Amsterdam

HOOFDSTUK III

Inleiding

Er zijn vele typen vacuümpompen die alle hun kwaliteiten en beperkingen hebben. Meestal is het niet mogelijk ons met één pomp in een systeem vanaf één atmosfeer een voldoende lage druk te realiseren. Afhankelijk van de eisen die aan het vacuüm gesteld worden i.v.m. de te bereiken druk of de samenstelling van het restgas, zal dan een geschikte combinatie van verschillende pomptypen gekozen moeten worden. Hierbij is het van belang dat de verschillende pompen elkaar op de juiste wijze aanvullen en er zo min mogelijk storende effecten optreden. Daarom is kennis van de functie en eigenschappen van de verschillende pompen noodzakelijk.

Om tot een overzicht te komen is het zinvol de pompen naar het werkingsprincipe te verdelen in twee hoofdgroepen:

- I. Transportpompen. Hierbij wordt het te verpompen gas uit het systeem verwijderd.
- II. Gasopslagpompen. Hierbij wordt het te verpompen gas op één of andere manier gebonden, maar blijft ergens in het systeem opgeslagen.

III.1. Transportpompen

III.1.1. Inleiding

Deze hoofdgroep kunnen we weer in enkele groepen onderverdelen:

1. Verdringingspompen. Hierbij wordt een deel van het gas mechanisch afgezonderd en gecomprimeerd. Pompen die hierbij tegen de omgevingslucht kunnen uitblazen zijn b.v. de zuigerpomp en de membraanpomp, de draaischuifpomp, draaizuigerpomp, vloeistofringpomp en trochoïde pomp. De rootspomp heeft een geringere compressieverhouding en dient meestal door een van de reeds genoemde pompen te worden afgepompt.
2. Vloeistofstraalpompen. Hierbij wordt het gas getransporteerd door een krachtige vloeistofstraal.
Voorbeeld: Waterstraalpomp. Deze kan tegen atmosferische lucht uitblazen.
3. Dampstroompompen. Hierin wordt een snelle dampstroom opgewekt die uit zware moleculen bestaat. Door botsingen met de moleculen van het restgas worden deze laatste in de uitblaasrichting van de pomp gestuwd waar ze door een ander type pomp worden afgepompt.
Naar het drukgebied waarin deze pompen werkzaam zijn onderscheiden we dampstraalpompen, boosterpompen en diffusiepompen.
4. Moleculairpompen. Moleculen die vanuit het vacuümvat in deze pomp komen worden door botsingen met een snel bewegende vaste wand in de uitblaasrichting van de pomp gestuwd waar ze door een ander type pomp worden afgepompt. Thans wordt praktisch alleen de turbomoleculairpomp met veel succes toegepast.

III.1.2. Verdringingspompen

Zuigerpompen en membraanpompen

In fig. III.1. wordt links een schematische voorstelling van een zuigerpomp gegeven en rechts van een membraanpomp. De cylinderruimte is via een klep verbonden met het vacuümvat. Door het bewegen van de zuiger of het membraan wordt het volume van de cylinderruimte afwisselend vergroot en verkleind. Tijdens het vergroten van de cylinderruimte is de aanzuigklep geopend en kan een hoeveelheid restgas uit het systeem in de pompruimte stromen. Met zuiger of membraan in

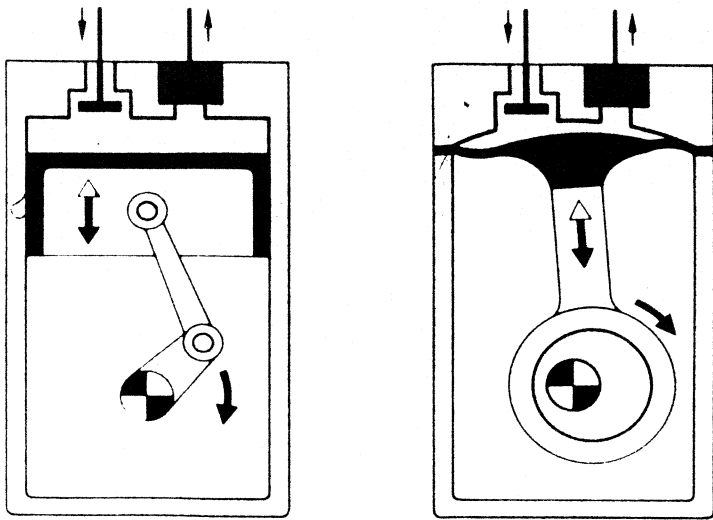


fig. III 1

links zuigerpomp schematisch

rechts membraampomp schematisch

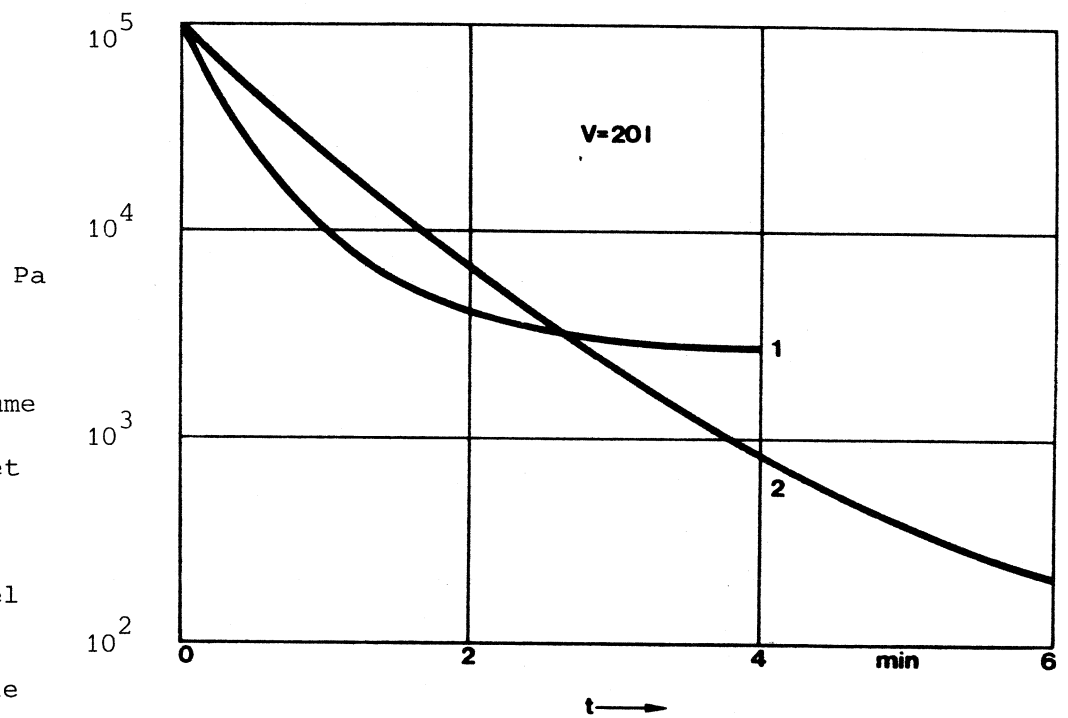


fig. III 2

Drukdaling in een volume van 20 l. afgepompt met een membraampomp.

1. Twee pompen parallel geplaatst.
2. Twee pompen in serie geplaatst.

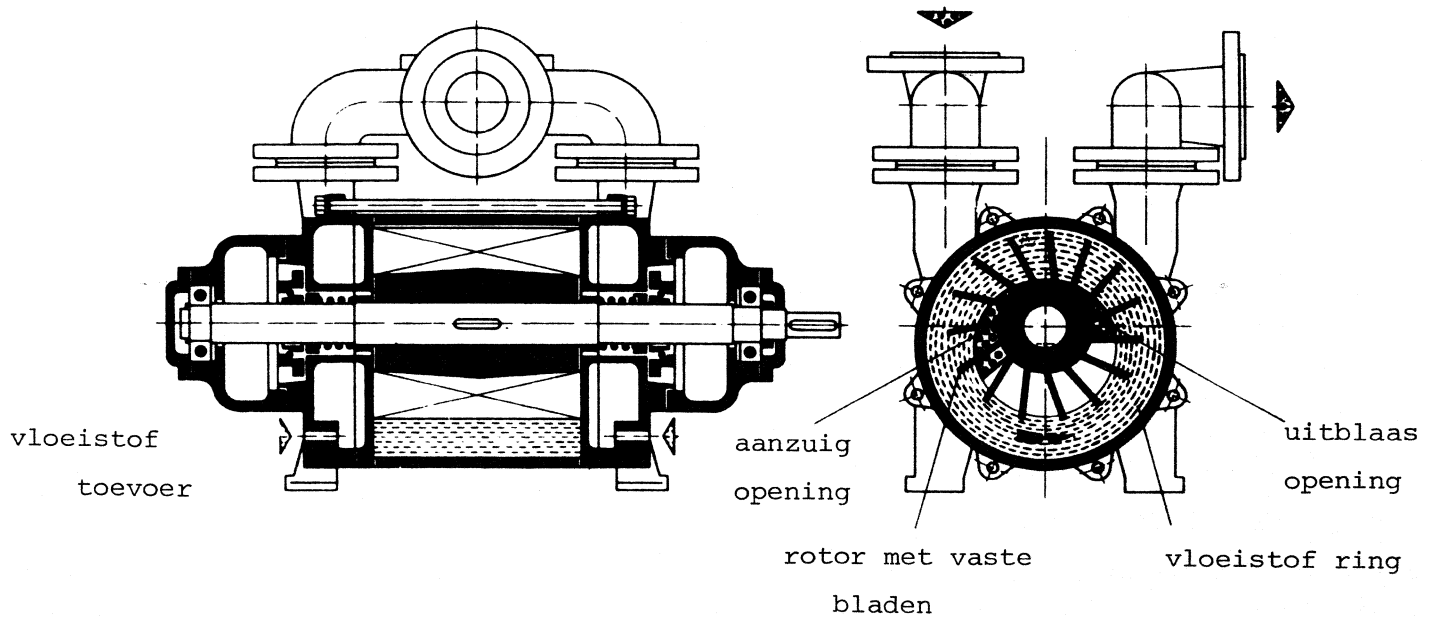


fig. III 3 vloeistofringpomp

de laagste positie wordt de klep naar het vacuümvat gesloten zodat een hoeveelheid restgas is afgezonderd. Dit wordt tijdens het verkleinen van de cylinderruimte gecomprimeerd totdat de druk gelijk is aan de atmosferische druk plus de druk van de uitblaasklep. Deze zal zich dan openen waarna het gecomprimeerde gas wordt uitgestoten. Deze pompcyclus wordt steeds herhaald.

De einddruk van dit type pompen is niet erg laag doordat een hoeveelheid van het gecomprimeerde gas in de cylinder achterblijft die tijdens de volgende neergang van zuiger of membraan weer expandeert waardoor de druk in de cylinder nooit beneden een bepaalde waarde kan komen. De resultaten worden wel beter wanneer twee pompen in serie worden geplaatst, waarbij de eerste pomp dus door de tweede wordt afgepompt. Met enkeltrapspompen is de einddruk ± 3000 Pa. Met een dubbeltrapspomp ± 250 Pa (zie fig. III.2). Ze vinden toepassing op medisch terrein, voor gaschromatografie en voor chemische doeleinden. In de meeste gevallen zullen echter aan het vacuüm hogere eisen worden gesteld.

III.1.3. Rotatiepompen

Hoewel natuurlijk alle pompen die volgens het rotatieprincipe werken in feite rotatiepompen zijn, wordt er meestal die groep pompen mee bedoeld, die in het voorvacuümgebied werken en tegen atmosferische lucht kunnen uitblazen, nl. de vloeistofringpomp, de draaischuifpomp, de trochoïdepomp, en de draaizuigerpomp.

De vloeistofringpomp

In de vloeistofringpomp bevindt zich een rotor met vaste bladen en een hoeveelheid vloeistof (zie fig. III.3). Door de snelheid van de rotor wordt de vloeistof als een ring tegen de buitenwand van de stator gedrukt. Doordat de rotor excentrisch is geplaatst vergroot en verkleint de vloeistofring bij elke omwenteling het gashoudend volume tussen twee bladen zoals een zuiger in een cylinder doet. Via een opening in de

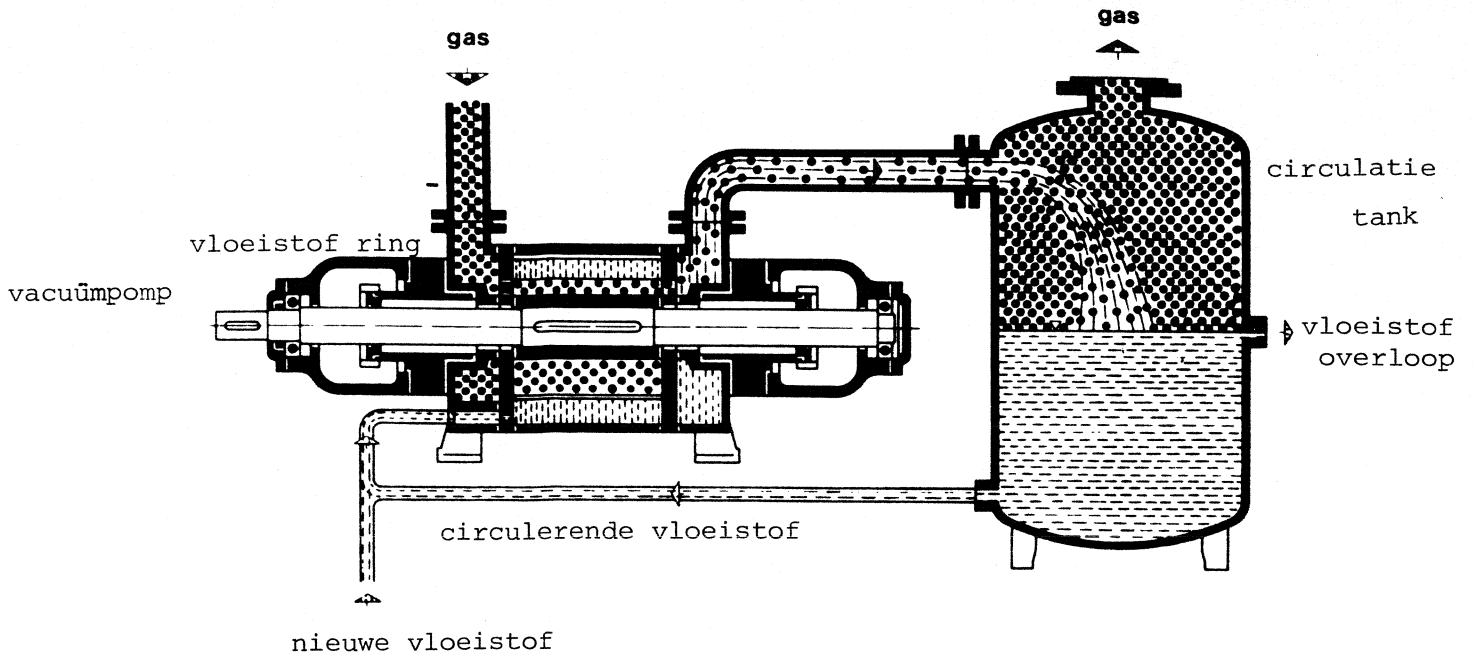


fig. III 4 circulatiesysteem voor pompvloeistof

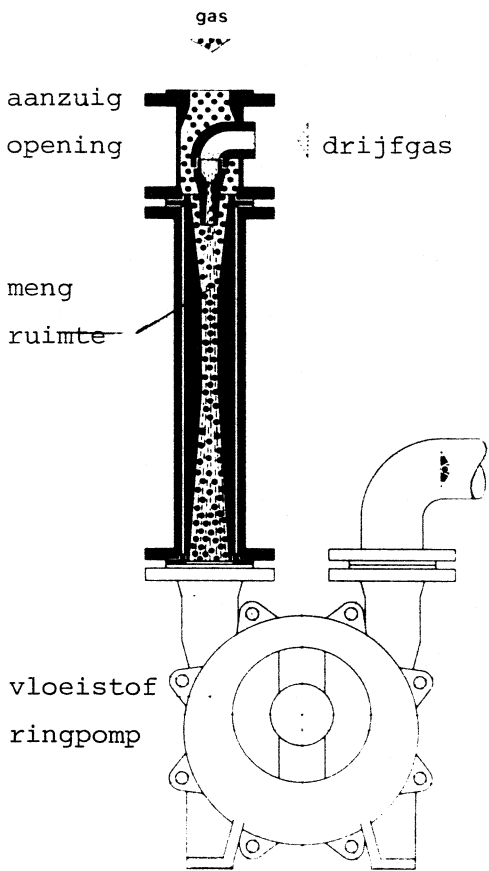


fig. III 5 combinatie van vloeistofringpomp en gasstraalpompe

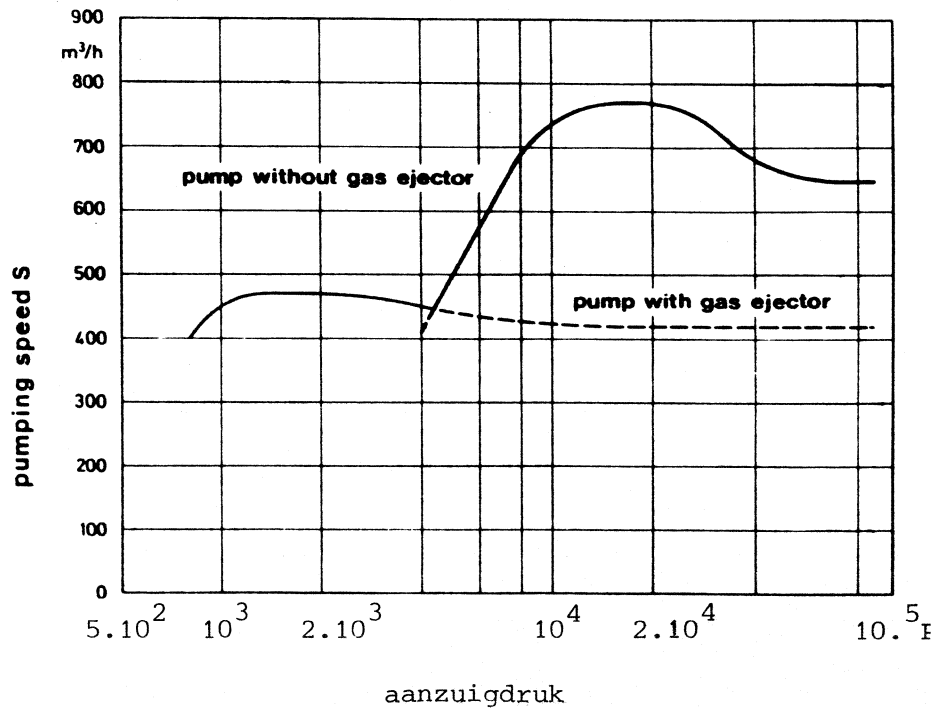


fig. III 6
Pompsnelheids karakteristieken van de vloeistofringpomp en de gasstraalpompe combinatie

nabijheid van het centrum van de pomp wordt door de snel draaiende rotor gas aangezogen en naar de andere kant van de pomp getransporteerd. Waar de vloeistof de ruimte tussen de rotorbladen gaat vullen wordt het in die ruimte aanwezige gas gecompriëerd en via een tweede opening, eveneens in de nabijheid van het pompcentrum, uitgedreven. Hierbij zal met het gas ook altijd wat vloeistof worden meegevoerd, hetgeen dus steeds moet worden aangevuld. Hierdoor wordt tevens de pomp gekoeld.

Er zijn verschillende systemen mogelijk, ook alweer mede afhankelijk van de gebruikte vloeistof. De vloeistof kan continue vers en koel worden aangevoerd, maar wordt soms ook rondgepompt. Een schema van dit laatste geeft fig. III.4. Het uitgeblazen gas wordt in dit geval van de vloeistof gescheiden in een circulatietank. De vloeistof kan dan weer naar de pomp worden teruggevoerd en eventueel met verse vloeistof worden aangevuld. Vloeistofringpompen worden ook wel in 2 trappen achter elkaar geplaatst. De theoretische pompsnelheid van de combinatie blijft dan behouden tot $\pm 10^4$ Pa en neemt daarna af tot de einddruk is bereikt.

De effectieve pompsnelheid bij een bepaalde druk kan dan ongeveer worden berekend volgens:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{theor}} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right) \quad (3.1)$$

Hierin is P_0 de dampspanning van de gebruikte vloeistof. Hieruit blijkt al dat de bereikbare einddruk afhankelijk is van de gebruikte vloeistof. Indien water van 15°C wordt gebruikt kan de einddruk (P_e) ± 3000 Pa bedragen. Soms wordt de vloeistofringpomp aan de aanzuigkant gecombineerd met een gasstraalpomp, welk pomptype nog zal worden behandeld (fig. III.5). De einddruk van de combinatie kan hierdoor dalen tot ± 800 Pa. De gasstraalpomp krijgt dan dikwijls geen aparte energie toegevoerd maar het verbeteren van de einddruk gaat dan sterk ten koste van de pompsnelheid over het hogere drukgebied. Zie fig. III.6. Daarom wordt in de praktijk de gasstraalpomp pas bijgezet op het punt waar de effectieve pompsnelheid van de vloeistofringpomp lager gaat worden dan wan-

neer die gecombineerd wordt met de gasstraalpomp.

Enkele eigenschappen van de vloeistofringpomp zijn het vrijwel isotherm verpompen van bijna alle gassen en dampen. Er zijn geen oliedeeltjes afkomstig van de smering in het verpompte gas. De pomp is ongevoelig voor kleine vuildeeltjes, stof of beperkte hoeveelheden vloeistof in het aangezogen gas. Hij maakt weinig lawaai en vereist weinig onderhoud.

De draaischuifpomp (principe en opbouw)

Bij de draaischuifpomp is ook een rotor excentrisch in een cilindrisch huis geplaatst (zie fig. III.7). Schuiven, die in dit geval in een gleuf in de rotor heen en weer kunnen bewegen worden door veren, die tussen de schuiven zijn aangebracht, tegen het huis gedrukt en vormen zo de vacuümafdichting tussen twee ruimten met verschillende druk. De afdichtingslijn tussen de rotor en het pomphuis is erg belangrijk omdat hierover, gedurende een gedeelte van elke arbeidsgang, een drukverschil van een atmosfeer kan staan. Bij veel pompen heeft het huis op die plaats dezelfde kromming als de rotor zodat een contactvlak ontstaat dat een veel betere afdichting geeft. Indien een pomp met paspennen is uitgerust levert dit meestal geen problemen op, maar anders is bij reparatie van de pomp het plaatsen van de rotor tegen het pomphuis een gevoelskwestie. Het gevaar bestaat dan dat de pomp te zwaar loopt of dat het contactvlak niet goed afdicht, zodat de pomp zijn einddruk niet meer haalt.

Wanneer een schuif de aanzuigopening is gepasseerd ontstaat een ruimte die in verbinding staat met het vacuümsysteem. Deze ruimte wordt groter totdat hij door de volgende schuif van het vacuümsysteem wordt afgesloten. De ruimte vergroot zich dan nog even totdat de schuiven horizontaal staan. Daarna wordt het zich in die ruimte bevindende gas gecompriëerd tot het de druk van de buitenlucht plus de veerdruk van de uitblaasklep overwint en het wordt dan via de uitblaasklep uitgedreven.

Wanneer de schuiven horizontaal staan, zijn er in de pomp dus drie arbeidsgangen tegelijk in werking: Een volume dat nieuw gas aanzuigt, een reeds afgesloten volume en een volume

waar gas wordt gecomprimeerd of uitgedreven.

Er zijn twee werkslagen per omwenteling van de rotor. Er wordt dus tweemaal per rotoromwenteling een volume V verplaatst, en als n het aantal omwentelingen per tijdseenheid is, dan is de totale pompsnelheid S dus: $S = 2 nV$. Het volume dat de pomp op deze wijze per tijdseenheid verplaatst blijft steeds gelijk en wordt het volumetrisch pompvermogen genoemd. Deze pompsnelheid bereikt de pomp nooit helemaal doordat de inwendige aanzuigkanalen al enige weerstand hebben. Het werkelijke pompvermogen of effectieve pompvermogen wordt bij het dalen van de aanzuigdruk steeds kleiner door teruglek van gassen en het vrijkomen van dampen. Dit effect wordt meestal merkbaar beneden een druk van ± 100 Pa.

Bij de einddruk van de pomp is de effectieve pompsnelheid nul geworden. Dus bij P_e is $S_{eff} = 0$. Dit betekent dus dat op dat moment in de pomp aan de aanzuigkant evenveel gas en damp vrijkomt als de pomp zelf continue verpompt. De effectieve pompsnelheid bij een bepaalde druk kan berekend worden met

$$S_{eff} = S_{vol} \left(1 - \frac{P_e}{P}\right) \quad (3.2)$$

De pomp is meestal geheel door olie omgeven. Deze olie dient voor: 1 - smering, 2 - afdichting, 3 - opvullen van schadelijke ruimten, 4 - warmte-overdracht, 5 - om corrosie tegen te gaan.

Door speciale boringen in het pomplichaam wordt de olie op de juiste plaatsen toegevoerd. Bij oude pompen kan het daarom mogelijk zijn dat bij het afzetten van de pomp de olie door de buitenlucht-druk via de pomp in het vacuümsysteem wordt geperst. Er dient zich dan ook een afsluiter tussen pomp en systeem te bevinden die de pomp afsluit van het systeem zodat het systeem vacuüm blijft en geen olie van de pomp naar binnen wordt geperst. Bovendien dient dan de rotatiepomp te worden belucht omdat een niet-beluchte pomp een te groot aanloopkoppel vereist en dus moeilijk op gang komt.

Kleppen die zich bij ontijdig uitvallen van de pomp automatisch sluiten en het pompedeelte beluchten, zijn in de handel verkrijgbaar. In moderne pompen zijn dergelijke kleppen meestal reeds ingebouwd en ze treden in werking doordat bv.

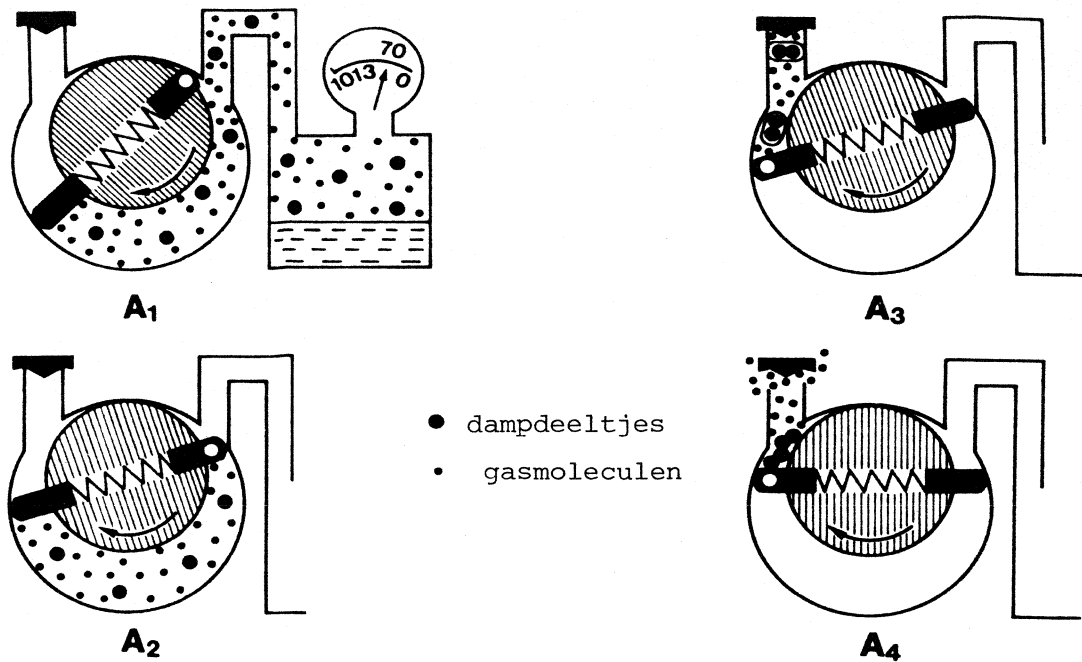


Fig. III 7 Pompcyclus van een draaischuifpomp zonder gasballast

A1 Pompruimte is verbonden met het vacuümvat, dat reeds gedeeltelijk is geëvacueerd.

A2 Pompruimte is van het vacuümvat afgesloten. De compressie begint bijna.

A3 Gas en damp is zover gecompriëerd dat de damp is gecondenseerd tot druppeltjes.

A4 Het niet condenseerbare restgas heeft nu de vereiste overdruk opgebouwd en opent de uitlaatklep. De gevormde vloeistof blijft in de olie achter.

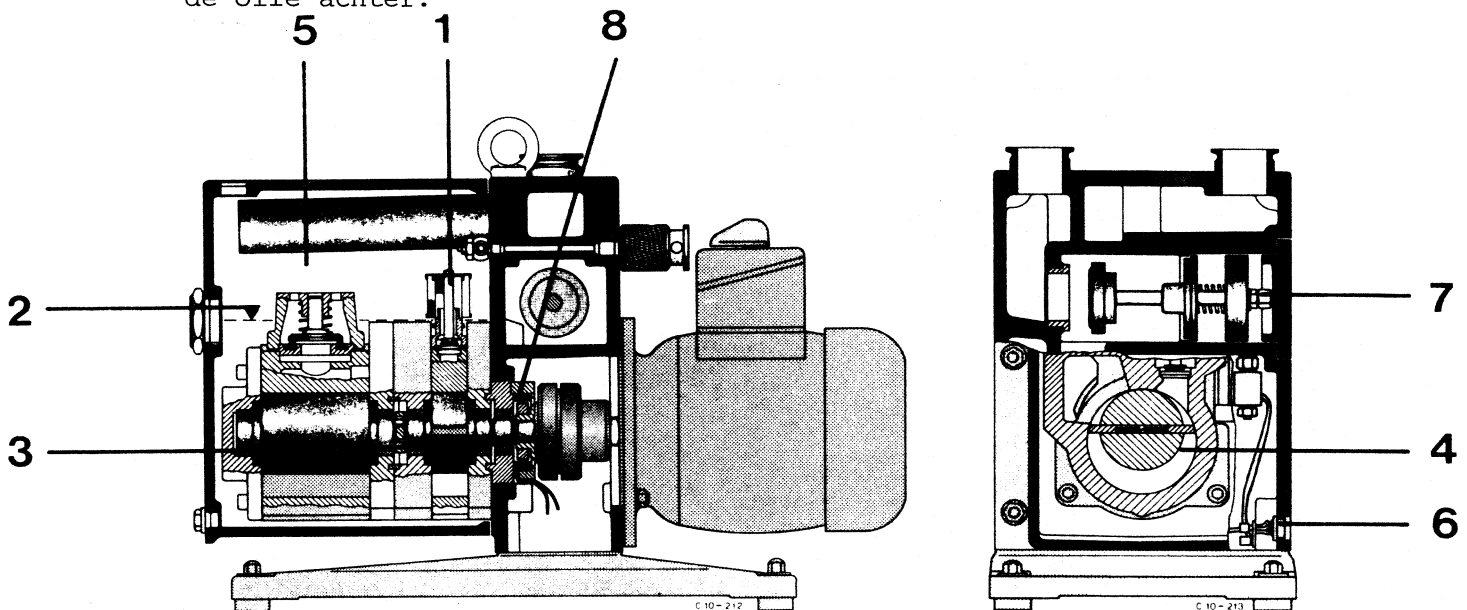


Fig. III 8 Tweetraps draaischuifpomp met terugslagklep die zich sluit bij het wegvallen van een kleine elektrische spanning.

1. Uitlaatklep

2. Oliepeil

3. glijlager

4. Pompruimte

5. Uitlaatriimte

6. Elektrische uitgang voor beveiliging

7. Vacuüm afsluitklep

8. Dynamo waarin kleine spanning wordt opgewekt.

door het stilstaan van de pomp geen olie meer naar de klep wordt gepompt zodat deze zich door veerdruk sluit of doordat een klein klepje zich opent door het wegvallen van een centrifugale kracht of een door het draaien van de pomp opgewekte elektrische spanning. Zie fig. III.8. De binnenstromende buitenlucht drukt dan de grote afsluiter boven de pomp dicht. In het geval er een elektrische spanning wegvalt kan dit ook gebruikt worden om het systeem te beveiligen, zodat het hele systeem wordt uitgeschakeld indien de pomp in ongerede mocht geraken.

Dubbeltrapspompen (zie fig. III.9)

Vaak worden twee pompen in serie geplaatst. Er wordt dan geen groter volumetrisch pompvermogen verkregen maar wel een beter eindvacuüm. Daardoor blijft de effectieve pompsnelheid in een bepaald drukgebied wel langer behouden dan bij de enkeltraps pomp (zie fig. III.10). In de praktijk komt het er meestal op neer dat de twee trappen van de pomp op één as worden gemonteerd.

Deze twee trappen zijn dan meestal een halve arbeidsgang ten opzichte van elkaar verschoven. Aan de kant van het vacuümsysteem bevindt zich de eerste trap, die dus continue door de tweede trap wordt afgepompt. Daardoor staan er ten eerste veel kleinere drukverschillen over de afdichtingen in de eerste trap waardoor de teruglek van gas naar de aanzuigopening geringer is. Ten tweede wordt het beetje olie dat als smering in deze trap aanwezig is continue door de tweede trap afgepompt zodat er zich weinig opgeloste gassen in bevinden. Omdat het uit het vacuümvat afkomstige gas in de eerste trap al is gecompriëerd geeft men de tweede trap vaak een kleiner volume. Er dient zich dan wel een uitlaatklep tussen eerste en tweede trap te bevinden om eventueel in de pomp geraakte vloeistof, bv. de smeerolie, gelegenheid te geven weg te kunnen omdat die zich niet laat comprimeren. Ook kan bij evacueren van een belucht systeem de druk tussen beide trappen anders te hoog oplopen.

Gasballast

Indien met de rotatiepomp een druk wordt bereikt van 10^{-1} Pa en de atmosferische druk is 10^5 Pa, dan betekent dit dat de pomp het verpompte gas 10^6 maal comprimeert. Het oorspronkelijke volume V is daarmee een miljoen maal kleiner geworden, v . De compressieverhouding $K = V/v$ is in dit geval 10^6 . Niet alle gassen kunnen zover worden gecomprimeerd. Bij aanwezige dampen bestaat het gevaar dat zij dan tot vloeistof condenseren, welke vloeistof in de olie van de pomp gaat meecirculeren en op deze wijze ook weer aan de aanzuigkant uit de olie vrij kan komen, waardoor de einddruk slechter wordt maar ook de smerende eigenschappen van de olie minder worden.

Water heeft bv. bij kamertemperatuur een verzadigde dampspanning van ± 2250 Pa, dat is 2,25% van de atmosfeer. Waterdamp kan bij kamertemperatuur dus maar tot 2250 Pa worden gecomprimeerd. Bij een poging tot verder comprimeren wordt water gevormd (zie fig. III.7).

Bij evacueren van het vacuümsysteem komt waterdamp van oppervlakken en uit allerlei materialen vrij. Soms is ook in het vacuüm een proces gaande waarbij waterdamp vrij komt. Uit restgasspectra is bekend dat het restgas van een niet uitgestookt systeem veel water, massa 18, bevat.

Indien zich bij de druk van 10^{-1} Pa 25% waterdamp in het restgas bevindt dan zou dit bij de compressieverhouding $K = 10^6$ een partiële druk krijgen van $2,5 \cdot 10^4$ Pa, hetgeen, zoals gebleken is, bij kamertemperatuur onmogelijk is omdat zich dan reeds bij $2,25 \cdot 10^3$ Pa water vormt.

Een methode om het condenseren van waterdamp in de pomp te voorkomen is het verkleinen van de compressieverhouding V/v . Dit wordt bereikt door tijdens het comprimeren van het restgas, extra buitenlucht in de compressieruimte toe te laten. Dit noemt men de gasballast B. Het resultaat is dat tijdens het comprimeren veel eerder de uitblaasdruk wordt bereikt. Zie afb. III.11. De compressieverhouding wordt dan

$$K = \frac{V}{v + B} ,$$

waarbij de kleine v kan worden verwaarloosd, dus $K = V/B$.

fig. III 9

Schematische voorstelling van een dubbeltraps draaischuifpomp

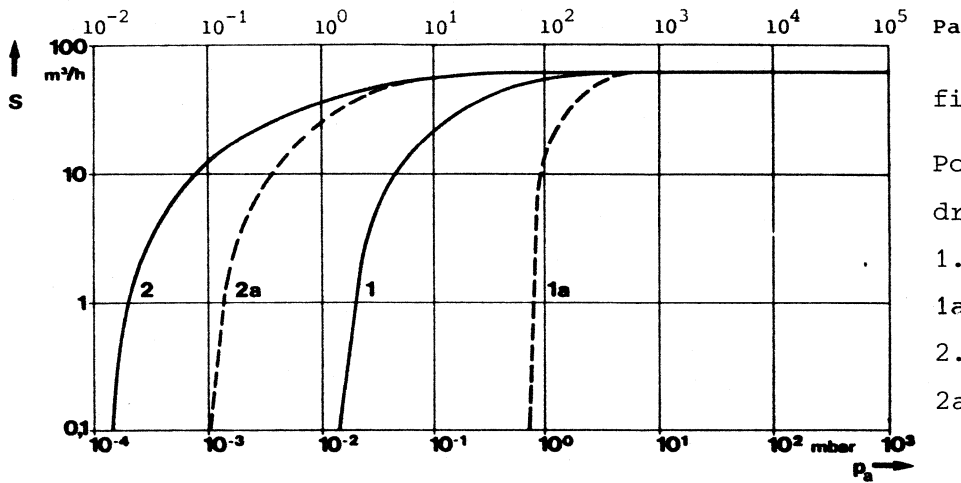
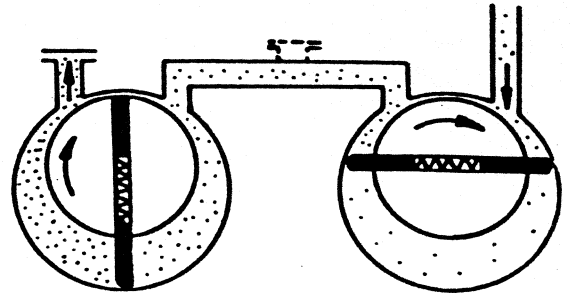


fig. III 10

Pompkarakteristieken van de draaischuifpomp.

- 1. enkeltraps
- 1a enkeltraps met gasballast
- 2. dubbeltraps
- 2a dubbeltraps met gasballast

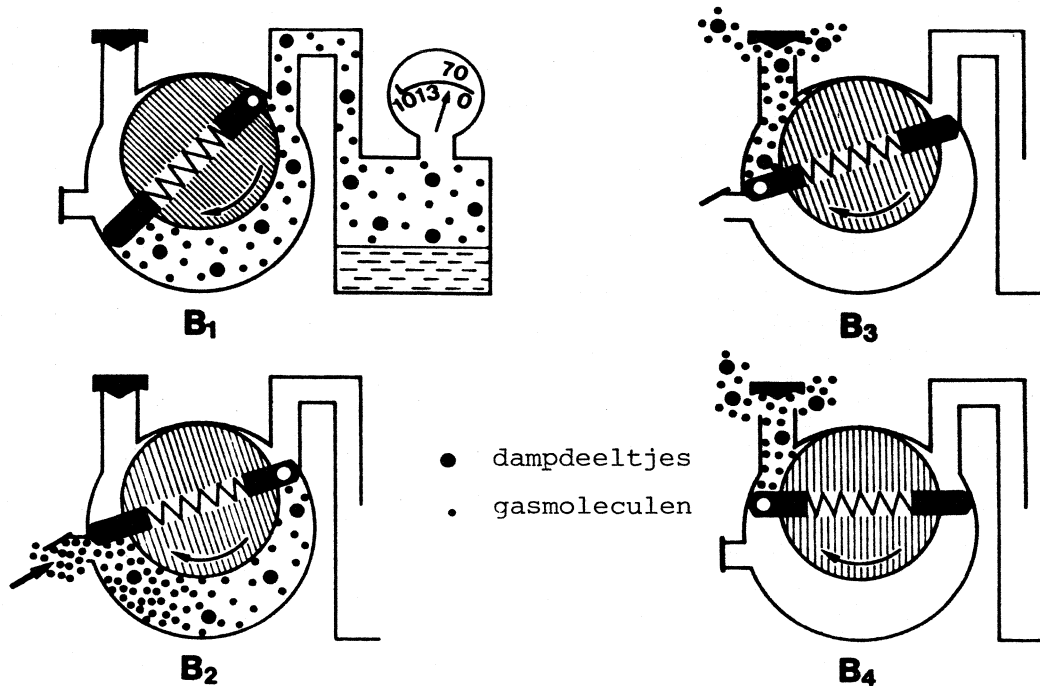


fig. III 11 Pompcyclus van een draaischuifpomp met gasballast

- B1. Aanzuigen van gas- en dampdeeltjes
- B2. Inlaten van gasballastlucht
- B3. Vereiste overdruk wordt eerder bereikt
- B4. Er vormt zich ditmaal geen vloeistof

In de praktijk is $B_{\max} = 0,1$ V, dus dan is $K = 10$.

Wanneer P_d de dampdruk in het systeem is en P_{verz} de verzadigingsdruk bij de heersende temperatuur dan zal er geen condensatie optreden wanneer P_d niet zoveel wordt gecomprimeerd dat P_{verz} wordt bereikt, in formule $K \times P_d < P_{\text{verz}}$.

Voor de veiligheid stelt men dan $K \times P_d = 80\% \times P_{\text{verz}}$, dus de maximaal toelaatbare dampdruk is dan

$$P_{d \max} = 0,8 \times \frac{1}{K} \times P_{\text{verz}} \quad (3.3)$$

Voor $K = 10$ wordt dit:

$$P_{d \max} = 0,08 \times P_{\text{verz}} .$$

We kunnen hiermee eenvoudig uitrekenen dat bij een koude pomp waarin de verzadigingsdruk ± 2250 Pa is, de maximaal toelaatbare dampdruk in het vacuümvat 180 Pa is. Daar de partiële waterdampdruk in de atmosfeer dikwijls veel hoger is blijkt hieruit dat u beter niet met een koude pomp uw systeem kunt evacueren; zelfs niet met geheel geopende gasballast.

Toch zijn er geautomatiseerde systemen waarin dit wel gebeurt. Mocht er wat water in de olie zijn gecondenseerd, laat dan de pomp enige tijd draaien met geopende gasballast waardoor hij heter wordt en het water sneller verdwijnt.

Door het gebruik van de gasballast wordt in de compressieruimte dus eerder de atmosferische druk bereikt. Dit betekent dat tijdens elke compressieslag gedurende langere tijd een drukverschil van meer dan één atmosfeer over de afdichtingen van de pomp staat. Hierdoor lekt meer gas naar de aanzuigkant van de pomp terug dan zonder gasballast het geval is. De einddruk van een pomp die met gasballast werkt is dus altijd slechter.

Bij een tweetraps pomp is de compressieverhouding van de eerste trap altijd gering. De gasballast is daar dus op de tweede trap aangebracht waardoor de einddruk minder nadelig wordt beïnvloed dan bij de enkeltraps pomp. Zie fig. III.10. De gasballast kan ook nog een geluiddempende functie hebben. De olie, die altijd in de pomp circuleert en via de uitblaasklep weer wordt uitgestoten, laat zich niet comprimeren.

Wanneer de pomp nu bij een zeer lage aanzuigdruk werkt en dus geen - of zeer weinig - gas verplaatst, kan de klap van een passerende schuif in de uitblaasklep een tikkend geluid veroorzaken. De pomp begint te ratelen, hetgeen "olieslag" wordt genoemd. Dit is een naar geluid, maar kan ook de slijtage bevorderen.

Door een heel klein beetje gasballast toe te laten gaat dat als een kussentje bij de uitblaasklep functioneren waardoor het geratel ophoudt. Dikwijls hebben moderne pompen hiertoe ergens een speciaal capillair gaatje, soms met een schroevendraaier instelbaar, waardoor continue een heel klein beetje gasballast wordt toegelaten. Begint de pomp te ratelen, dan kan het zijn dat dat gaatje is verstopt.

Draaizuigerpomp

In de draaizuigerpomp bevindt de aandrijfjas zich centraal in het pomphuis. Zie fig. III.12. Binnen een ronde zuiger bevindt zich een excenter die de zuiger langs de pompwand rond laat glijden. Een schuif, die aan de zuiger vastzit en die door een beweegbare zitting in en uit de pompruimte kan schuiven, verhindert het ronddraaien van de zuiger en dient tevens als afsluiting tussen aanzuig- en uitblaaskant. Bij elke rondgang van de zuiger wordt tussen schuif, zuiger en pomphuis een volume V gevormd dat zich gedurende de hele rondgang vergroot. Het te verpompen gas wordt daarbij door een opening in de schuif aangezogen. Bij de volgende rondgang van de zuiger is het gevormde volume van het vacuümsysteem afgesloten. Het binnengestroomde gas wordt gecomprimeerd en via een uitblaasklep uitgedreven. Het gehele proces duurt dus 2 omwentelingen van de excenter. Daar er aan weerszijden van de raaklijn tussen zuiger en pomphuis twee arbeidsgangen tegelijkertijd in werking zijn wordt er dus bij elke omwenteling één volume V verplaatst. Wanneer n het aantal omwentelingen per tijdseenheid is, dan is van deze pomp het volumetrisch pompvermogen dus n maal V

$$S = n \cdot V.$$

Ook de draaizuigerpomp wordt als ééntraps- en tweetraps-pomp uitgevoerd en kan, evenals de draaischuifpomp van gasballast zijn voorzien.

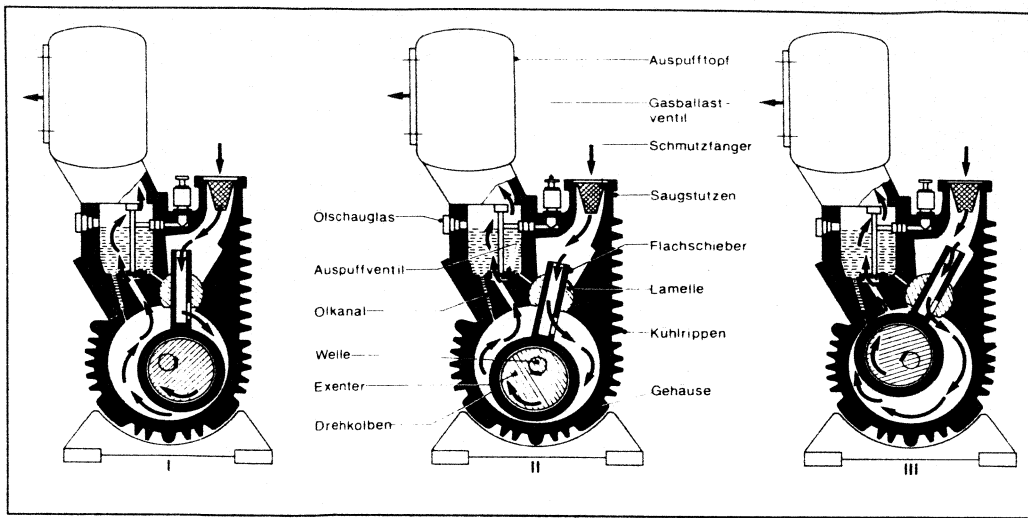


fig. III 12. Draaizuigerpomp: Schematische weergave van bouw en werking.

fig. III 13.
Trochoïde pomp.
Schematische weergave
van bouw en werking

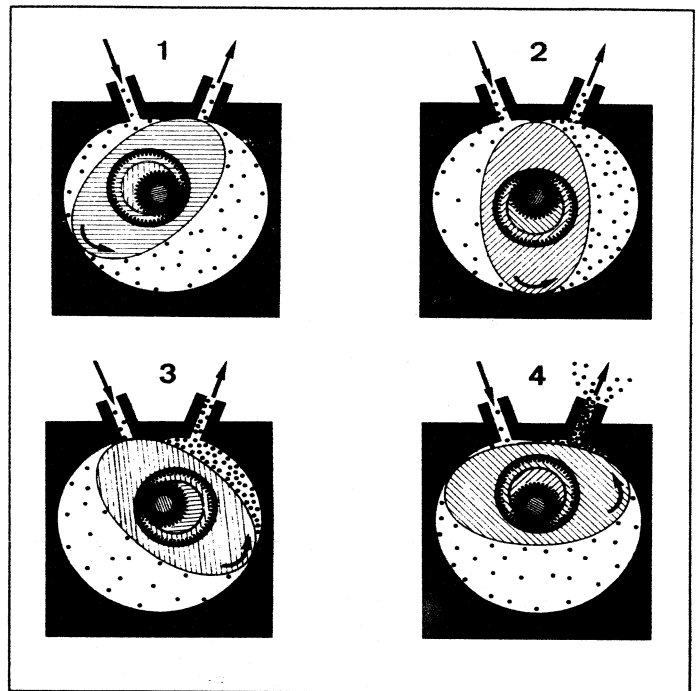
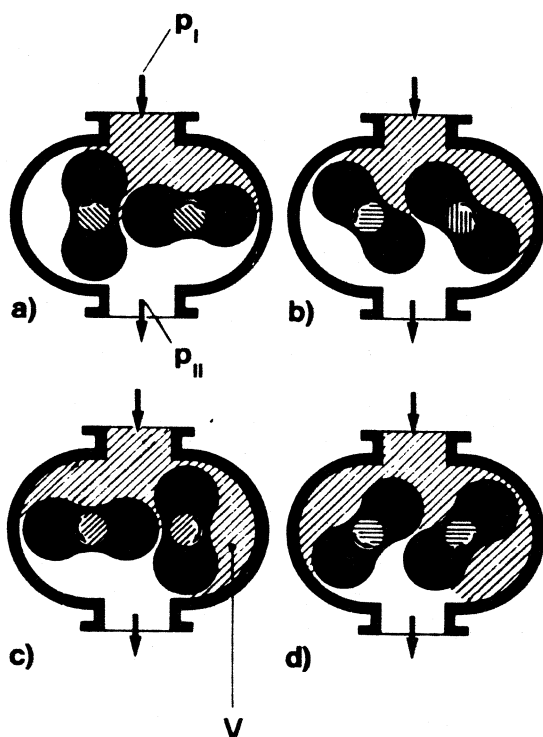


fig. III 14. Roots pomp



a. Gas met aanzuigdruk P , stroomt de pomp binnen.

b. Een volume V wordt afgezonderd

c. Volume V is geheel afgezonderd

d. V bereikt de uitblaaskant waar een hogere druk heerst.

Hierdoor wordt het gas in V gecompriemd.

Omdat de draaizuigerpomp geen schuiven heeft die zeer licht in de rotor heen en weer moeten kunnen bewegen, is hij minder kwetsbaar en leent hij zich beter voor het grovere werk dan de draaischuifpomp. Hij is dan ook meestal voor grotere pompvermogens gemaakt.

Trochoïde pomp

De trochoïde pomp is een draaizuigerpomp die volgens het principe van de wankelmotor is gebouwd. In het pomphuis dat een gecompliceerd model heeft, draait van een ovale zuiger het zwaartepunt in een cirkelvormige beweging rond de rotatie-as. Zie fig. III.13. De zuiger zelf blijft daarbij op minstens 2 plaatsen in contact met het pomphuis en vormt daarmee afdichtingslijnen tussen ruimten met verschillende druk. Tussen de aanzuigopening en de uitblaasopening is de zuiger altijd in contact met het pomphuis en om deze belangrijke afdichting te bevorderen is het pomphuis hier voorzien van een beweegbare strip die de bewegingen van het oppervlak van de zuiger kan volgen. Evenals bij de andere rotatiepompen zorgt de in het pomphuis aanwezige olie voor een goede afdichting. De zuiger werkt veel meer uitgebalanceerd dan in de gewone draaizuigerpomp waardoor het toerental groter kan zijn. Ook het zuigvolume V is groter zodat bij dezelfde pompomvang een veel groter pompvermogen wordt bereikt. De pompen worden dan ook gemaakt voor grote pompvermogens en zijn van gasballast voorzien. Zonder gasballast is de einddruk $\pm 8,5$ Pa, met gasballast ± 85 Pa.

Enkele belangrijke punten bij het werken met rotatiepompen:
In het algemeen moet met een koude pomp geen damp worden verpompt, zelfs niet met volledig geopende gasballast. Laat de pomp eerst tegen een dichte klep warm draaien. De werkteemperatuur is $\pm 85^{\circ}\text{C}$. De meeste dampen hebben bij die temperatuur een zo hoge dampspanning dat, met het gebruik van gasballast, condensatie in de pomp kan worden voorkomen.

Indien erg veel schadelijke damp verpompt moet worden is het mogelijk een condensor in de vacuümleiding voor de rotatiepomp op te nemen opdat zo weinig mogelijk van die dampen de rotatiepomp bereiken. Een rotatiepomp werkt met olie die zeer goede smerende eigenschappen moet hebben. Deze olie heeft echter geen goede vacuümtechnische eigenschappen. Daardoor bestaat het restgas van een rotatiepomp voor een groot deel uit oliedamp.

Met de einddruk van een rotatiepomp bedoelt de fabrikant dan ook meestal de einddruk van de permanente gassen, dus zonder de aanwezige dampen. Het meten van deze druk is mogelijk door tussen pomp en meetbuis een koelvinger met bv. vloeibare stikstof in de leiding op te nemen waarop de dampen kunnen condenseren.

Om te voorkomen dat oliedamp uit de rotatiepomp in een ultrahogvacuümsysteem diffundeert verdient het aanbeveling een forelinetrapp tussen rotatiepomp en systeem te monteren, die de oliedamp moet tegenhouden. Forelinetraps bevatten dikwijls zeoliet of aluminiumoxide balletjes.

Aan de uitblaaskant raakt de pomp ook oliedeeltjes kwijt; vooral wanneer veel lucht verplaatst wordt. Daarom is het goed de pomp op een afvoerleiding aan te sluiten of een uitblaasfilter op de pomp te monteren om de omgeving niet met oliedamp te verontreinigen. Realiseer u hierbij dat eventueel verpompte schadelijke gassen wel door het uitblaasfilter in uw leefruimte kunnen komen.

Als agressieve gassen moeten worden verpompt is het mogelijk daarvoor een aangepaste pomp te kopen. De olie moet dan wel soms zeer dikwijls worden vernieuwd omdat die met de gassen kan reageren waardoor de smerende eigenschappen verdwijnen. Het is ook mogelijk een apart oliefiltersysteem op de pomp aan te sluiten dat continue chemische stoffen of onreinheden uit de olie filtert. Het is natuurlijk altijd verstandig volledig met uw handelaar door te spreken wat uw specifieke problemen zijn. Dit alles ter bescherming van de dure installatie en ter verbetering van de resultaten.

Rootspompen

Vooral voor industriële doeleinden, maar ook wel in combinatie met bv. een grote diffusiepomp op laboratoria, kan het soms nodig zijn een grote pompsnelheid te hebben in het drukgebied van 10^{-1} - 10 Pa. In dit drukgebied hebben echter de reeds behandelde voorvacuümpompen een al duidelijk verminderde effectieve pompsnelheid. Dat kan ook reeds geheel nul zijn geworden zodat de pomp dus zijn einddruk heeft bereikt. We staan dan voor de keuze een enorm grote voorvacuümpomp aan te schaffen die dan toch nog voldoende prestaties levert of een kleinere pomp in serie te plaatsen met een ander type pomp die in dat drukgebied zijn maximum pompsnelheid heeft, nl. de boosterpomp.

Er zijn boosterpompen volgens het dampstroomprincipe en mechanische boosterpompen die volgens het principe van de verdringerpomp werken. Dit laatste is de rootspomp, die in het algemeen dus niet tegen atmosferische druk kan pompen maar moet worden afgepompt door een voorpomp van een van de reeds behandelde typen.

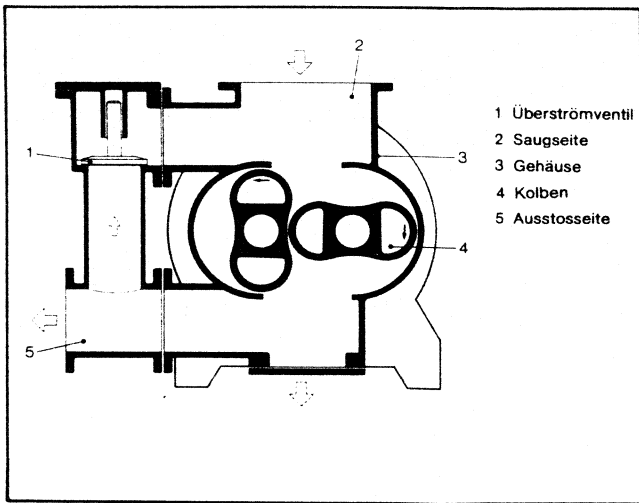
De rootspomp bestaat uit een pomphuis waarin twee achtvormige rotors zich min of meer tegen elkaar afwikkelen (zie fig. III.14). De pomp is met een hoge mate van precisie zo geconstrueerd dat de rotors elkaar en het pomphuis net niet raken. De tussenruimte is 0,1 - 0,2 mm. In het pomphuis bevindt zich geen afdichtende smeerolie. De rotors draaien dus volkomen vrij in het rond en kunnen daarom een zeer grote snelheid bereiken en dus ook een zeer grote pompsnelheid ontwikkelen. Bij het draaien van de rotors wordt aan beide zijden tussen rotor en pomphuis telkens een gedeelte van het restgas uit het vacuümsysteem afgezonderd en in de richting van de uitblaaskant van de pomp gestuwd. Daar bevindt zich restgas met een hogere druk waartegen het nieuw-aangevoerde volumegas wordt gecomprimeerd.

Op deze wijze wordt er 4 maal per omwenteling een volume V verplaatst. Het volumetrisch pompvermogen S_V is in dit geval dus $S_V = 4 n V$, waarin n weer het aantal omwentelingen per tijdseenheid is. Doordat zich geen afdichtingsolie in het pomphuis bevindt kan er via de ruimte, die er noodzakelijkerwijs minimaal tussen de rotors en het pomphuis moet zijn, makkelijk

gas van de uitblaaskant naar de aanzuigkant terugvloeien. Dit is een van de oorzaken waardoor deze pomp een beperkte compressieverhouding heeft, die maar maximaal ongeveer 20 - 50 bedraagt, afhankelijk van de grootte van de pomp en van de werkdruk. Er is ook nog een reden waarom de compressieverhouding zelfs niet te groot mag worden en dat is de warmte die bij het comprimeren van het gas vrijkomt. Door de zeer geringe tolerantie in de ruimte tussen rotors en pomphuis mogen de rotors door warmte niet teveel uitzetten omdat zij elkaar, of het huis, dan zouden raken en de pomp zou vastlopen. Dit gevaar wordt nog vergroot doordat de rotors niet door aanwezige olie worden gekoeld en dus hun warmte moeilijk kunnen afgeven. Daarom is het van groot belang dat een juiste pompcombinatie wordt gekozen zodat het door de rootspomp verplaatste gas bij voldoende lage druk door de voorpomp kan worden afgepompt.

Dit principe is echter moeilijk te realiseren wanneer een groot vacuümvat vanaf atmosferische druk moet worden geëvacueerd, waarbij de voorpomp normaal door de rootspomp heen pompt. Het is in zo'n geval natuurlijk mogelijk om, uit veiligheidsoverwegingen, de rootspomp pas aan te zetten als een druk van ± 1000 Pa is bereikt. Er zijn echter betere veiligheidsmaatregelen mogelijk om oververhitting te voorkomen. Een ervan is een omloopleiding van de hoge- naar de lage-drukkant van de rootspomp. Hierin bevindt zich dan een klep die zich opent zodra een bepaald drukverschil wordt overschreden. Zie fig. III.15. De rootspomp kan dan gelijk met de voorpomp worden aangezet waardoor, bij het dalen van de aanzuigdruk, successievelijk een veel grotere pompsnelheid bereikt wordt dan alleen met de voorpomp het geval zou zijn geweest. Zie fig. III.16.

Een andere mogelijkheid is om via een drukmeter het toerental van de rootspomp te regelen zodat de pomp bij hogere drukken een lager toerental heeft en daardoor niet oververhit raakt. Dit principe kan ook omgekeerd worden toegepast: Wanneer dan een lage druk is bereikt en er bv. gas in een systeem moet worden ingelaten is het mogelijk om het toerental van de pomp bij enigszins stijgende druk te laten toenemen, zodat, door het variëren van de pompsnelheid, een ingestelde druk binnen



- 1 Überströmventil
- 2 Saugseite
- 3 Gehäuse
- 4 Kolben
- 5 Ausstosseite

fig. III 15

Rootspomp met overdrukventiel

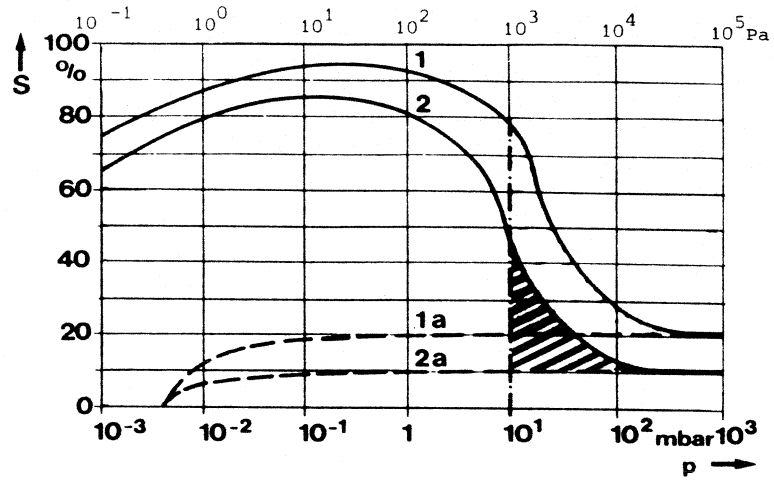
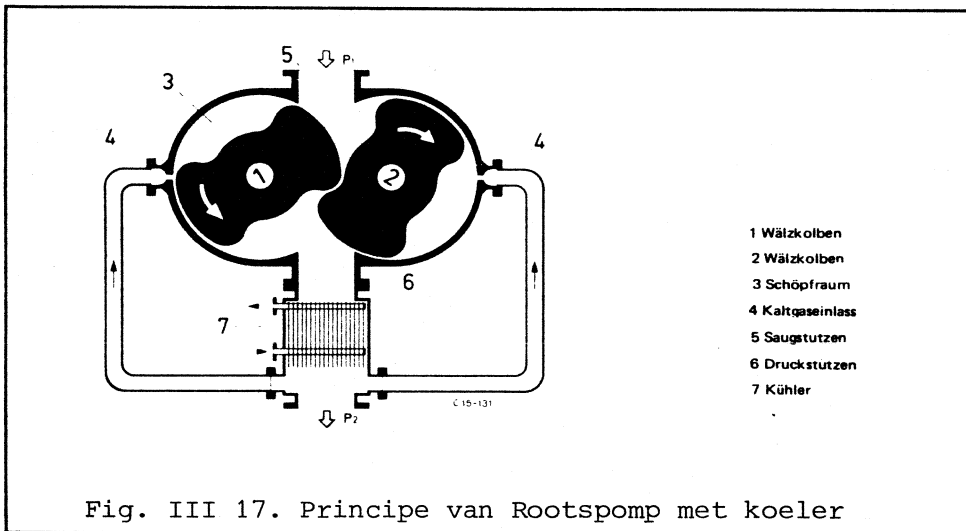


Fig. III 16

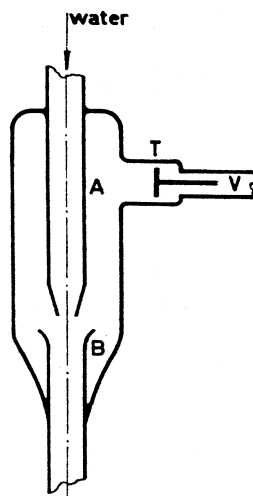
Pompkarakteristieken 1 en 2 van een rootspomp met verschillende voorpompen 1a en 2a. Het gearceerde gedeelte boven 10^3 Pa

is winst in pompsnelheid bij het gebruik van een overdrukventiel.



- 1 Wälzkolben
- 2 Wälzkolben
- 3 Schöpfraum
- 4 Kaltgaseinlass
- 5 Saugstutzen
- 6 Druckstutzen
- 7 Kühler

Fig. III 17. Principe van Rootspomp met koeler



- A = straalpijp
- B = uitlaat
- T = ventiel
- V = vacuümaansluiting

Fig. III 18 Principe van de waterstraalpompe

bepaalde grenzen in het vat kan worden gehandhaafd.

Hoewel in het algemeen een rootspomp gecombineerd moet worden met een voorpomp zijn er toch rootspompen die zelfstandig tegen atmosferische druk kunnen pompen en daarbij een einddruk kunnen bereiken van $\pm 2 \cdot 10^4$ Pa. Natuurlijk zouden daarbij de rotors te heet worden als er geen koeling werd toegepast. Hiertoe heeft men aan de uitblaaskant van de pomp een koeler aangebracht om het uitgeblazen gas te koelen.

Een deel van het gekoelde gas wordt dan weer naar het pomphuis teruggevoerd waar het bij het reeds afgezonderde volume gas kan stromen en aldus de rotors kan koelen. De rotors geeft men in dit geval soms een speciaal model netgeen moet voorkomen dat het terugstromende gas aan de aanzuigkant van de pomp terecht komt en het rendement zou verlagen. (zie fig. III.17). Hoewel zich in de rootspomp in principe geen olie bevindt, komen er toch oliedeeltjes, afkomstig van de lagersmering, in het vacuümsysteem terecht. De rootspomp maakt dus geen "schoon" vacuüm, dat vrij zou zijn van koolwaterstoffen.

III.1.4. Waterstraalpompe

Waarschijnlijk uitgaand van het principe: "Een straal is een straal", wordt de waterstraalpompe dikwijls onder de categorie "dampstroompompen" behandeld terwijl ik hem onder de verdringerpompen rangschik, hoewel hij eigenlijk een geheel aparte categorie vertegenwoordigt, nl. die der vloeistofstraalpompen.

In de waterstraalpompe spuit een krachtige straal water, omringd door het te verpompen gas, in een trechtervormige opening (zie fig. III.18). Door de ontstane turbulenties bij het spuiten in de nauwer wordende opening worden kleine hoeveelheden van het gas door de vloeistof ingekapseld en aldus van het vacuümsysteem afgezonderd en als belletjes in de waterstroom meegevoerd. Soms wordt dat meeneem-effect nog versterkt door een draaiend spuitstuk aan te brengen. Het zijn dus geen moleculbotsingen waardoor het gas wordt verplaatst maar er worden echt kleine hoeveelheden gas afgezonderd en aldus naar de uitstroomkant van de pompe gevoerd.

De einddruk hangt sterk af van de dampdruk, en dus van de temperatuur, van het water alsmede van de waterdruk in het spuitstuk, maar ligt meestal rond de 2500 Pa. In een kleine uitvoering vindt de pomp toepassing voor allerlei medische- en laboratorium doeleinden en tegenwoordig ook wel in de huishouding om voedsel "vacuüm" te verpakken.

III.1.5. Turbomoleculaire pomp

Zoals nog zal worden behandeld, bevindt zich boven de meeste diffusiepompen een baffle om te verhinderen dat oliedeeltjes vanuit de pomp in het hoogvacuümsysteem geraken.

Om de werking van een dergelijk baffle te verbeteren kwam W. Becker op het idee het baffle te laten rotèren. De resultaten die met dit draaiende baffle werden bereikt waren zo goed dat het zich in 1958 ontwikkelde tot een zelfstandige pomp die aan hoge eisen kan voldoen.

Zoals uit de naam al blijkt, heeft de pomp de bouw van een turbine. In het cilindrische huis bevindt zich een aantal stilstaande statorschijven waartussen rotorschijven snel ronddraaien. De schijven aan de hoogvacuümkant zijn voorzien van schuine rotorbladen en hebben een zeer open structuur om de pompsnelheid en het geleidingsvermogen daar zo groot mogelijk te maken. Aangezien de pomp comprimerend werkt wordt het volume van het gas, dat door de pomp heen verplaatst wordt, steeds kleiner. Daarbij zijn de schijven aangepast. Die aan de vacuümkant zijn veel geslotener en sterker dan die aan de hoogvacuümkant. Veel minder spleten zijn daar veel schuiner in de schijven aangebracht waardoor ter plaatse een geringere pompsnelheid, maar een grotere compressieverhouding wordt verkregen. De rotorschijven en statorschijven zijn spiegelbeeldig (zie fig. III.19).

Elke statorschijf vormt met een rotorschijf samen een "trap". Doordat vele van die schijven achter elkaar zijn geplaatst is er dus een pomp met vele "trappen" ontstaan. De ruimte tussen rotor- en statorschijven kan bij grote pompen wel enkele millimeters bedragen, en is dus veel minder kritisch dan bv. bij de rootspomp het geval is, omdat over elke schijf maar een gering drukverschil heerst.

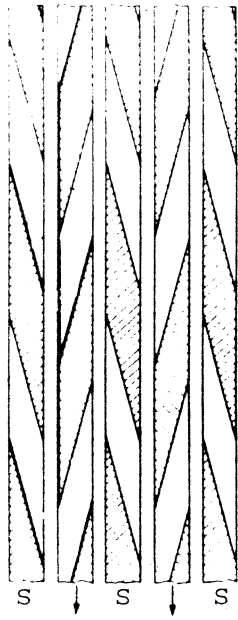


fig. III 19. Rotor- en stator-
schijven zijn spiegelbeeldig.

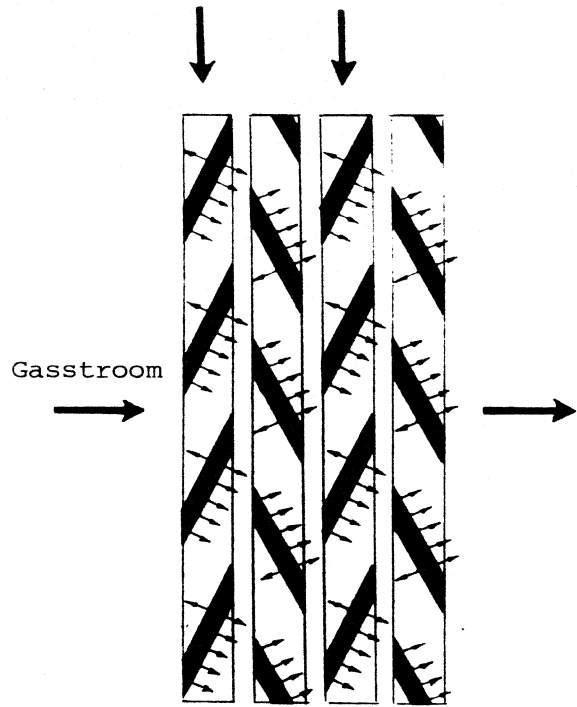


fig. III 20. Pompwerking doordat de
botsingswaarschijnlijkheid met één der
schuine zijden veel groter is dan met
een tegenoverliggende.

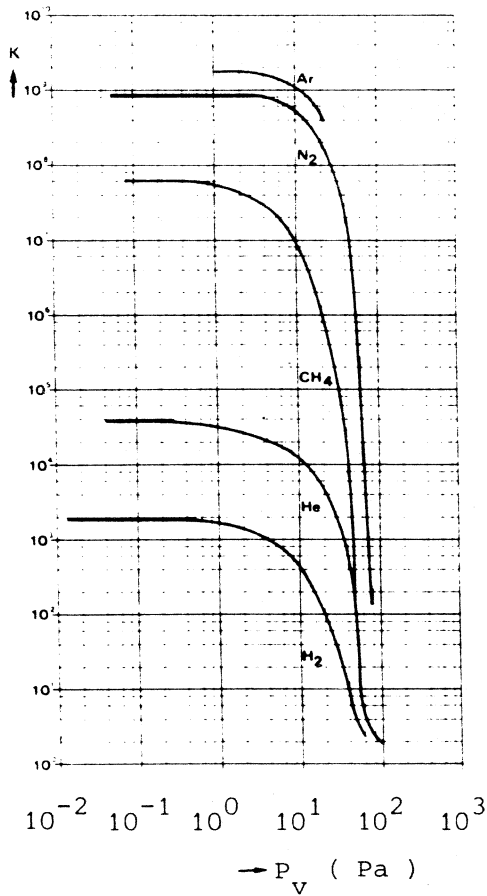


fig. III 21. Compressieverhouding
van de turbopomp voor diverse
gassen

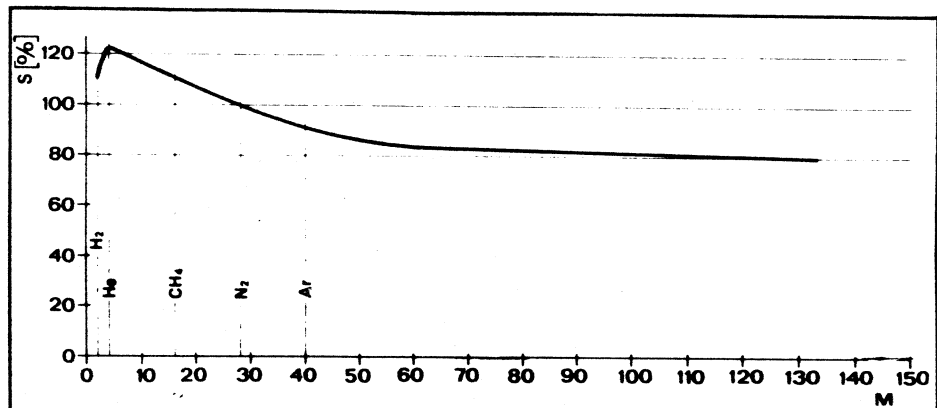


fig. III 22. Pompsnelheid voor diverse gassen

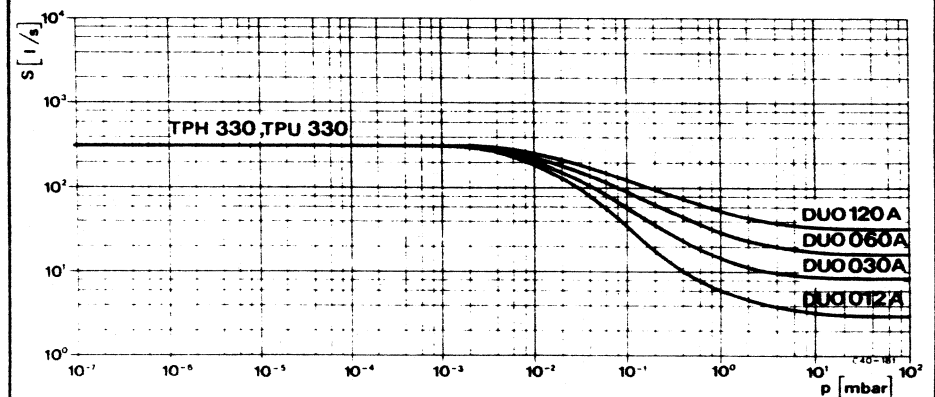


fig. III 23. Pompsnelheid met verschillende voorpompen

Door het aantal schijven achter elkaar is de totale compressieverhouding P_v/P van de pomp toch groot. Een gasmolecuul dat in aanraking komt met de zeer snel bewegende schuine wand van een rotorblad of spleet krijgt hiervan een extra snelheidscomponent in de richting van de voorvacuümzijde van de pomp. Mogelijkerwijs vindt dit gedeeltelijk plaats door een volledig elastische botsing met de wand, waarvan het molecuul dan een klap krijgt. Meer aannemelijk is het dat het molecuul zich een zeer kort moment aan het schuine oppervlak van de schijf hecht en daarvan even later weer vrijkomt met de thermische snelheid. Door de snelheid van de schijf is de botsingswaarschijnlijkheid van de gasmoleculen met de ene schuine wand veel groter dan met de tegenoverliggende wand. Het weer vrijkomen heeft dan een richting gekregen en dat is dan de pompwerking (zie fig. III.20). Doordat de gasmoleculen afwisselend botsen met de schuine kanten in de bewegende- en de stilstaande schijven worden ze van de hoogvacuümkant, door de pomp heen, verplaatst naar de voorvacuümkant. Helaas is dit niet de enige bewegingsrichting van de moleculen. Doordat ze zich door hun eigen thermische snelheid normaal in alle richtingen bewegen, bewegen ze zich ook tegen de pomprichting in terug. Wat de pomp verpompt is dus het gas dat hijzelf verplaatst, minus de hoeveelheid die teruggediffundeert. Wanneer deze beide hoeveelheden precies gelijk zijn is de effectieve pompsnelheid nul geworden en heeft de pomp zijn einddruk bereikt.

De compressieverhouding is een exponentiële functie:

$$K \approx \exp \sqrt{\frac{M}{R \cdot T}} \cdot O \cdot G \quad (3.4)$$

R = de algemene gasconstante,

T = absolute temperatuur,

M = molecuulgewicht van het gas,

G = geometrische factor van de pomp.

Zoals hieruit blijkt is de compressieverhouding voor zware gassen aanmerkelijk groter dan voor lichte, hetgeen overeenkomt met de gemeten waarden (zie fig. III.21). Dit wordt veroorzaakt doordat de thermische snelheid van lichte moleculen veel groter is dan die van zware. Ze zullen dus veel makkelijker teruggediffunderen. Voor stikstof kan een turbopomp een maximale compressieverhouding hebben van een paar maal 10^9 ; voor waterstof

bedraagt die slechts 500 - 2500, afhankelijk van de pomp. Indien het gehele pakket schijven zich in het moleculaire drukgebied bevindt is de compressieverhouding maximaal en onafhankelijk van de druk. Naarmate meer schijven zich, aan de voorvacuümkant, in het laminaire stromingsgebied bevinden, neemt de compressieverhouding snel af. Uit de gegeven functie valt ook af te lezen dat de omtreksnelheid van de rotorschijven van zeer grote invloed is op de compressieverhouding.

De pompsnelheid wordt bij benadering weergegeven door:

$$S \sim O \cdot G \quad (3.5)$$

O = omtreksnelheid,

G = een geometrische factor die de pomp betreft.

Er is in deze evenredigheid geen rekening gehouden met het terugdiffunderen van lichte gassen en het vrijkomen van gassen uit het materiaal van de pomp zelf. Wel blijkt in eerste instantie de pompsnelheid recht evenredig te zijn met de omtreksnelheid van de rotorschijven.

Doordat het geleidingsvermogen van de intrede-opening en de geleiding door de pomp heen voor lichte gassen groter is dan voor zware, worden lichte gassen sneller verpompt dan zware. Zie de grafiek in fig. III.22.

Doordat de compressieverhouding voor lichte gassen echter veel geringer is stelt het verpompen van lichte gassen speciale eisen aan het voorvacuümsysteem. De pompsnelheid van een turbopomp wordt voor verschillende gassen dan ook meestal gegeven in combinatie met een bepaalde voorpomp (zie fig. III.23).

Doordat lichte gassen veel sneller terugdiffunderen dan zware, bestaat het restgas van een goed uitgestookte turbopomp voor 90 à 95% uit waterstof. Zie het restgasspectrum in fig. III.24.

Grotere massa's dan 44 kunnen in het algemeen in het restgas van een schone turbopomp niet worden aangetoond. De pieken in de hogere massa's die in het spectrum toch aanwezig zijn, zijn dan ook twee- en driemaal geïoniseerde metaaldeeltjes afkomstig van de rhenium gloeidraad van de restgasanalysator

fig. III 24.

Restgasspectrum van een
turbomoleculair pomp

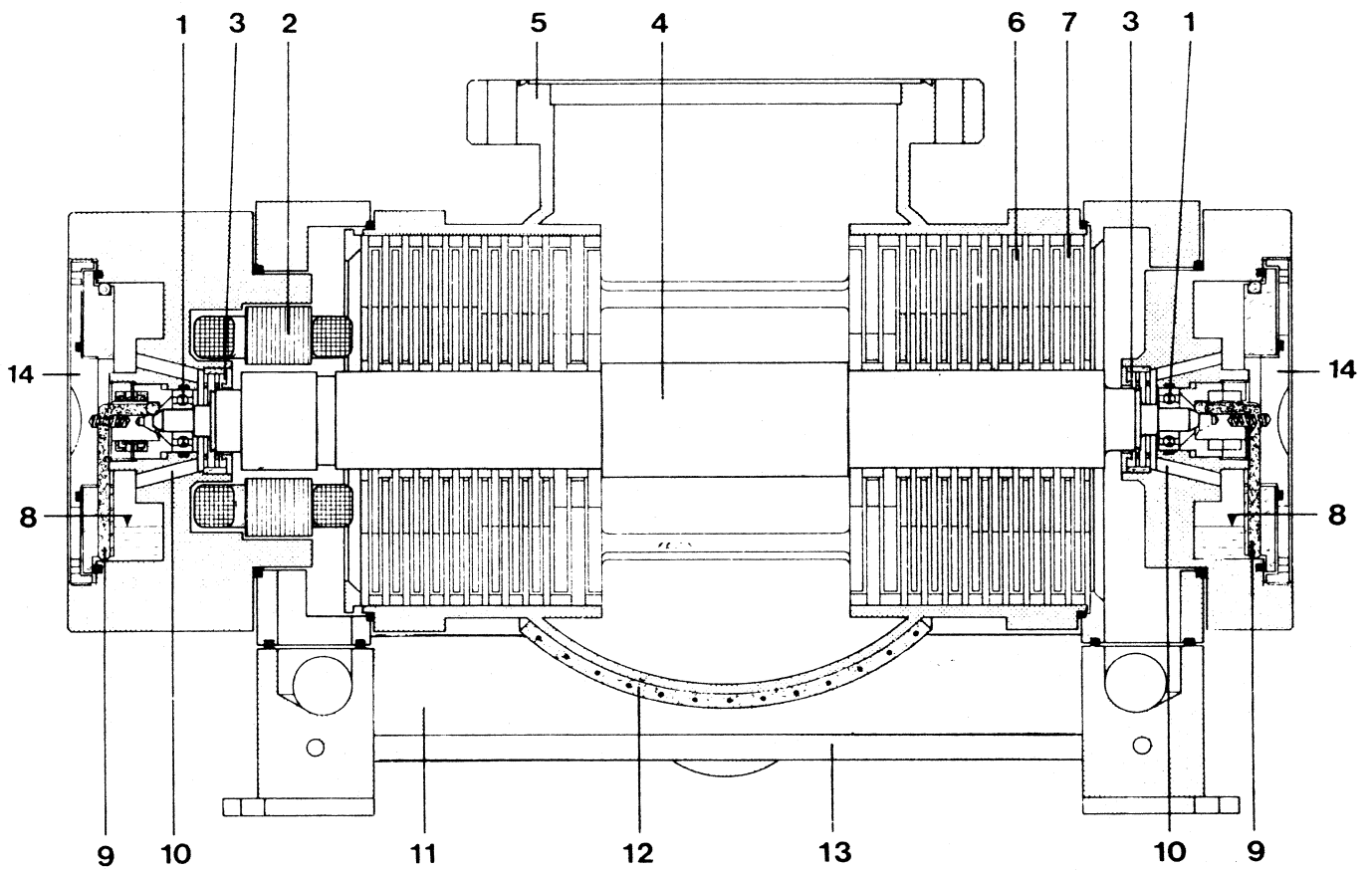
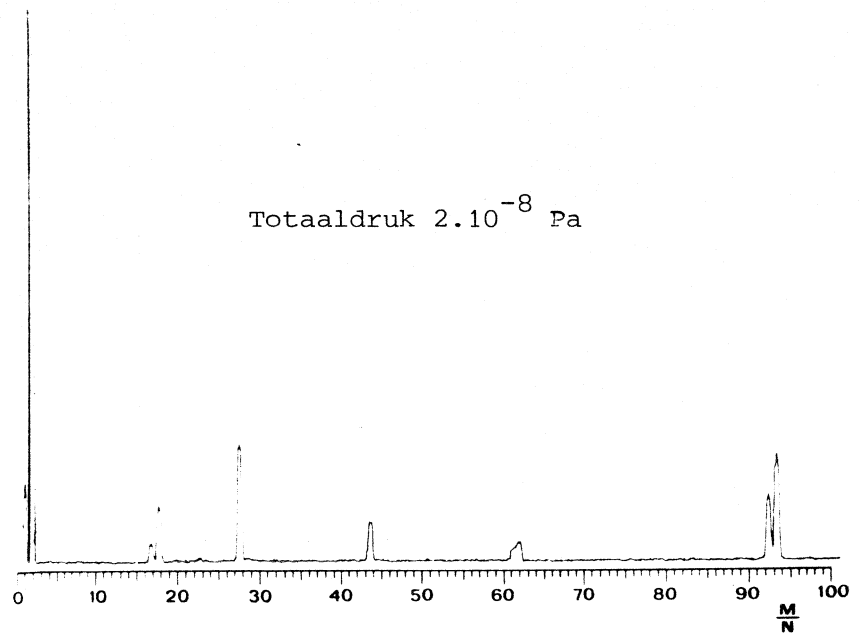


fig. III 25. Turbopomp met horizontale opbouw.

- | | | |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1. lager | 6. rotorblad | 10. olieterugstroom |
| 2. motor | 7. statorblad | 11. voorvacuümkanaal |
| 3. labyrinth | 8. olievoorraad | 12. uitstookmantel |
| 4. rotor | 9. olietoevoer naar | 13. waterkoeling |
| 5. U.H.V.aansluiting | het lager | 14. afsluitmoer |

zelf. Deze pieken zijn te zien doordat de restgasanalysator voor het maken van een spectrum bij een totaal druk van $2 \cdot 10^{-8}$ Pa erg gevoelig moet staan. Van de eigenschap dat de pomp een selectieve werking heeft bij het teruggediffunderen van verschillende gassen kan ook een positief gebruik worden gemaakt. Wanneer bv. schone waterstof in een systeem moet worden ingelaten kan dit in het voorvacuümgedeelte geschieden. De pomp "zeeft" alle ongerechtigheden er uit en laat schone waterstof in het hoogvacuümsysteem toe.

Er zijn turbopompen met een horizontale- en met een verticale opbouw. Bij de horizontale pompen bevindt de hoogvacuümaansluiting zich in het midden en het gecompriëerde gas wordt aan beide zijden door de voorvacuümpomp afgepompt. Eigenlijk staan er dan twee pompen aan weerszijden van de hoogvacuümaansluiting parallel geschakeld. Zie fig. III.25. Bij de moderne pompen bevindt de aandrijfmotor zich in het voorvacuümgedeelte van de pomp zodat er geen draaidoorvoeren naar atmosfeer meer nodig zijn. De lagers bevinden zich aan beide uiteinden van de rotor-as en dus ook allebei in het voorvacuüm.

Er zijn ook pompen met een verticale opbouw. Zie fig. III.26. Ook hier bevindt de motor zich in het voorvacuümgedeelte. De lagering is echter veel moeilijker dan bij de horizontale pomp, omdat die in het algemeen in dit geval niet aan beide uiteinden van de rotor-as gesitueerd kan zijn.

Een lager, dat gesmeerd moet worden, kan natuurlijk niet in het hoogvacuüm worden aangebracht. De consequentie is echter dat het rotorpakket aan één kant niet gelagerd is. Dit stelt nog hogere eisen aan de lagers, ondanks het zeer goede uitbalanceren van het rotorpakket. Mogelijk is dit de reden waarom Leybold Heraeus een enigszins ander model heeft ontworpen. Hierbij zit het bovenste lager in het midden van de rotor (zie fig. III.27). Wel zijn er zeer speciale pompen ontworpen die ook hier weer aan tegemoet komen. Zo is er nu een kleine turbopomp die slechts één kogellager heeft in het voorvacuümgedeelte en die aan de hoogvacuümkant wordt gestabiliseerd door een permanent magneetlager.

Ook zijn er pompen gemaakt die geheel magneetgelagerd zijn en

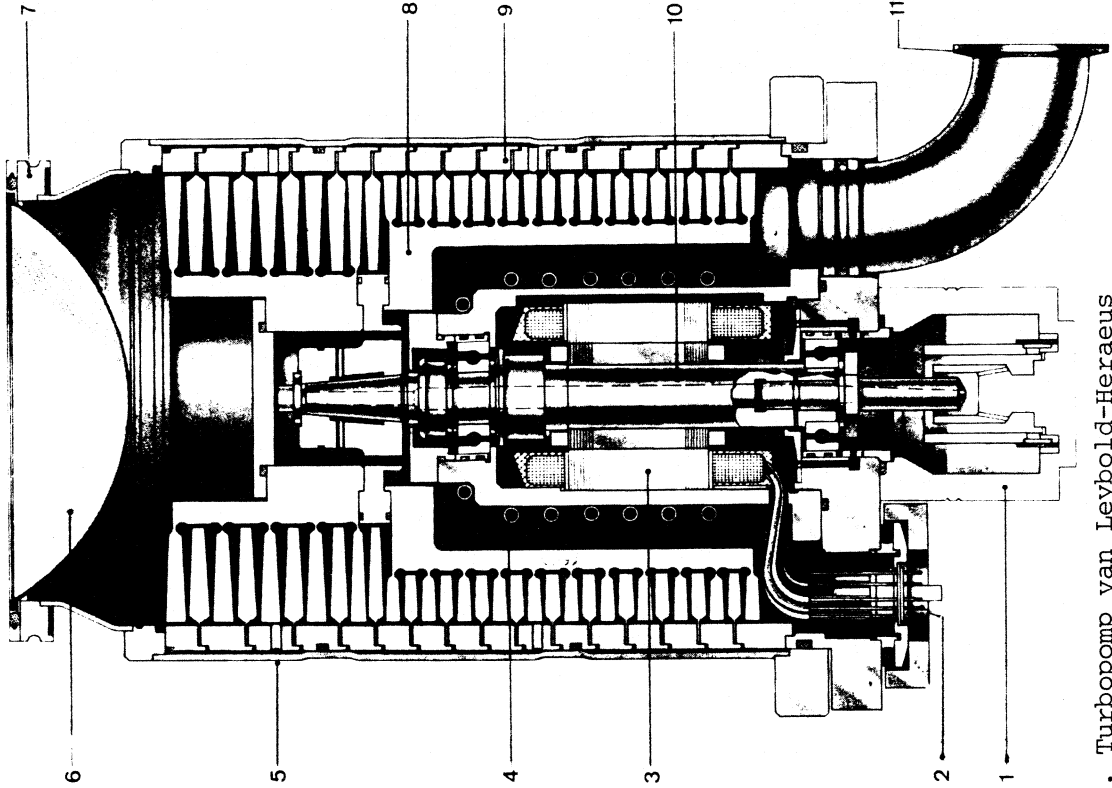


fig. III 27. Turbopomp van Leybold-Heraeus

- 1. olievoorraad
- 2. stroomdoorvoer
- 3. motor
- 4. koelspiraal
- 5. pomphuis
- 6. splinterbeveiliging
- 7. hoogvacuümaansluiting
- 8. rotor
- 9. statorpakket
- 10. motoras met oliepompe
- 11. voorvacuümaansluiting

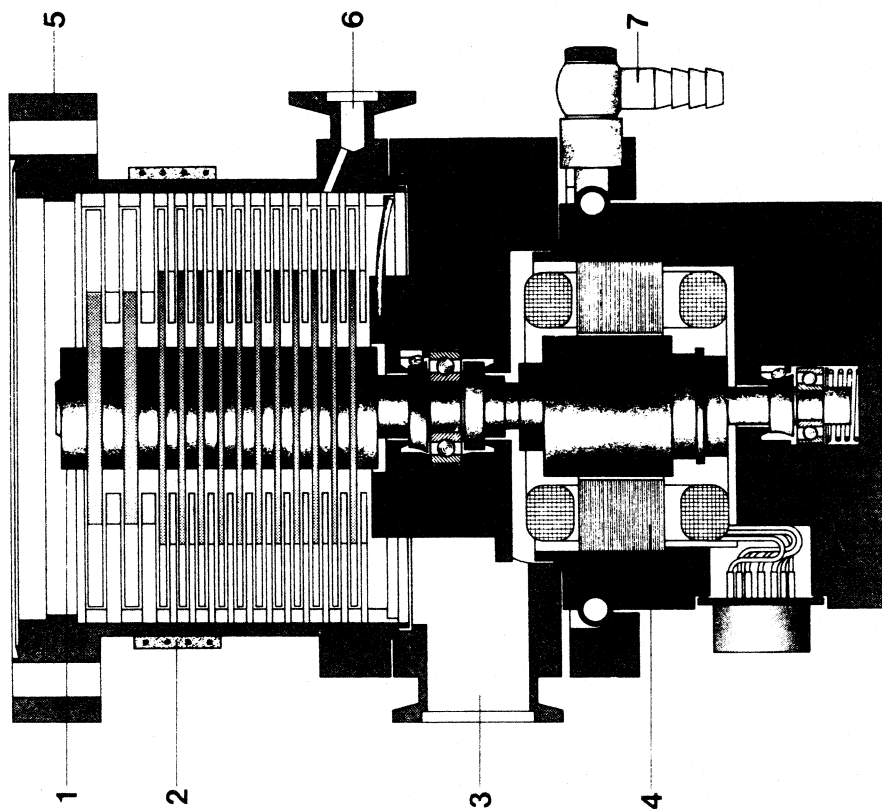


fig. III 26. Turbopomp met verticale opbouw.

- 1. rotor
- 2. uitstookkring
- 3. voorvacuümaansluiting
- 4. motor
- 5. U.H.V. aansluiting
- 6. beluchtingsventiel
- 7. koelwateraansluiting

die, zoals men zegt, volkomen trillingvrij kunnen werken. Er is voor de stabilisatie echter een uitgebreide elektronica nodig die de pomp zeer duur maakt.

Om een zo groot mogelijke pompsnelheid en compressieverhouding te verkrijgen is men het toerental van de rotor steeds meer gaan opvoeren. Op dit moment hebben veel pompen een toerental van 60.000 r.p.m., en de heel kleine pompen bereiken zelfs 90.000 r.p.m. Dat dit aan het materiaal van de rotorschijven en aan de lagers zeer hoge eisen stelt is zonder meer duidelijk. De lagers zijn dan ook van een speciale constructie en de warmte die er in opgewekt wordt moet door water- of luchtkoeling worden afgevoerd.

Hier komen we aan een nadeel van de turbopomp. Het is een mooie, maar ook zeer dure en kwetsbare pomp die verzorging vereist. In het algemeen moet de olie, die zich in het voorvacuümgedeelte van de pomp bevindt, elke 5000 draaiuren worden verversd en elke 10.000 tot 20.000 uur moeten de lagers worden vernieuwd. Dit hangt af van het type pomp. Er zijn echter nog heel andere factoren waardoor de slijtage van geval tot geval sterk kan verschillen; zoals de positie waarin de pomp is gemonteerd en of hij eventueel aan trillingen onderhevig is, enz. Er moet voor de smering altijd een zeer speciale olie worden gebruikt, die natuurlijk in de handleiding van de pomp wordt aangegeven.

Om de pomp te beschermen tegen invallende metaaldeeltjes of glassplinters moet de pomp voorzien zijn van een splinterbescherming, een zeefje dat helaas \pm 15% van de pompsnelheid wegneemt.

Mocht er iets misgaan in de pomp dan beveiligt de splinterbescherming omgekeerd ook de kostbare apparatuur in het vacuümstelsel tegen brokstukken uit de pomp. Soms wordt de splinterbeveiliging weggelaten als de pomp ondersteboven op het systeem kan worden gemonteerd. Er moet altijd een goede beveiliging op de waterkoeling zijn. Bij het wegvallen van de waterkoeling kan de pomp soms automatisch overschakelen op luchtkoeling, maar moet anders worden gestopt. In de meeste gevallen is het dan raadzaam een klep tussen de pomp en het systeem automatisch te laten sluiten en daarna het pompgedeelte te beluchten, nadat natuurlijk ook de voorvacuümpomp is gestopt. Een turbopomp kan

een schoon vacuüm opleveren, dat dus vrij is van koolwaterstoffen. Dit vereist echter een zeer zorgvuldige behandeling. Het beluchten mag niet vanaf de voorvacuümkant geschieden daar eventuele oliedeeltjes dan meegesleurd kunnen worden en de pomp vervuult. Daar automatisch werkende beluchtungskleppen in een uitstookbaar U.H.V.-systeem echter een zeer grote moeilijkheid betekenen is men aan het probleem tegemoet gekomen door een speciale beluchtingsopening op de pomp aan te brengen. Het beluchten vindt dan plaats tussen de schijven in, op een paar schijven van de voorvacuümkant af. Men neemt aan dat zich daat geen oliedeeltjes meer bevinden en er kan toch een simpel beluchtingsventiel worden gebruikt.

Het is het beste als de pomp niet onder vacuüm stil staat, aangezien er dan olie vanuit het voorvacuüm en vanuit de lagers in de pomp en in het systeem kan diffunderen. De pomp heeft een zeer groot inwendig oppervlak; wanneer aan het vacuüm hoge eisen worden gesteld dient de pomp daarom na elke beluchting te worden uitgestookt. Hiertoe is meestal een uitstookmantel om het pomphuis aangebracht. Er dient ook op te worden gelet dat de pomp niet in een magneetveld draait omdat er dan stroompjes in de zeer snel draaiende rotor kunnen optreden waardoor deze door oververhitting teveel gaat uitzetten en de pomp zou beschadigen.

De turbopomp geniet een groeiende belangstelling. Vooral in een tijd waarin het energieverbruik onze aandacht gaat vragen is het belangrijk te overwegen dat de turbopomp voor zijn prestaties vele malen minder energie en koelwater gebruikt dan bijv. met diffusiepompen het geval is. In het algemeen heeft een turbopomp geen omloopleiding. Het systeem wordt dus van atmosferische druk af geëvacueerd door de turbopomp heen. Meestal wordt de turbopomp gelijk met de voerpomp gestart en gaat, naarmate de druk daalt, successievelijk de voerpomp meer meehelpen. Er is dikwijls een beveiliging aangebracht die de pompen weer uitschakelt als de turbopomp niet binnen een bepaalde tijd een bepaald toerental heeft bereikt.

III.1.6. Dampstroompompen

In dampstroompompen wordt het gas verpompt doordat de gasmoleculen botsen met de zware moleculen van een snel bewegende, gerichte, dampstroom. Door de botsingen vindt een impulsoverdracht plaats die de gasmoleculen, boven hun eigen thermische snelheid, een extra snelheidscomponent geven in de richting van de uitblaasopening.

Er is een grote variatie in pompen die werken met allerlei verschillende gas- en dampstromen, zoals de luchtstraalpomp en de stoomstraalpomp. Hieronder valt ook de pomp die reeds genoemd is in combinatie met de waterringpomp.

Omdat in feite het werkprincipe van al deze pompen toch hetzelfde is, zal deze les zich beperken tot het behandelen van de meest gangbare dampstroompompen, nl. de dampstraalpomp, de boosterpomp en de diffusiepomp.

Het enige waarin deze pompen wezenlijk verschillen is het drukgebied waarin ze hun maximale pompsnelheid hebben.

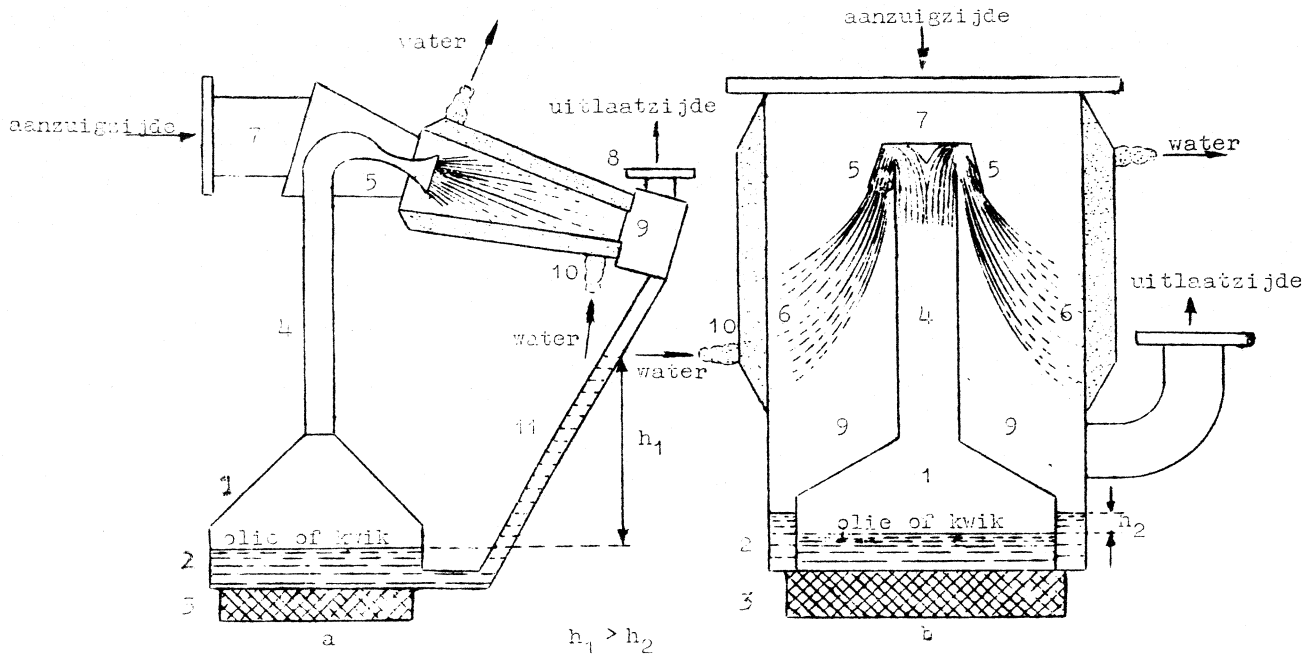
Dampstraalpomp	S_{\max}	bij ± 10 Pa
Boosterpomp	S_{\max}	bij ± 1 Pa - 10^{-2} Pa
Diffusiepomp	S_{\max}	beneden de 10^{-1} Pa

Dampstraalpompen en boosterpompen worden veel in de industrie toegepast. Een kleine boosterpomp wordt soms gebruikt als tussentrap tussen een diffusiepomp en een rotatiepomp.

Werkprincipe

In fig. III.28 wordt het principe weergegeven van de bouw en werking van een dampstraalpomp en een diffusiepomp. De boosterpomp is een tussenvorm en is in feite niets anders dan een smalle diffusiepomp.

In een vat 1 wordt een vloeistof 2 verhit met het verwarmingselement 3. Er vormt zich damp die via de stijgbuis 4 en de speciaal gevormde tuit 5 met grote snelheid in de mengruimte 6 stroomt en daar een dampscherm vormt, dat het leeg te pompen vacuümvat (aangesloten bij 7) en de voorpomp (aangesloten bij 8) van elkaar scheidt. Het dampscherm kan zich slechts vormen indien de druk voldoende laag is, vandaar dat



- | | | |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1 : vat | 5 : uitstroomtuit | 9 : voorvacuüruimte |
| 2 : vloeistof (olie of kwik) | 6 : mengruimte | 10 : koeling |
| 3 : verwarmingselement | 7 : aansluiting recipiënt | 11 : terugstroomruimte |
| 4 : stijgbuis | 8 : aansluiting voorvacuümpomp | vloeistof |

fig III 28. Bouw en werking van een dampstraalpomp en een diffusiepompe.

fig. III 29.

De damp expandeert via een lavaluit.

damp
 druk P_d
 temperatuur T_d
 snelheid W_d

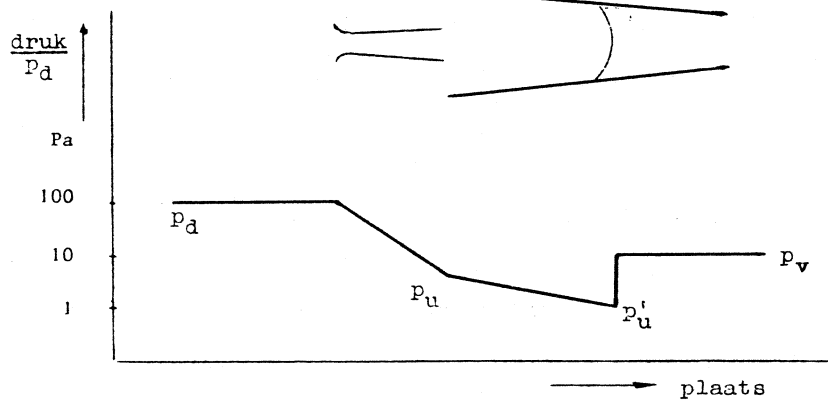
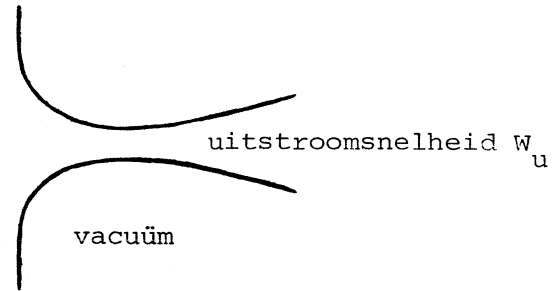


fig. III 30. Drukverloop over en na de lavaluit

in praktisch alle gevallen de dampstroompomp moet worden afgepompt met een van de reeds behandelde voorvacuümpompen.

Het gas, afkomstig uit het vacuümvat, vermengt zich in 6 met de damp en wordt meegenomen naar de ruimte 9 en vandaar weggepompt door de voorpomp. De damp condenseert tengevolge van de koeling 10 en het condensaat stroomt via 11 terug naar 1. De uitstroomtuit 5 is bij de dampstraalpomp meestal cirkelvormig en bij de diffusiepomp ringvormig.

Als vloeistof werd vroeger dikwijls kwik gebruikt. Tegenwoordig is dit in de meeste gevallen vervangen door andere pompvloeistoffen.

Nadere beschouwing

Voor de duidelijkheid wordt in deze les de lavaluit van de dampstraalpomp getekend, omdat die het beste schematisch is weer te geven. In de verdere beschouwing zal echter hoofdzakelijk de diffusiepomp worden genoemd.

De pompende werking wordt voor een groot deel bepaald door de snelheid die aan de gasmoleculen wordt meegedeeld. Daarom tracht men de stroomsnelheid van de dampstroom zo groot mogelijk te krijgen. Dit wordt bereikt door de damp te laten expanderen via een lavaluit. Zie fig. III.29.

In het smalle gedeelte van de lavaluit bereiken de drijfstofmoleculen de geluidssnelheid en bij verder expanderen wordt de snelheid supersonisch.

Nu is daarbij iets vreemds aan de hand. Wanneer de dampdruk vóór de lavaluit bv. 100 Pa is en de voorvacuümdruk is 10 Pa, dan vindt er geen geleidelijk drukverloop plaats van 100 Pa naar 10 Pa, maar door de snelheid gaat de expansie veel verder door, wel tot 1 Pa, en is dan dus veel lager geworden dan de druk in het voorvacuümsysteem. Daarna springt die druk plotse-ling met een verdichtingsstoot omhoog naar de voorvacuümdruk. Het drukverloop over en na de lavaluit is weergegeven in fig. III.30.

Die verdichtingsstoot is een zeer belangrijke aangelegenheid. Als de voorvacuümdruk P_v nl. stijgt, schuift de verdichtingsstoot dichter naar de lavaluit toe. Zie fig. III.31.

Er is een moment dat de verdichtingsstoot nog net de pompwand bereikt. Dan sluit het dampscherm nog net het voorvacuümgedeelte P_V van het hoogvacuümgedeelte P_H af. Als de voorvacuümdruk nog iets meer zou stijgen dan komt de verdichtingsstoot zo dicht bij de lavaluit te liggen dat hij niet meer de pompwand bereikt. Het dampscherm vormt dan geen afscheiding meer tussen P_V en P_H . De pomp werkt niet meer en in het hoogvacuümsysteem gaat de voorvacuümdruk heersen.

De druk waarbij de dampstroom nog net de pompwand bereikt wordt de voorvacuümbestendigheid genoemd. De voorvacuümbestendigheid is dus de hoogste voorvacuümdruk waarbij de pomp nog net werkt.

Omdat voor één dampscherm, die in het moleculaire gebied werkt de compressieverhouding niet zo groot is, en dus de voorvacuümbestendigheid ook erg ongunstig zou liggen, worden er meerdere jets onder elkaar geplaatst. De voorvacuümbestendigheid van een diffusiepomp wordt daardoor ± 50 Pa. De voorvacuümbestendigheid van een dampstraalpomp is groter dan die van de diffusiepomp. We kunnen ruwweg tot het volgende overzicht komen, waarop ook weer uitzonderingen mogelijk zijn:

	Gebied	S_{max}	VV bestendigheid		
dampstroom- pomp	dampstraalpomp	100 Pa - 1 Pa	10 Pa	1000-2000 Pa	afhankelijk v.d. throughput
	boosterpomp	1 Pa - 10^{-2} Pa	1 Pa - 10^{-2} Pa	100 Pa	overbruggend
	diffusiepomp	$< 10^{-1}$ Pa	$< 10^{-1}$ Pa	50 Pa	hangt af van type pomp

Pompsnelheid

Wanneer we uitgaan van het pompmodel van Jaeckel, zie fig. III.32, dan kan de gemiddelde snelheid \overline{W}_d van de dampmoleculen boven het kookbad worden berekend met

$$\overline{W}_d = 4 \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (3.6)$$

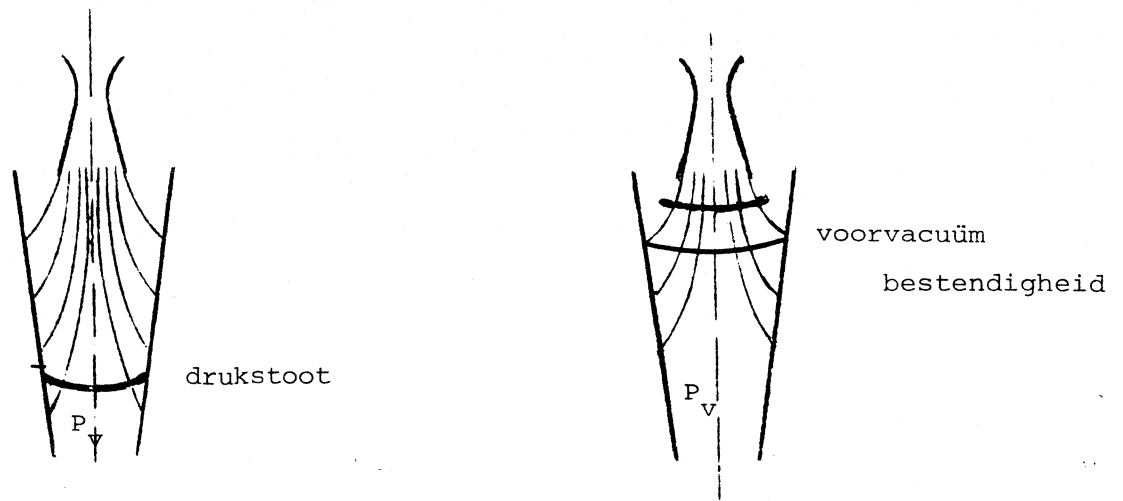


fig. III 31. Bij het stijgen van P_v schuift de drukstoot naar de lavaluit toe.

fig. III 32.

Diffusiepompmodel van Jaeckel

- N_a dichtheid aangezogen gas
- N_g concentratie gas in damp
- N_v dichtheid voorvacuüm

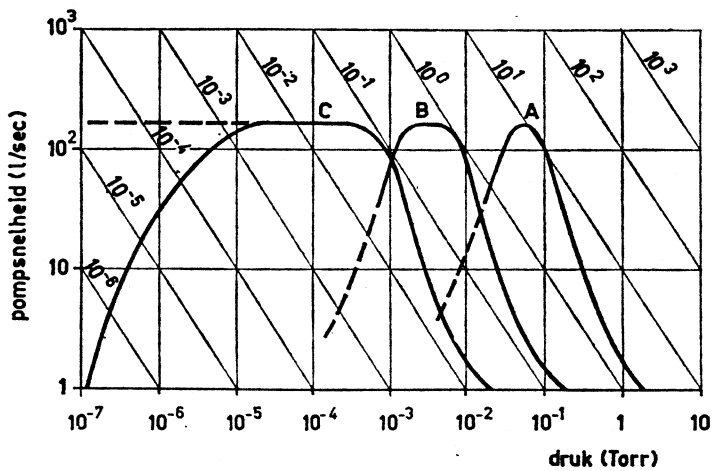
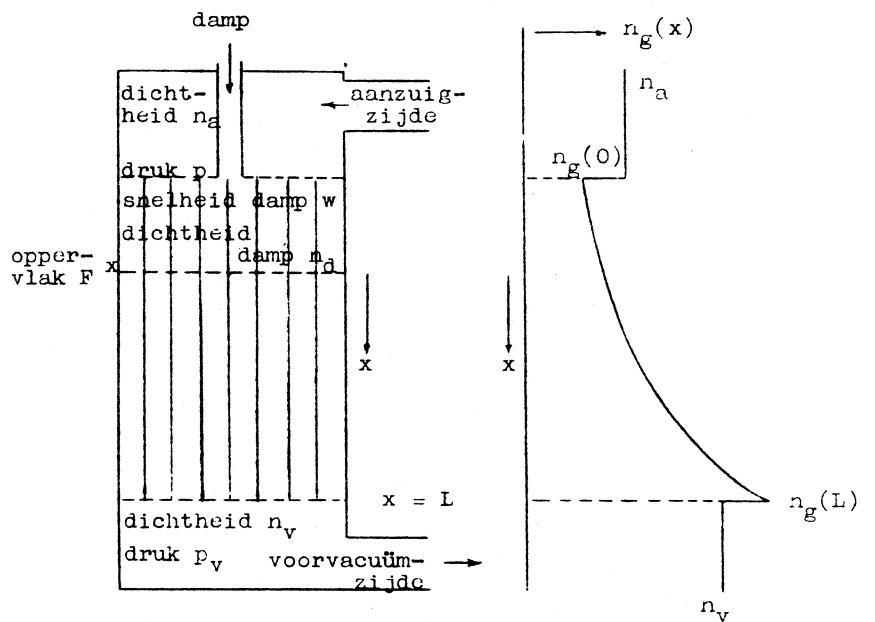


fig. III 33.

Pompsnelheidskrommen van:

- A. dampstraalpomp
- B. boosterpomp
- C. diffusiepomp

De schuine lijnen geven de hoeveelheid verpompt gas weer (throughput) in Torr. l/s

De snelheid W_u die de deeltjes krijgen na de uitstroomopening is hieruit te berekenen met

$$W_u = W_d \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \quad (3.7)$$

Hierin is $\kappa = C_p/C_v$, terwijl C_p en C_v de soortelijke warmten zijn bij constante druk en constant volume.

De pompsnelheid van één enkele trap kan dan worden berekend met:

$$S = \frac{F \cdot V/4}{1 + V/4 \cdot W_u} \left(1 - \frac{P_e}{P}\right) \quad (3.8)$$

Hierin is:

- F Oppervlakte van een dwarsdoorsnede van de dampstroom
- V Snelheid van de gasmoleculen
- W_u Uitstroomsnelheid van de oliedeeltjes
- P_e Bereikbare einddruk
- P de Werkdruk

Als κ voor olie 1,1 is, dan volgt er uit 3.7 dat $W_u = 4,6 W_d$. Indien de pomp werkt met Santovac 5 olie met $M = 446$ en een kookbadtemperatuur van 295°C , dan is met 3.6 de gemiddelde snelheid van de deeltjes in de damp boven het kookbad te berekenen op 164,2 m/s. Na expanderen via de lavaluit wordt de snelheid dan 755,5 m/s.

De snelheid van lucht van 20°C kan met 3.6 worden berekend op 462 m/s. De pompsnelheid per oppervlakte-eenheid S/F kan dan met 3.8 worden berekend en blijkt in dit geval 10 l/s cm^2 te zijn.

Uit 3.8 blijkt ook dat de maximaal bereikbare pompsnelheid, dus als W_u oneindig groot is, gelijk is aan

$$S_{\max} = F \cdot V/4 \quad (3.9)$$

Nu we de snelheid van lucht weten begrijpen we dat de maximale pompsnelheid daarvan nooit groter kan zijn dan $11,6 \text{ l/s cm}^2$ omdat alle moleculen die aan de bovenzijde worden aangeboden dan verpompt worden. Het aanbod van lichte moleculen, die veel sneller zijn, is groter, zodat die ook sneller verpompt kunnen worden. Helaas is de maximale specifieke pompsnelheid nooit te bereiken.

Ho_factor

De snelheid W van de damp van het drijfmiddel is natuurlijk niet oneindig groot; bovendien zullen door allerlei botsingen ook gasdeeltjes terug worden gekeerd. De verhouding tussen de werkelijke pompsnelheid S en de theoretisch maximaal bereikbare pompsnelheid S_{\max} wordt de coëfficiënt van Ho genoemd, dus

$$Ho = \frac{S}{S_{\max}}$$

De coëfficiënt van Ho is dus altijd kleiner dan 1. De pompsnelheid wordt dan $S = Ho \cdot S_{\max}$ of

$$S = Ho \cdot F \cdot V/4 \quad (3.10)$$

De_compressieverhouding

De compressieverhouding P_V/P_e is een exponentiële functie en kan bij benadering worden weergegeven met

$$\frac{P_V}{P_e} \approx \exp.N_d W/D_o L \quad (3.11)$$

Hierin is:

- N_d de dampdichtheid van de dampstroom
- W de snelheid van de dampdeeltjes
- D_o de diffusiecoëfficiënt voor het te verpompen gas
- L de lengte van de dampstroom

Daar deze functie exponentieel is blijkt er uit dat, indien de dampdichtheid en de snelheid van de dampstroom zou afnemen, dit een heel grote invloed heeft op de compressieverhouding. Bij de pompsnelheid is dat in veel mindere mate het geval.

Ook de diffusiecoëfficiënt van het te verpompen gas is bij de compressieverhouding van grote invloed. Met andere woorden: Ook een diffusiepomp heeft voor een licht gas, bv. waterstof, een veel geringere compressieverhouding dan voor een zwaar gas, omdat dat makkelijker door de pomp teruggiffundeert.

Wel steekt de diffusiepomp, wat dat betreft, altijd nog gunstig af bij de turbopomp.

Throughput

De throughput is de hoeveelheid gas die de pomp op een gegeven moment verplaatst. Het is dus de hoogvacuümdruk maal de pompsnelheid op dat moment. Als de pompsnelheid gelijk blijft, is de throughput bij een druk van 10^{-2} Pa dus 10 maal zo groot als bij een druk van 10^{-3} Pa.

Bij het vacuümpompen van een systeem kan de throughput een belangrijke rol spelen op het moment dat de diffusiepomp bij een hoge druk begint te werken. De throughput kan dan zo groot zijn dat de voorvacuümpomp het niet kan bijbenen en de voorvacuümbestendigheid tijdelijk wordt overschreven. De vorm van de dampschermen wordt dan verstoord en er kan oliedamp vanuit de diffusiepomp in het hoogvacuümsysteem geraken. Het langzaam openen van de hoogvacuümklep boven de diffusiepomp remt de gastoevoer een beetje af waardoor de moeilijkheid kan worden opgelost. Zie voor pompsnelheidsgrafieken en throughput fig. III.33.

Terugstroom van damp

Afgezien van het zoëven vermelde euvel heeft zowel kwik als olie altijd een geringe terugstroom in de richting van het hoogvacuüm. Daarom wordt meestal boven de pomp een gekoeld baffle aangebracht. Zo'n baffle kan diverse modellen hebben. Bij oudere typen pompen zal dit dikwijls het chevronbaffle zijn, zie fig. III.34.

Het baffle is optisch dicht, zodat geen enkel deeltje rechtstreeks het vacuümvat kan bereiken, maar altijd eerst met een gekoelde wand moet botsen, waarop het zich kan hechten. Zo'n baffle neemt echter helaas bijna de helft van de pompsnelheid weg.

Voor kwik, dat ook bij die baffletemperatuur nog een te hoge dampspanning heeft, moet het baffle nog worden gecombineerd met een diepgekoelde val. Dit is ook een optisch dicht systeem, dat gekoeld wordt met vloeibare lucht of stikstof. De diepgekoelde val mag niet direct boven de pomp geplaatst worden omdat het kwik zich daaraan vasthecht en na verloop van tijd zich niet voldoende kwik meer in de pomp bevindt.

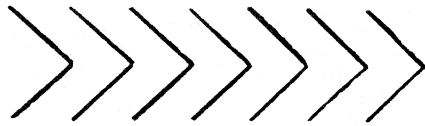


fig. III 34.

Schematische voorstelling van
het oude chevronbaffle.

fig. III 35.

Zelffractionerende drietraps
diffusiepomp.

1. loop van de olie over de hete bodem
2. verwarming
3. stijgbuizen voor oliedamp
4. topjet
5. kookbad met olie

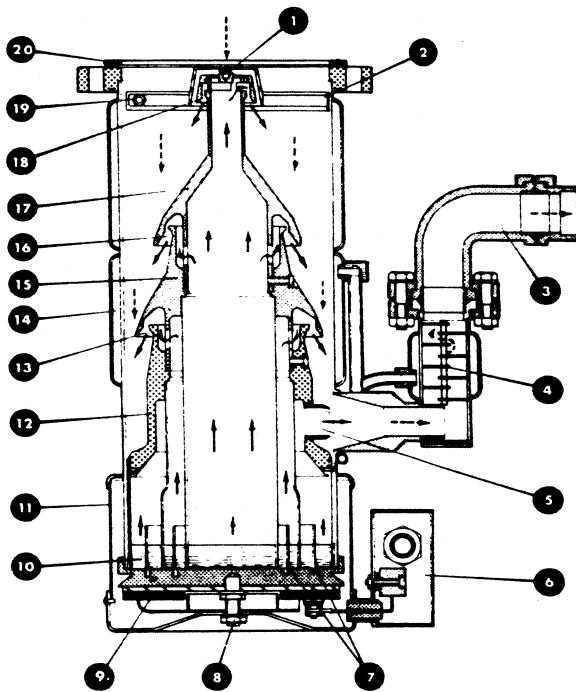
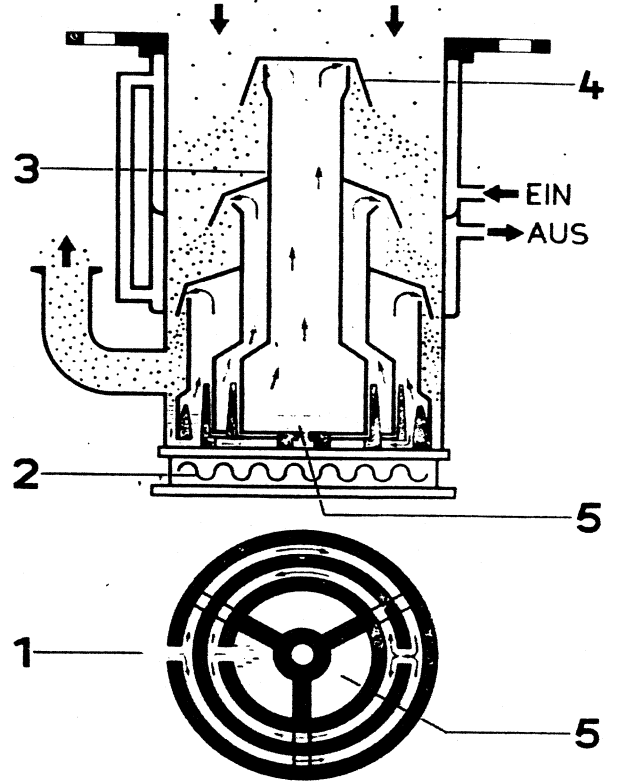


fig. III 36.

Diffusiepomp met dampstraaltrap (5)

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Top jet retaining spring 2. Guard ring 3. Backing connection 4. Condenser baffles 5. Ejector jet nozzle 6. Terminal Box 7. Separator rings 8. Heater securing nut 9. Heater 10. Working fluid | <ol style="list-style-type: none"> 11. Radiation shield 12. 3rd and 4th stages 13. Lower jet nozzle 14. Cooling water jackets 15. 2nd stage 16. Centre jet nozzle 17. 1st stage 18. Top jet nozzle 19. Hexagonal adjusting screw 20. Vacuum inlet sealing 'O' ring |
|---|--|

Ontwikkeling van de diffusiepomp

Toen op 25 september 1913 dr. Wolfgang Gaede bij het Deutsche Patentamt een instrument tot evacuëren aanbood, was in feite de diffusiepomp geboren. Sedertdien heeft hij een enorme ontwikkeling doorgemaakt.

Aanvankelijk werkte de diffusiepomp met kwik. Pas omstreeks 1929 kwamen er ook pompen die olie als drijfmiddel hadden. Het is begrijpelijk dat een vloeistof met een groot molecuulgewicht werd gekozen omdat een zwaar molecuul bij een bepaalde snelheid een grotere impuls aan het restgas kan medelen dan een licht molecuul. Van kwik is $M \approx 201$. Bovendien heeft kwik het voordeel van een hoge chemische bestendigheid en een eventuele verontreiniging van het systeem met kwik kan makkelijk worden verholpen door verwarming. Een groot nadeel is echter de hoge verzadigde dampdruk bij kamertemperatuur, $\pm 10^{-1}$ Pa, en de giftigheid van kwikdamp, waardoor er niet alleen een diepgekoelde val boven de diffusiepomp moet worden gebruikt, maar eigenlijk ook in de voorvacuümleiding om te verhinderen dat kwikdamp in de rotatiepomp komt en verder in de buitenlucht zou geraken.

Er is dus gezocht naar andere pompvloeistoffen die aan de volgende eisen moeten voldoen:

- a. een lage verzadigde dampdruk bij kamertemperatuur
- b. snelle toeneming van de dampdruk bij verhoging van temperatuur (het moet makkelijk kunnen verdampen in de pomp)
- c. een goede chemische stabiliteit
- d. een groot molecuulgewicht.

Op het moment zijn er zeer goede pompoliën. Enkelen er van zijn:

Apiëzon oliën: Goede resultaten; kunnen echter niet tegen luchtinbreuk (oxidatie).

Siliconen oliën: Zeer goede vacuümeigenschappen. Geven echter isolerende lagen op wanden en elektroden, waardoor bv. oplading kan ontstaan.

Convalesc 10 of Santovac 5: Zeer goede vacuümeigenschappen. Het is echter erg duur en vereist een hoge boilertem-

peratuur. Het kan in gekraakte toestand de huid irriteren.

Er zijn uiteraard nog vele andere goede pompoliën.

Natuurlijk moesten de diffusiepompen bij deze andere vloeistoffen worden aangepast. Het is bv. in deze vloeistoffen, met een soms zeer ingewikkelde chemische structuur, mogelijk dat er moleculen kraken. Zo kunnen er componenten ontstaan met een hoge dampspanning en dus met veel minder goede vacuümtechnische eigenschappen.

Zelffractionerend. Om deze reden heeft men de zelffractionerende pomp gemaakt. Zie fig. III.35.

De olie komt langs de buitenwand onderin de pomp aan, maar kan nu niet vrij het hete oliebad instromen, maar wordt door kleine, tegenover elkaar liggende, poortjes gedwongen in meandervormige bewegingen over de hete bodem te stromen. Daarbij kunnen componenten met een hoge dampspanning en in de olie opgeloste gassen vrijkomen en komen dan in de onderste jets van de pomp terecht. Ze blijven dus aan de voorvacuümkant. De olie wordt bij zijn tocht over de bodem dus gereinigd en zo schoon mogelijke olie bereikt tenslotte het centrum van de bodem en voedt vandaar de topjet, dus de jet die aan de hoogvacuümkant zit. Door dit systeem wordt het bereikbare eindvacuüm van oliediffusiepompen aanmerkelijk verbeterd.

Zelfreinigend. Ook vermindert men wel de koeling van het onderste gedeelte van de pompwand, zodat de olie beneden de onderste trap gedwongen wordt langs een warme wand te stromen, waarbij de vluchtigste delen door de voorpomp kunnen worden afgepompt. Dit noemt men zelfreinigend.

Voorvacuümbestendigheid. Om de voorvacuümbestendigheid zo groot mogelijk te maken heeft men de diffusiepomp meestal uitgevoerd met een soort dampstraaltrap; een zijblaastuitje bij de voorvacuümaansluiting van de pomp. Zie fig. III.36.

De olie die ter plaatse op de gekoelde wand in het conische buisje condenseert moet echter tegen de dampstroom van het zijblaastuitje in, teruglopen. Dit gebeurt soms met kleine hoeveelheden tegelijk. In deze olie zitten ook gassen opgelost die plotseling vrijkomen als het golfje olie in het hete oliebad terechtkomt.

Drukstoten. Dit kan drukstoten veroorzaken die zich voortzetten tot in het hoogvacuüm. Daarom zijn niet alle diffusiepompen met zo'n zijtuit gemaakt. Er zijn trouwens nog veel meer oorzaken van drukstoten. Het kan zijn dat de olie eruptief kookt, dus niet rustig verdampt. Ook kunnen er koude druppeltjes, van olie die op het gekoelde baffle boven de pomp is gecondenseerd, op de hete topjet vallen. Het daarin opgeloste gas komt plotseling vrij en pats, daar is weer een huilende onderzoeker die niet begrijpt waar die drukstoot in zijn vacuüm vandaan kwam. Natuurlijk probeert men al deze moeilijkheden op te lossen.

Koelkapje. Zo heeft men nu dikwijls een gekoeld kapje boven de hete topjet. Meestal is zo'n kapje van een metaal met een goede warmtegeleiding en staat het in contact met de gekoelde buitenwand van de pomp. Bij grote pompen kan het ook een aparte waterkoeling hebben. Deze kapjes zijn ook zeer goed om de olieterugstroom te reduceren. Een gewoon kapje houdt reeds 90-95% van de, in de richting van het hoogvacuüm stromende, dampdeeltjes tegen. In vele gevallen is dit reeds voldoende en is er geen baffle meer nodig.

Mexican hat. Indien hogere eisen gesteld worden kan de Mexican hat worden toegepast. Dit is een koelkapje met een horizontale rand er onderaan. De oliedampdeeltjes worden hierdoor zeer effectief tegen gehouden.

Het koelkapje en de Mexican hat geven veel minder reductie van pompsnelheid dan het ouderwetse baffle.

reductie baffle	<u>+</u> 45%
reductie Mexican hat	<u>+</u> 34%
reductie koelkapje	<u>+</u> 10%

Zwangere pomp. Varian is begonnen de pompsnelheid te vergroten door de oppervlakte van het pompende dampscherm relatief te vergroten in de zg. zwangere pomp. Zie fig. III.37

Diffstak. Edwards heeft tenslotte met succes allerlei positieve eigenschappen weten te verenigen in de Diffstak. Zie fig. III.38. Men heeft hierbij het model van de zwangere pomp nog wat overtrokken, waardoor er ruimte kwam voor een vreemd grote topjet. Door deze grote topjet is het bovenste

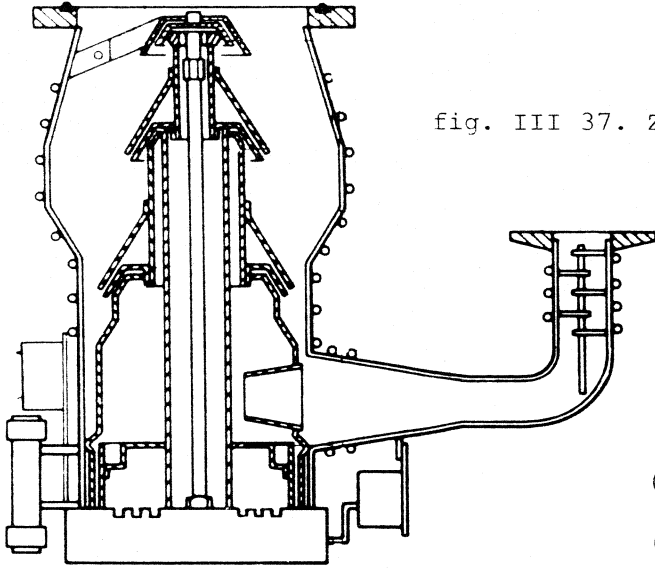
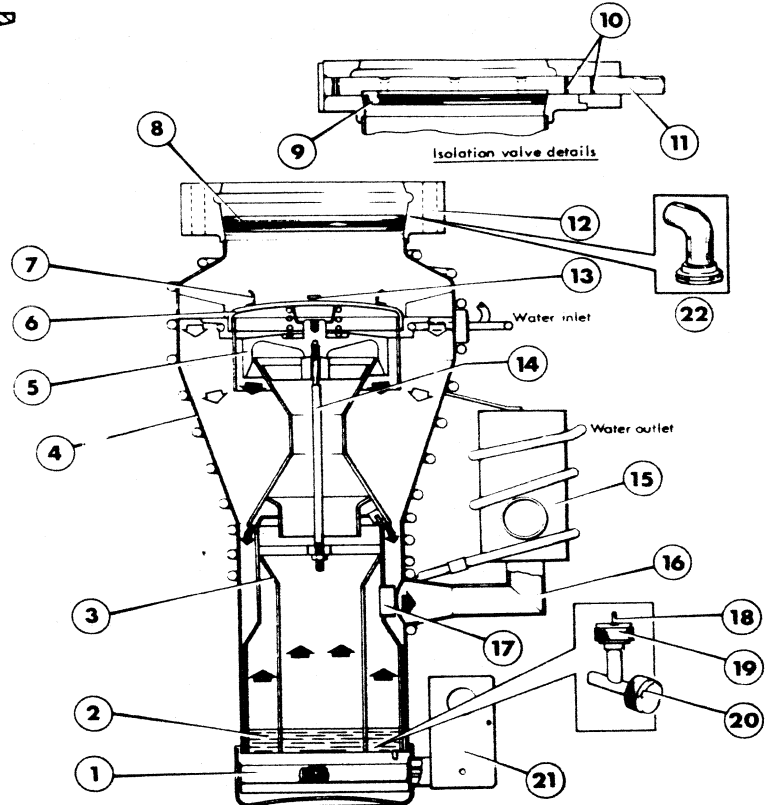


fig. III 37. Zwangere pomp

fig. III 38.
Edwards Diffstak



- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. Cartridge heater | 12. Inlet flange |
| 2. Boiler fluid | 13. Retaining strap |
| 3. Vapour tube assembly | 14. Tie rod |
| 4. Pump body | 15. Condenser |
| 5. 1st stage jet assembly | 16. Backing tube |
| 6. Baffle cap | 17. Ejector jet tube |
| 7. Extractor grips | 18. Dipstick |
| 8. Isolation valve | 19. Fluid filler connexion |
| 9. Valve plate | 20. Drain connexion |
| 10. 'O' rings | 21. Terminal box |
| 11. Valve spindle | 22. Roughing connexion |

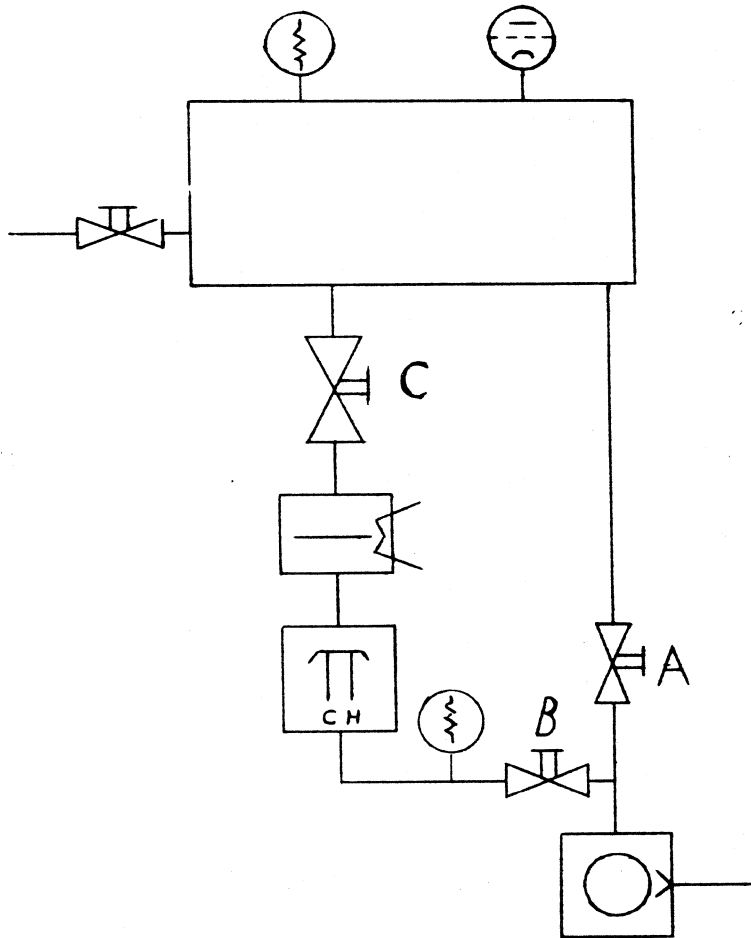


fig. III 39.
Basisschema van een diffusiepompsysteem.
A. omloopklep
B. voorvacuümklep
C. hoogvacuümklep

dampscherm veel dichter geworden waardoor de compressieverhouding voor lichte gassen is vergroot. Dit maakt het mogelijk met deze pomp, waar het met water gekoelde baffle is ingebouwd, tot in het gebied van de 10^{-8} Pa te komen. Deze pompen worden thans ook geleverd met een ingebouwde hoogvacuümklep, maar dan is de einddruk minder laag door de beperkingen van de klep. Dit soort pompen wordt thans ook geleverd door Leybold-Heraeus en door Alcatel.

Energie en koelwater. Bij alle voordelen die de diffusie-pomp ons biedt aan bedrijfszekerheid, pompsnelheid en compressieverhouding, is een groot nadeel gebleven. De diffusie-pomp gebruikt bv. in vergelijking met de turbopomp veel energie en koelwater.

Werken met de diffusie-pomp

Fig. III.39 geeft een basis schema voor een diffusie-pomp-systeem.

Start. Strikt genomen dient eerst de rotatiepomp, met A en B gesloten, gedurende een half uur warm te draaien.

Door A en B te openen worden vacuümvat en diffusie-pomp ge-evacueerd. Op een warmtegeleidingsmanometer kan de druk worden afgelezen. Wanneer een druk van ± 10 Pa is bereikt wordt A gesloten en kan de verwarming van de diffusie-pomp worden aanzet. Het opwarmen duurt ongeveer 20 min.

Tijdens het opwarmen of afkoelen van de diffusie-pomp dient de hoogvacuümklep C altijd gesloten te zijn omdat een niet pompende hete diffusie-pomp oliedamp in het hoogvacuümvat geeft. Als de pomp op temperatuur is wordt B gesloten en A weer geopend tot de voorvacuümmeter op het vacuümvat een druk aanwijst van ± 1 Pa. Daarna A weer sluiten, B openen en langzaam C openen.

Een plotseling stijgen van de voorvacuümdruk P_{vv} bewijst dat de diffusie-pomp veel gas verplaatst. Oppassen dat hierbij niet de voorvacuümbestendigheid wordt overschreden! De voorvacuümmeetbuis op het vacuümvat moet nu snel zijn laagste stand bereiken. Nu kan de hoogvacuümmeetbuis worden gestart en het systeem werkt.

Bij het werken met een diffusiepompstelsel is het zeer belangrijk dat geen lucht in de hete diffusiepomp kan komen. Bij het beluchten van het vacuümvat via D, dienen dus altijd A en C gesloten te zijn. Voor het weer evacueren van het vat dient B te worden gesloten omdat anders via A en B de lucht

Oliedeeltjes in het hoogvacuümstelsel zijn dikwijls omhooggediffundeerd vanuit de rotatiepomp. Het verdient aanbeveling, zeer zeker bij het gebruik van kwik of Santovac 5, om een forelinetrap in de voorvacuümleiding aan te brengen. De vulling van aluminiumoxyde balletjes of zeolith daarin moet dan de oliedamp uit de rotatiepomp tegenhouden. Afhankelijk van de gebruiksomstandigheden dient de forelinetrap minstens eens in de 3 maanden van een nieuwe vulling te worden voorzien.

Indien de diffusiepomp aan reiniging toe is kan dit bij het gebruik van kwik of Santovac 5 wel eens problemen geven. Gebruik, vooral bij kwik, een goede afzuiginstallatie. Oude Santovac 5 kan dikwijls nog het beste worden verwijderd met een gewoon heet lodalinesopje en een borstel. Denk er om dat gekraakte Santovac 5 de huid kan irriteren, vooral bij personen met een allergisch gestel. Een laatste reiniging kan zeer goed met Freon TF gebeuren, maar ook met tri of alcohol. Daarna dient het inwendige van de diffusiepomp niet meer met blote handen te worden aangeraakt.

Wenken en beveiligingen

Let er bij het aansluiten van het koelwater op dat de delen aan de hoogvacuümkant het koudst dienen te zijn. Daarom moet het koelwater eerst door het baffle stromen en daarna door de diffusiepomp.

Heeft de pomp een koelspiraal dan dient het water van boven naar beneden door de koelleiding te lopen. Dit principe is helaas niet toe te passen bij pompen die van een koelmantel zijn voorzien omdat de in de koelmantel aanwezige lucht dan niet weg kan en de waterkoeling niet effectief meer werkt. Bij pompen met een koelmantel dient het koelwater dus van beneden naar boven te stromen.

Om het koudste gedeelte toch bovenaan de pomp te krijgen is de koelmantel, vooral bij grote pompen, soms in een bovenste en een onderste helft gesplitst. Eerst stroomt het water dan van beneden naar boven door de bovenste helft en daarna van beneden naar boven door de onderste helft.

Bij uitval van het koelwater of weigeren van de rotatiepomp dient de pompverwarming, en alle eventueel op het vacuümvat aangesloten apparatuur, te worden uitgeschakeld. Indien de hoogvacuümklep elektrisch of pneumatisch kan sluiten dient dit dan automatisch te geschieden.

Bij uitval van electriciteit dient het onmogelijk te zijn dat dit na enige tijd vanzelf weer terugkomt. Wanneer inmiddels het hoogvacuüm is verdwenen zou dit kostbare apparatuur kunnen beschadigen.

Door thermische schakelaars (klixons) op de pomp te plaatsen kan de apparatuur worden beveiligd voor het geval de pomp te heet of te koud mocht worden, dit laatste bv. na doorbranden van het verwarmingselement.

Verder heeft natuurlijk elk systeem zijn specifieke problemen waarop de beveiliging dient te zijn aangepast.

III.2. Opslagpompen

III.2.1. Inleiding

In hoofdstuk I hebben we geleerd dat gasmoleculen zich in meer of mindere mate kunnen hechten aan een vaste stof oppervlak. Dit adsorptie verschijnsel is de basis voor alle opslagpompen. Hierbij wordt dus niet het gas uit het systeem verwijderd, maar op een bepaalde plaats in het systeem permanent of tijdelijk opgeslagen. In hoofdstuk II hebben we gezien dat het aantal deeltjes per tijdseenheid wat een oppervlakte eenheid passeert, gelijk is aan

$$N_a = 1/4 n \bar{v} \quad (\text{III.12})$$

Hierbij is n de deeltjes dichtheid en \bar{v} de gemiddelde snelheid. Deze zelfde formule kan ook gebruikt worden voor het aantal gasdeeltjes wat per tijdseenheid op een wandoppervlakte eenheid aankomt. Gecombineerd met de kans dat zo'n gasmolecuul op het oppervlak blijft kleven, de kleefkans s , levert dit het aantal gasmoleculen dat voor enige tijd uit de gasfase verwijderd wordt:

$$N_a = 1/4 ns\bar{v} \quad (\text{III.13})$$

Verder speelt, zoals in hoofdstuk I beschreven, de kleeftijd een rol (I.15) waardoor III.13 een extra gewichtsfactor toegekend krijgt

$$N_a = 1/4 ns\tau\bar{v} \quad (\text{III.14})$$

Uit hoofdstuk I is bekend dat $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ (I.6) en $n = p/kT$ (I.7). Tevens geldt dat voor de massa van een gasmolecuul geschreven kan worden $m = M/6.02 \times 10^{23}$ (M/N). Als we dit alles samen met I.15 verwerken in formule III.14 dan resulteert dit in

$$N_a = \frac{8.3 \times 10^{22}}{\sqrt{TM}} p s \tau_0 \exp Q/RT \quad (\text{III.15})$$

Met deze betrekking kunnen drie verschillende pomptypen, gebaseerd op adsorptie, beschreven worden.

In geval van lage bindingsenergie Q (fysisorptie) kan een grote verblijfstijd verkregen worden door een lage temperatuur te kiezen. De aangroei van gasmoleculen op het gekoelde opper-

vlak gaat net zolang door tot de bindingsenergie met het oppervlak a.g.v. de te grote afstand, zijn invloed verliest. Dit vindt meestal plaats na ongeveer 6 monolagen. Formule III.15 geldt voor een oppervlakte eenheid, dus door de keuze van een groot oppervlak kan een grote hoeveelheid gas gebonden worden. We spreken daarbij van cryosorptie. In de praktijk worden poreuze materialen gebruikt.

Als de temperatuur zo laag is dat de bindingsenergie van de gasmoleculen onderling een rol gaat spelen krijgen we te maken met condensatie. We noemen dit cryopompen. In geval van een grote bindingsenergie van het gasmolecuul met het oppervlak (chemisorptie) spreken we van getterpompen.

III.2.2. Sorptiepompen

Principe en opbouw

De sorptiepomp berust op het cryosorptie principe. De basis van dit pomptype is een hoeveelheid poreus materiaal met een dusdanig groot poriën oppervlak dat grote hoeveelheden gas opgenomen kunnen worden. Dergelijke materialen zijn actief kool en bepaalde aluminium-silicaten, waaruit het kristalwater door verhitting verwijderd kan worden (zeolieten). Een dergelijk materiaal wordt ook wel een moleculaire zeef genoemd. Het oppervlak van 1 gram actief kool is voor lucht ca. 2500 m^2 . Als we aannemen dat een oppervlak na één monolaag verzadigd is, dan kunnen er $10^{14}/\text{cm}^2$ moleculen geadsorbeerd worden. Dit is dan voor 1 gram actief kool 2.5×10^{21} gasdeeltjes, hetgeen overeenkomt met 0,1 l lucht van 1 atmosfeer bij 20°C . De pompcapaciteit is niet alleen toe te schrijven aan het grote oppervlak. Het is bekend dat bij bestaande openingen in het adsorptiemateriaal, het molecuul uit verschillende richtingen verschillende bindingskrachten ondervindt, hetgeen tevens een bijdrage levert tot de pompwerking.

In principe is een sorptiepomp slechts een pot gevuld met het voornoemde sorptiemateriaal (Fig. III.40), te koelen met vloeibare lucht. Echter het warmtegeleidingsvermogen van zowel actief kool als zeolieten is tamelijk slecht, dientengevolge

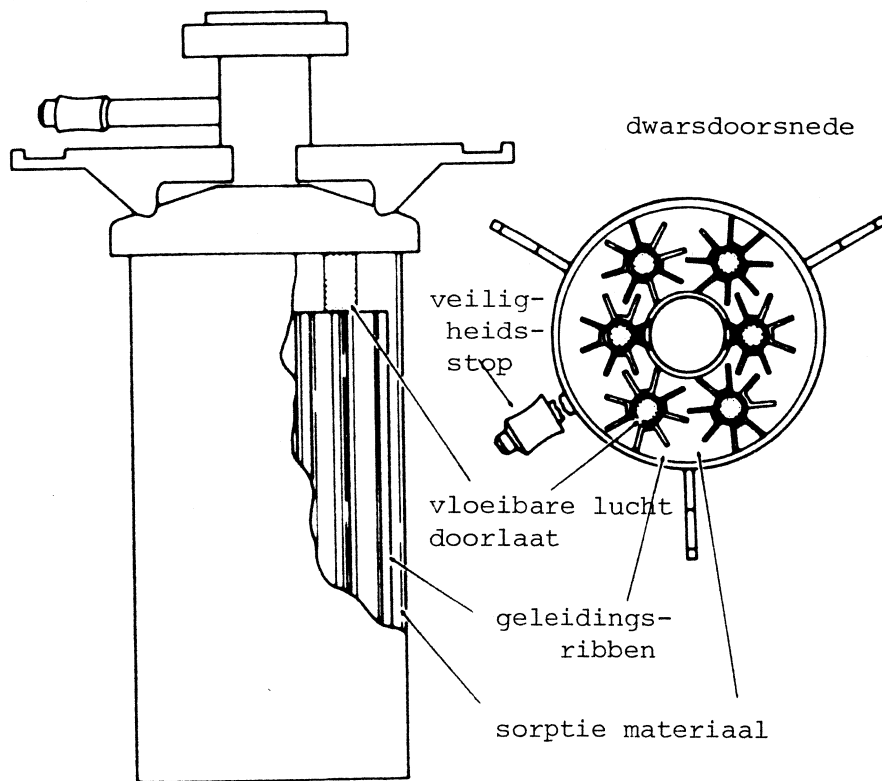


fig. III 40, Sorptiepomp

moeten maatregelen getroffen worden om een optimale warmteoverdracht te verkrijgen. Dit kan bestaan uit voorzieningen zoals schotjes of pijpjes waar de vloeibare lucht doorheen kan of de pomp kan uit een verzameling pijpen opgebouwd zijn, zoals in Fig. III.40 te zien is. Om de pomp kan zowel een dewar als een verwarmingselement geplaatst worden.

Gebruik en eigenschappen

Alvorens de pomp af te koelen tot vloeibare lucht temperatuur, moet het pompmateriaal eerst door verhitting gereinigd worden. Bij opwarmen naar kamertemperatuur na het vorige gebruik heeft een deel van het gas het sorptiemateriaal verlaten. De druk kan daarbij zo hoog oplopen dat de pomp zou kunnen exploderen. Er is dus ook altijd een veiligheidsvoorziening getroffen in de vorm van een kunststof stop. Door verdere verhitting, bij voorkeur tijdens het afpompen met een voorpomp, kan het sorptiemateriaal verder gereinigd worden. Het is noodzakelijk een goede olieval tussen de voorpomp en de sorptie-pomp te zetten, teneinde koolwaterstof vervuiling te voorkomen. In de meeste gevallen is verhitting tot 150°C voldoende, hetgeen met een bijbehorend verwarmingselement gemakkelijk gehaald kan worden. Als de verwarming uitgeschakeld wordt, moet de pomp wel afgesloten worden. Als de pomp vele malen gebruikt en uitgestookt is, zal het kunnen gebeuren dat de pompcapaciteit sterk vermindert. Dit is een gevolg van een toename van het kristalwater wat weer een gevolg is van het pompen van waterdamp uit de omgeving. Dit kristalwater kan echter alleen bij een temperatuur hoger dan 200°C verwijderd worden. Het verdient dus aanbeveling het sorptiemateriaal bij afname van de pompcapaciteit te vervangen of op hoge temperatuur uit te stoken. Dit laatste is meestal niet mogelijk met het bijgeleverde verwarmingselement.

De einddruk die na afkoelen met vloeibare lucht gehaald kan worden hangt af van verschillende factoren. De hoeveelheid gas die maximaal verpompt kan worden blijkt nauw samen te hangen met de heersende druk van dit gas. Een groot deel van de bij hoge druk opgenomen gasdeeltjes kan bij lagere druk weer vrijkomen. Verder geldt ook een selectieve pompwerking. Gassen

met een geringe adsorptiewarmte worden slechts in geringe mate verpompt. De pompcapaciteit voor helium is nagenoeg te verwaarlozen, terwijl de pompcapaciteit voor neon en waterstof gering is. Om in een ruimte van 10 liter de partiële druk van helium te verlagen van de omgevings partiële druk van 4×10^{-1} Pa naar 10^{-2} Pa zou ca. 100 kg zeoliet nodig zijn. De laatst genoemde gassen worden in het hoge druk gebied, waarin de gasstroom nog visceus is, meegesleurd. Bij lage drukken zullen deze gassen weer terug diffunderen.

Deze problemen kunnen voor een groot deel opgelost worden door twee sorptiepompen in serie te laten werken. De eerste pomp wordt afgesloten bij 1000 Pa waar de gasstroom nog steeds visceus is en de tweede pomp die al gekoeld is wordt opengezet. Op deze manier is met enig geduld een druk van 10^{-4} Pa te behalen.

Voor gassen met hoge adsorptie warmte, zoals argon en stikstof, is gebleken dat de pompsnelheid aanzienlijk sneller terugloopt dan verwacht was. De oorzaak is gezocht bij het feit dat het deel van het adsorptiemateriaal wat het gas het eerst ziet snel verzadigd raakt met desorptie als gevolg, terwijl andere delen nog ruimte over hebben. De vrijkomende gasmoleculen kunnen dan zowel terug diffunderen naar het vacuümsysteem als wel opgeslagen worden in de schonere delen van het sorptie materiaal.

Deze pompen zijn niet geschikt om zeer lage drukken mee te behalen. Gewoonlijk worden deze pompen gebruikt om systemen olievrij te kunnen voorpompen teneinde andere pompen te kunnen starten.

III.2.3. Cryopompen

Principe en opbouw

Zoals in de inleiding reeds vermeld kan bij zeer lage temperatuur de bindingsenergie van de gasmoleculen onderling voldoende zijn om condensatie te doen optreden. De basis van een cryopomp is een gekoeld vlak. De druk in een systeem wordt dan bepaald door de dampdrukken van de verschillende gassen

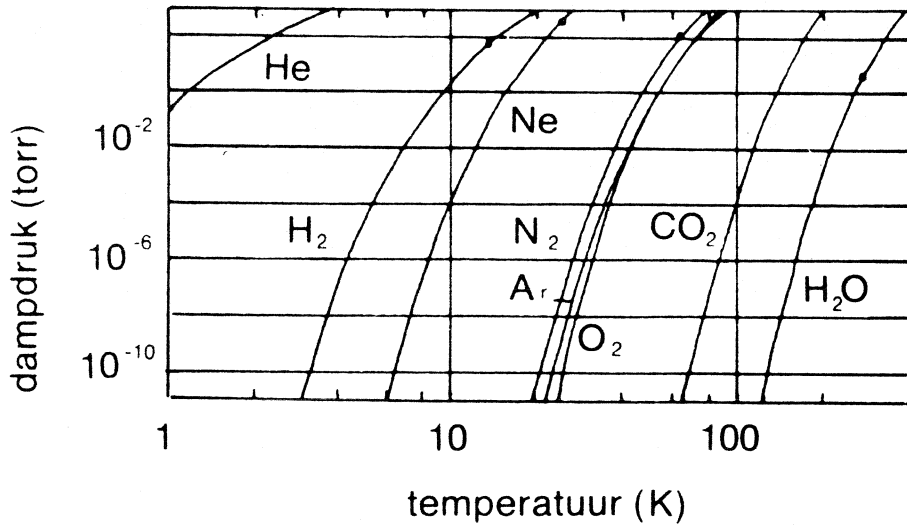


fig. III 41, Dampdrukkrommen van verschillende stoffen.

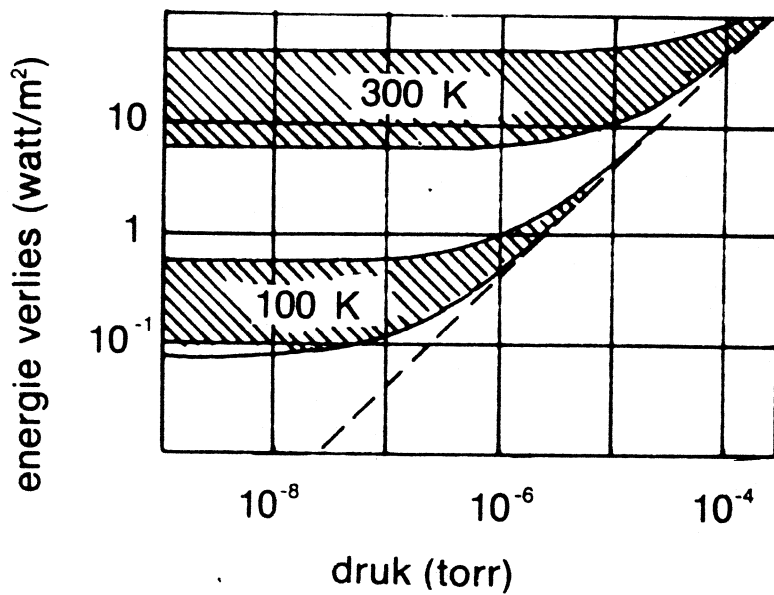


fig. III 42,

Verliezen van een cryopomp door straling (gearceerd) en door warmtegeleiding plus condensatie (gestippeld). De gearceerde vlakken gelden voor respectievelijk een omgeving van 300 K en 100 K. De bovengrens van de gearceerde vlakken geeft de verliezen voor een relatief ruw cryo-oppervlak; de ondergrens voor een extreem glad en schoon cryovlak met een hoge reflectie.

bij de beschikbare temperatuur van het cryovlak. Een cryovlak met een temperatuur van 80 K (vloeibare stikstof) is uitstekend geschikt als waterpomp. Een cryovlak van 20 K is in staat alle gassen behalve neon, helium en waterstof te binden, bij een resterende dampdruk $< 10^{-8}$ Pa (Fig. III.41). Zelfs voor een 4 K oppervlak is het niet mogelijk de heliumdampdruk beneden 1 Pa te krijgen zoals in Fig. III.41 te zien is.

Een 80 K cryovlak is gemakkelijk te realiseren met behulp van vloeibare stikstof. Een 4 K oppervlak is op dezelfde manier te realiseren met behulp van vloeibare helium. Het zal duidelijk zijn dat het koelend vermogen, en dus het heliumverbruik, om de omgevings warmtestraling van 300 K te compenseren aanzienlijk is (Fig. III.42). De stralingsbelasting is evenredig met T^4 , waarbij T de hoogste temperatuur is van de omgevende vlakken. Dit moet door het koude oppervlak opgenomen worden en is een maat voor de hoeveelheid helium die verdampt en dus ook weer vloeibaar gemaakt moet worden. Dit wordt opgelost door het 4 K paneel dusdanig met een 80 K scherm te omhullen dat het 4 K gedeelte optisch afgeschermd is van de 300 K omgeving. Het gas moet deze ruimte dan binnenkomen via chevronachtige constructies (Fig. III.43). Aangezien gasmoleculen dit soort constructies alleen na één of meer botsingen kan passeren is het duidelijk dat de watermoleculen de 4 K ruimte niet binnen zullen kunnen komen. Het 80 K gedeelte werkt dus niet alleen als warmtescherm maar houdt ook het 4 K gedeelte vrij van water. Niet alleen de temperatuur van de omgeving speelt een rol in de cryopomp werking, maar ook de reflectiviteit van het 20 K of 4 K oppervlaktemateriaal. De beste resultaten zijn bereikt na polijsten gevolgd door verzilveren. De warmtebelasting van zowel het 4 K als 80 K gedeelte a.g.v. geleiding is te beperken door de juiste materiaalkeuze en de dikte van het materiaal. De opzet is het koelvermogen optimaal te benutten voor condensatie. Er zijn de laatste jaren koelmachines op de markt gekomen die een temperatuur kunnen bereiken van 20 K. Dit is een tweetrapssysteem wat berust op adiabatische decompressie van heliumgas. De eerste trap heeft een temperatuur van 80 K en kan, mits de tweede 20 K trap niet te zwaar belast wordt, tevens gebruikt worden om het 80 K paneel te koelen. Als dit niet

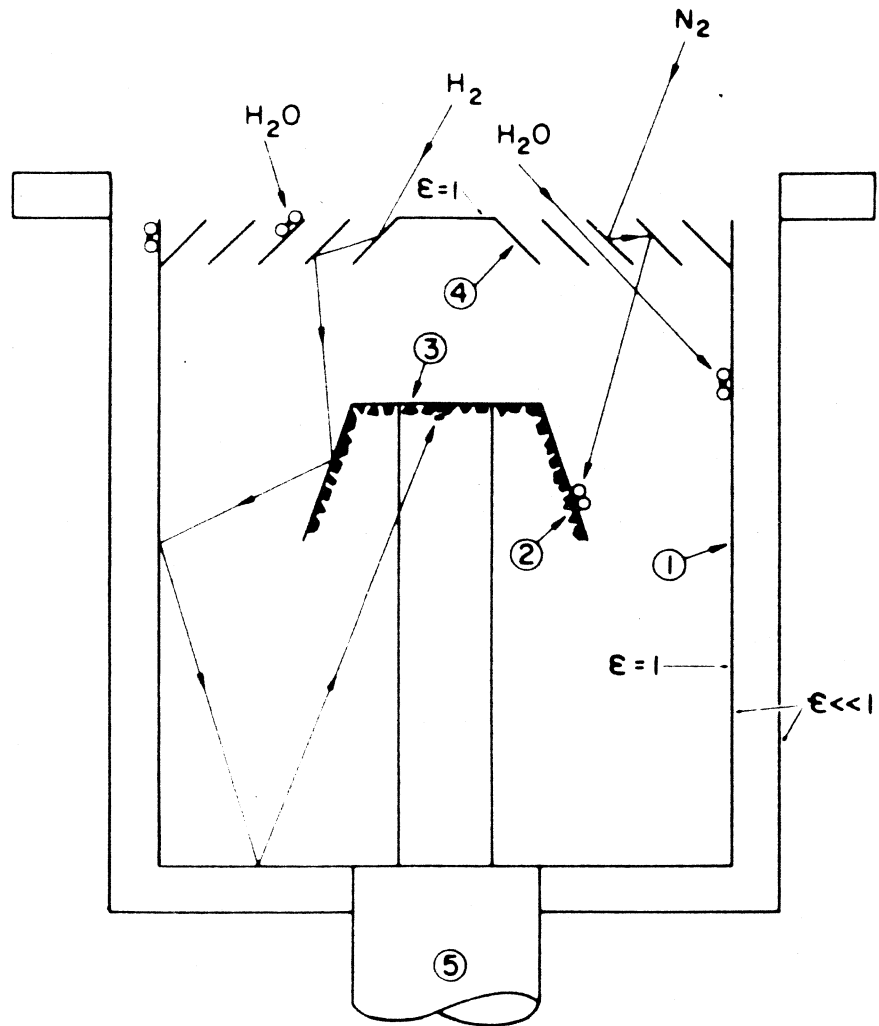


fig. III 43,

Schematische opzet van een cryopomp gekoeld door middel van een tweetraps helium koelmachine.

- 1) 80 K cryovlak, 2) 20 K cryosorptie gedeelte, 3) cryo-condensatievlak, 4) 80 K chevron baffle, 5) aansluiting aan de koelmachine.

mogelijk blijkt dan blijft vloeibare stikstof als alternatief over. Een nadeel van deze koelmachines is, dat de pompcapaciteit voor neon, helium en waterstof gering is bij 20 K, Dit is gedeeltelijk opgelost door voor deze gassen gebruik te maken van het cryosorptie principe. Hiertoe wordt op bepaalde plaatsen (Fig. III.43) actief kool op het 20 K oppervlak gelijmd. De geometrie van het geheel moet dusdanig zijn dat elk gasmolecuul op zijn minst éénmaal met het gewone 20 K oppervlak moet botsen alvorens in staat te zijn het cryosorptie oppervlak te bereiken. Anders zou het cryosorptie oppervlak in korte tijd verzadigd zijn met alle gassen behalve neon, helium en waterstof. De winst in pompvermogen van vornoemde gassen resulteert meestal in een fractie van het pompvermogen van andere gassen.

Het is mogelijk het cryosorptie oppervlak zodanig groot te kiezen dat een betere waterstof pompcapaciteit verkregen wordt. Dit gaat uiteraard ten koste van het overige koelend oppervlak. Gewoonlijk wordt actief kool als cryosorptie materiaal gebruikt. Zeolieten hebben het nadeel van het kristalwater probleem wat alleen bij hoge temperatuur verwijderd dient te worden.

Tenslotte moge opgemerkt worden dat afhankelijk van de bindingsenergie het ene gas een ander eerder verpompt gas kan verdringen.

Gebruik en eigenschappen

In hoofdstuk II hebben we gezien dat het maximum aantal deeltjes wat in het moleculaire stroomgebied een oppervlakte eenheid passeert te schrijven is als $S = 1/4 n\bar{v}$, waarbij n de deeltjes dichtheid is en \bar{v} de gemiddelde deeltjessnelheid. Dit levert omgewerkt voor lucht van 20°C een hoeveelheid van 11,6 l/s cm² op. Als we een cryo oppervlak beschouwen als een zwart gat voor gasmoleculen, mogen we concluderen dat de maximale pompsnelheid 11,6 l/s cm² is. Het is dus mogelijk in situ een vacuüm systeem (op de meest noodzakelijke plaats) te beschikken over een groot pompvermogen.

Ook voor 4 K cryopompen blijft het heliumprobleem een rol spelen. De oplossing hiervoor is het inlaten van argon, wat na condensatie een poreuze laag vormt. Deze poreuze laag ge-

draagt zich als cryosorptie materiaal voor helium. Dit inlaten van argon moet op een speciale manier gebeuren. Het 4 K systeem bestaat uit een vat gevuld met helium, echter een verlaging van het helium niveau zal aanleiding geven tot een lichte temperatuurverhoging in het lege deel van het vat. Dit op zijn beurt veroorzaakt weer desorptie van het geadsorbeerde helium. Argon moet dan ook op een dusdanige manier ingelaten worden dat het alleen aan die delen van het cryopaneel adsorbeert die het langst de laagste temperatuur blijven behouden. Het argon-cryosorptie effect is duidelijk zichtbaar in de snelle drukdaling bij het inlaten.

In principe wordt het pompvermogen nauwelijks bepaald door de dikte van de gecondenseerde gaslagen, hoewel het warmtegeleidings vermogen en de reflectiviteit een rol gaan spelen. De totale hoeveelheid te verpompen gas wordt in principe bepaald door het moment dat de condensaat lagen thermisch contact gaan maken met de omgeving. In de praktijk is de verzadiging van het cryosorptie materiaal, om waterstof, helium en neon te verpompen, de beslissende factor. Aangezien waterstof einddruk bepalend is, geeft de einddruk ook een indicatie van de verzadiging van het cryosorptie gedeelte. De enige oplossing bestaat uit het regenereren van de pomp. Hiertoe is opwarmen tot kamertemperatuur voldoende. Voor 20 K pompen moet er op gelet worden dat alle pompoppervlakken op kamertemperatuur komen, voordat opnieuw afgekoeld wordt. Dit moet zorgvuldig met temperatuurvoelers geregistreerd worden. Het is nl. mogelijk dat bepaalde delen van de pomp, waaronder de actieve koollaag, minder snel opwarmen. Tijdens het opwarmen zal vrijkomende waterdamp van de eerste trap geadsorbeerd kunnen worden op de nog koude oppervlakken van de tweede trap. Vooral voor de actieve koollaag zal dit bij vervroegd afkoelen leiden tot een blokkeren van verdere, waterstof, helium of neon adsorptie. Om ongewenste drukopbouw tijdens het regenereren te voorkomen is de pomp van een veiligheid ventiel voorzien. In het geval dat de 20 K pomp speciaal ontworpen is voor het verpompen van waterstof, kan het nodig zijn om de cryopanelen tot boven kamertemperatuur te verwarmen. Aangezien de warmtegeleiding door gas in het viskeuze stromingsgebied aanzienlijk is, dient de

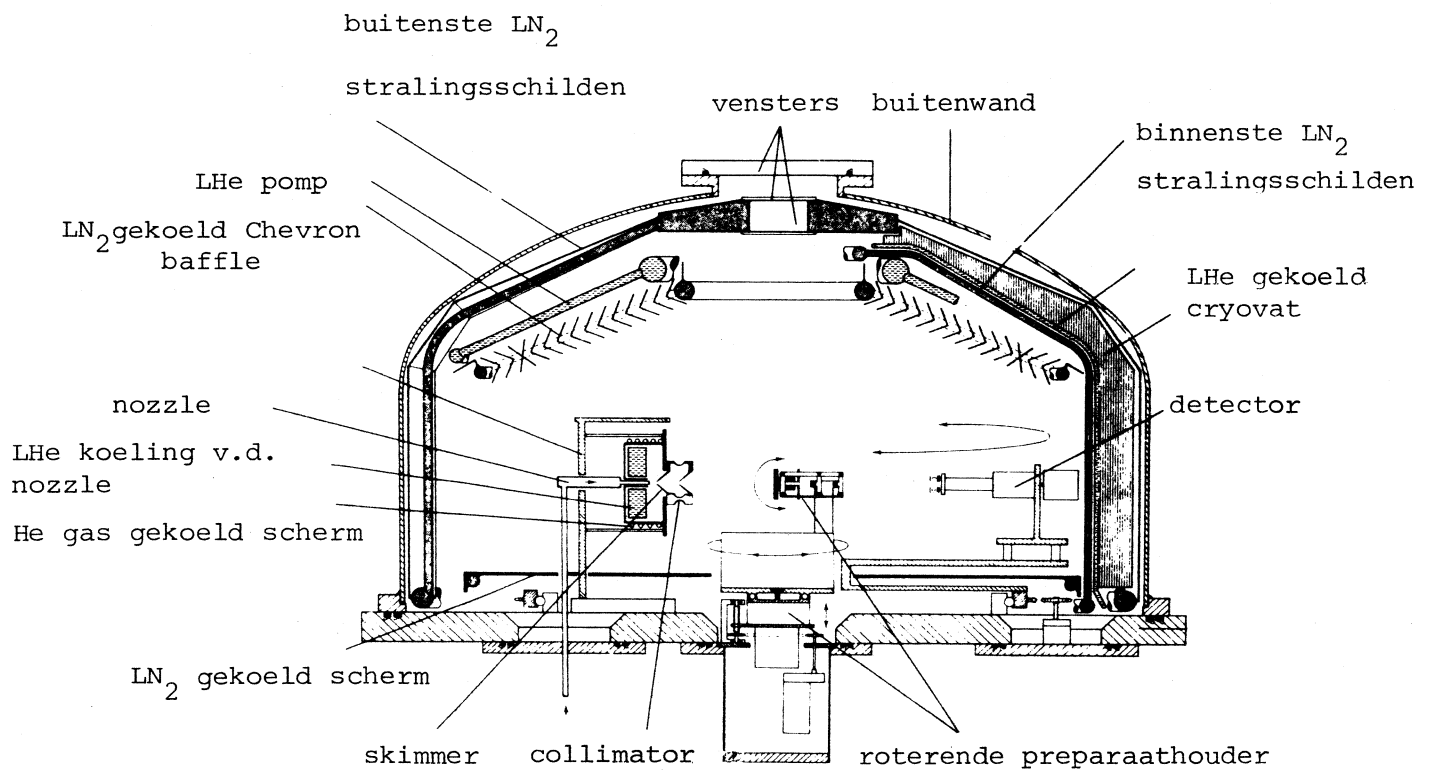


fig. III.44

Doorsnede van een experimenteerkamer voor molecuulbundel-onderzoek, met bijbehorende cryopompgeometrie

pomp alvorens opnieuw afgekoeld te worden, voorgepompt te zijn tot beneden 1 Pa. Zonder dit warmte-isolerend vacuüm zou het koelend vermogen tekort schieten.

Het is een misvatting de koude pomp direct op atmosferische druk te brengen door lucht in te laten. Dit geeft onmiddellijk aanleiding tot dikke lagen ijs die het opwarmproces verder vertragen. Het doorspoelen van droge stikstof kan het regeneratie proces versnellen.

Het gehele regeneratieproces met opnieuw afkoelen kan binnen 3 uur voltooid zijn als de regels in acht genomen worden. In de praktijk worden cryopompen eens in de week geregenereerd. De te behalen einddruk voor cryopompen ligt, mits het systeem uitgestookt is, beneden 10^{-8} Pa. Het voordeel van deze pompen is dat de pompsnelheid groot is in vergelijking met de pompafmetingen. Het allerbelangrijkste voordeel is het olievrije eindresultaat. Het is tevens mogelijk een dusdanige geometrie van het stelsel cryopanelen te ontwerpen, dat een experiment zich binnen de 20 K ruimte kan afspelen. Voorbeelden hiervan zijn molecuulbundel experimenten zoals in Fig. III.44 te zien. De molecuulbundel kan via gekoelde skimmers de experimenteer-ruimte binnenkomen. Het resultaat van het experiment kan via spleten in de 80 K en 20 K schermen waargenomen worden. Dit is natuurlijk alleen mogelijk als het experiment zelf geen te grote warmtebelasting oplevert voor het koelsysteem. Ook de waarnemingspleten moeten dusdanige afmetingen hebben dat de warmtebelasting van buitenaf niet te groot wordt.

III.2.4. Getterpompen

Principe en opbouw

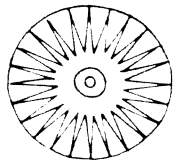
Het principe van de getterpompen berust op een dusdanig grote bindingsenergie (Q zie formule III.15) van het gasmolecuul met het gettermateriaal dat we van een chemische binding kunnen spreken. Dit is uiteraard sterk afhankelijk van de gassoort als wel het gettermateriaal. Edelgassen zijn een voorbeeld van moeilijk te verpompen gassen voor elk gettermateriaal. Gettermaterialen zijn: tantaal, niobium, titaan, zirkonium, thorium, crium en aluminium. Sommige van deze getters worden

in bulkvorm gebruikt, andere worden verdampt, waarbij het opgedampte materiaal het getterende oppervlak vormt.

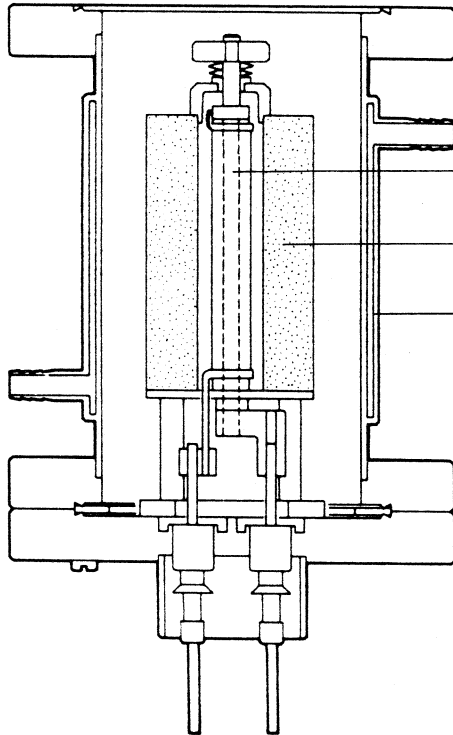
In het geval van bulkgetters hebben we te maken met poreuze materialen, die na een activeringsproces een groot chemisch actief oppervlak vertonen. Een bekend voorbeeld is het AlZr getter. Activeren bestaat uit het verhitten tot dusdanige temperatuur dat een groot aantal barstjes in het materiaal ontstaat, hetgeen een groot pompend oppervlak oplevert. De optimale pomp temperatuur ligt tussen 200 en 400°C. Dit is te verklaren uit het feit dat de pompwerking niet alleen bepaald wordt door het adsorptieproces, maar ook door diffusie van het gas de bulk in, waardoor het oppervlak in zekere zin geregenereerd wordt. Dit hangt uiteraard van het soort moleculen af. Door de temperatuur van het getter verder te verhogen kan het diffusieproces een dusdanige rol gaan spelen in vergelijking met het gewoonlijk afnemende adsorptieproces, dat we zelfs van een beperkte regeneratie kunnen spreken. Het dient opgemerkt te worden dat waterstof zich in dit proces afwijkend gedraagt. Waterstof gaat weliswaar een chemische binding met het gettermateriaal aan, maar diffundeert gemakkelijk door de bulk en kan zelfs weer naar het oppervlak terugdiffunderen en vervolgens desorberen. Vandaar dat de optimale pomptemperatuur van deze gettermaterialen voor waterstof bij 200°C ligt. Het is dus mogelijk waterstof weer gedeeltelijk uit het materiaal te verwijderen. Dit geldt overigens voor alle gettermaterialen. Volgende voorbeelden zijn een gesinterd mengsel van zirkonium en koolstof, hetgeen een zeer poreus eindresultaat oplevert en ceralloy bestaande uit 80% thorium, 15% cerium en 5% aluminium.

Meestal worden deze bulkgetters in de vorm van strips, staafjes, poeder of pillen gebruikt in kleine vacuümsystemen zoals electronenbuizen. Verhitten kan dan geschieden door hoogfrequente inductie. Het zirkonium aluminiumgetter is ook verkrijgbaar met grotere pompvermogens. Het materiaal is in plaatvorm om een verwamingselement gevouwen (zie Fig. III.45).

Verdampende getters worden zowel voor grote als kleine vacuümsystemen gebruikt. In kleine systemen wordt meestal een gettervulling in een houder eenmalig verdampt op een deel van



dwarsdoorsnede van het pompelement



verwarmingselement

pompelement

watergekoelde pomponhulling

fig. III 45,

SAES Sorbac zirkonium-aluminium
bulk getterpomp

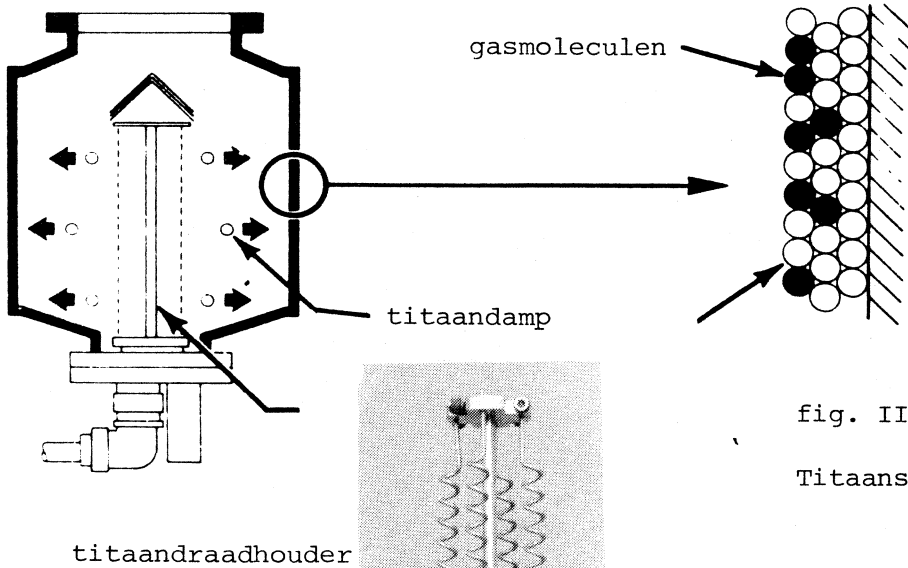
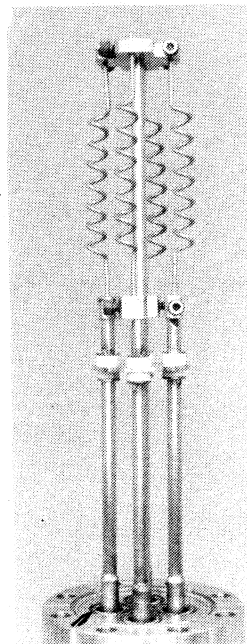


fig. III 46,

Titaansublimatiepomp



de wand van het systeem. In grote systemen wordt periodiek of continu gettermateriaal op het pompende oppervlak neergeslagen. Het verdient de voorkeur gedurende het opdampproces het pompende oppervlak te koelen. Hierdoor wordt een poreuze getterlaag verkregen, daarnaast verbetert dit tevens het adsorptieproces. Een dergelijk poreuze laag kan ook verkregen worden door in het getter bewust een hoeveelheid gas aan te brengen. Tijdens het verdampen geeft de hierdoor tijdelijk verhoogde druk eveneens aanleiding tot de vorming van een poreuze laag. De hoeveelheid gas is zo afgestemd dat de poreuze getterlaag gemakkelijk in staat is het gas weer op te nemen en daarna een effectieve pompsnelheid over te houden. Barium en titaan zijn de bekendste verdampingsgetters. Titaan heeft het voordeel bij een temperatuur van 1600°C al te verdampen voordat smelten optreedt (1800°C), we noemen dit sublimeren.

Het eenvoudigst is een wolframdraad omwikkeld met een titaandraad en een andere wolframdraad daaraan parallel op temperatuur te brengen door middel van weerstandsverhitting. Commerciëel zijn draden verkrijgbaar van een molybdeen titaanlegering. Het molybdeen blijft dan de drager terwijl het titaan sublimeert. In de praktijk bestaat een zogenaamde sublimatiepomp uit 3 of 4 van deze draden gemonteerd op een aantal doorvoeren op een flens, in combinatie met een omgevend te koelen oppervlak (Fig. III.46). De hoeveelheid titaan die we ter beschikking hebben is ongeveer 3-6 gram. Een andere mogelijkheid van verhitten is m.b.v. elektronenbombardement. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Fig. III.47 waar een titaanpil ingeklemd zit tussen twee plaatjes molybdeen. De gloeidraad er omheen levert de elektronen. Bij een emissie van 10 mA en een versnelspanning van 10 kV hebben we al een vermogen van 100 Watt. De gloeidraad voeding van deze systemen dient gestabiliseerd te worden op de elektronenstroom die de titaanpil bereikt. Als het verdampen begint, gaat ook de ionisatie en dus elektronemissie een rol spelen. Het aantal elektronen dat de titaanpil bereikt neemt dus toe. Dit kan zelfs zover uit de hand lopen dat de titaanpil gaat smelten. Het voordeel van deze methode is dat afhankelijk van de elektronenstroom grote hoeveelheden titaan verdampt kunnen worden. Het is zelfs mogelijk

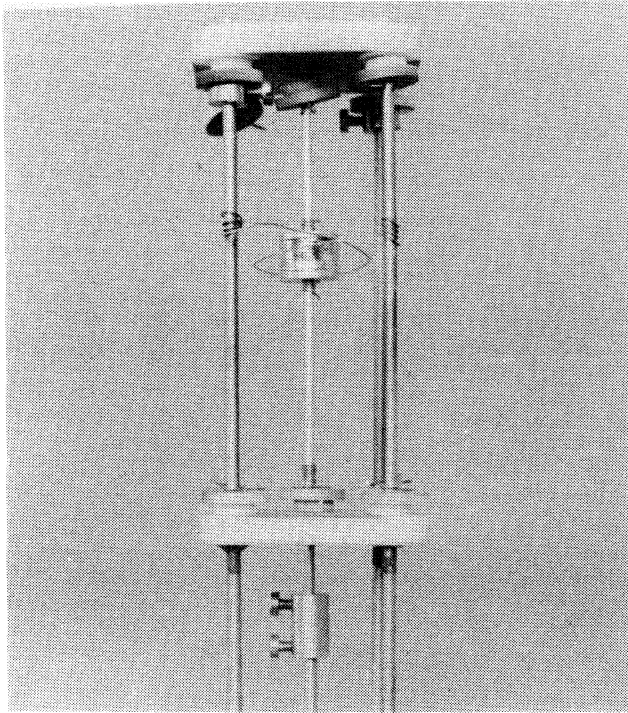


fig. III 47,

Titaansublimatiebron waarbij ver-
hitting geschiedt met behulp van
electronen bombardement

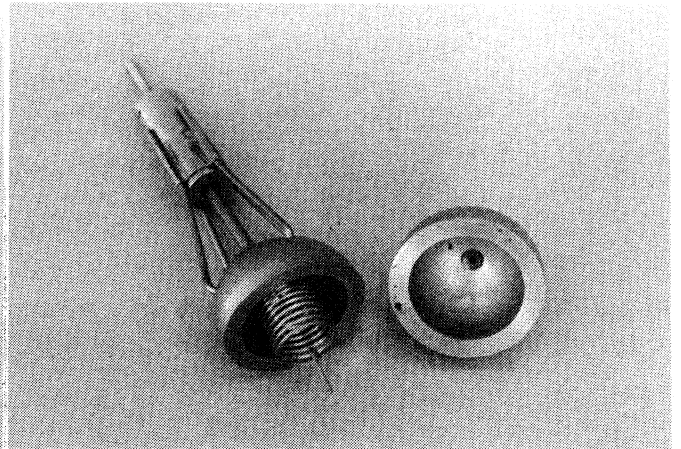
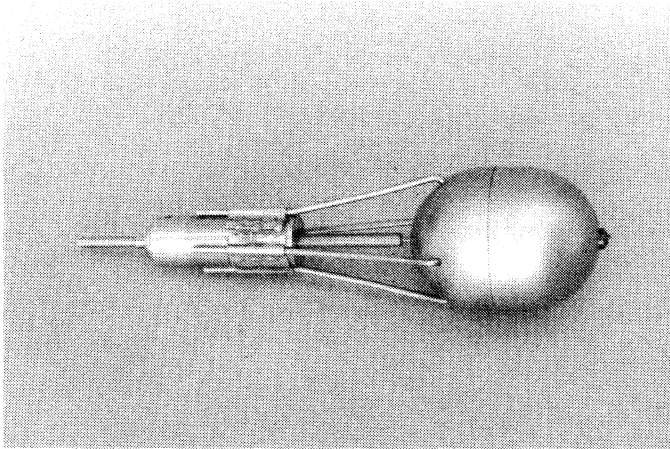


fig. III 48,

De Ti-ball.

Titaansublimatiebron waarbij de verhitting geschiedt
met behulp van warmtestraling

hele staven titanium m.b.v. electronenbombardement te verhitten.

Een veel gebruikte oplossing is de Ti-bal. Hierbij wordt een holle titanium bal van binnen uit door straling van een gloeidraad verhit (Fig. III.48).

Gebruik en eigenschappen

Geen van de getters kan een vacuümsysteem vanaf atmosferische druk afpompen. De meeste getters kunnen pas gestart worden bij een druk beter dan 10^{-2} Pa, hetgeen met een andere pomp gehaald moet worden. Aangezien het voordeel van getters een koolwaterstof vrij vacuüm is, moet dit voorpompen met de nodige zorgvuldigheid gebeuren. Hiertoe worden dan vaak zeoliet sorptiepompen gebruikt.

De bulkgetters moeten geactiveerd worden. Hierbij komt vaak gas vrij wat door een andere pomp verpompt moet worden. Als voorbeeld moge dienen het ZrAl getter waarbij tijdens het activeren argon vrij komt. Dit gas is vermoedelijk gebruikt als schutgas tijdens de produktie van het getter. Het verdient dan ook aanbeveling gedurende het activeringsproces een goed gebuffelde diffusiepomp of een turbopomp te gebruiken om de vrijkomende argon te verpompen. Argon wordt als alle andere edelgassen niet door het gettermateriaal gepompt. Het regenereren moet gebeuren als de pompsnelheid te ver beneden het gewenste niveau komt. Dit is duidelijk waarneembaar aan de einddruk. De pompsnelheid wordt bepaald door de hoeveelheid gas die al eerder verpompt is. De hoeveelheid geproduceerd gas en dus de druk bepalen de periodiciteit van regenereren.

Ook voor titaan sublimatiepompen geldt dat nieuwe gloeidraden tijdens verhitten veel gas leveren. Meestal zijn dit waterstof en methaan. Het eerste wordt weer gemakkelijk verpompt door de verse titaanlaag. Methaan vormt een probleem apart, door de grote chemische stabiliteit gedraagt dit gas zich als een edelgas. Het verdient dus aanbeveling ook in dit geval de uitstookcyclus van de draden het vrijkomende gas met een verplaatsingspomp te verwijderen. Meestal is de hoeveelheid gas die vrijkomt bij de verhitting van de draden zo groot, dat in etappes met toenemend vermogen uitgestookt moet worden.

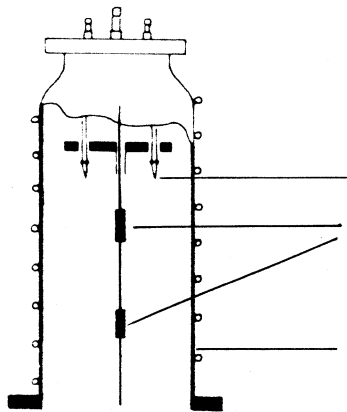
Als een titaandraad bij 50 A op sublimatietemperatuur is, wordt het uitstoken gestart met 20 A. Als de druk tijdens afpompen gaat zakken, wordt doorgeschakeld naar de andere draden. De stroom wordt elke keer met 10 A verhoogd tot 50 A bereikt is.

Ook gedurende het normale sublimatieproces wordt methaan gevormd, daarnaast vindt door verhitting van de opgedampte titaanlaag diffusie en desorptie van waterstof plaats. Waterstof is afkomstig van eerder verpompte waterdamp wat gedesintegreerd is, waarbij waterstof de bulk in diffundeert. Als een titaan sublimatiepomp veel waterdamp heeft moeten verpompen kan de hoeveelheid waterstof in de bulk van de titaanlaag zo groot zijn, dat tijdens sublimatie de druk te hoog oploopt en daarna niet laag genoeg meer wordt. Als het gehele vacuümstelsel inclusief pompen uitgestookt wordt en tevens afgepompt wordt met een verplaatsingspomp lost dit probleem zichzelf op.

Regeneratie voor waterstof is ook mogelijk door stralingsverhitting van het titaanscherf d.m.v. één van de gloeidraden op 30 A te zetten. Als laatste redmiddel kan de opgedampte laag door schuren of stralen verwijderd worden. Vanwege het feit dat geen edelgassen en methaan verpompt worden, waarbij het laatste zelfs door de pomp gemaakt wordt, moet deze pomp gecombineerd worden met een andere pomp die wel edelgassen en methaan kan verpompen. In combinatie met andere pompen kan een einddruk van 10^{-11} Pa gehaald worden.

Aangezien het titaanoppervlak na verloop van tijd verzadigd raakt moet er regelmatig gesublimeerd worden. Dit is natuurlijk afhankelijk van de druk. Als we het drukverloop na sublimeren volgen is het niet moeilijk om het moment van opnieuw sublimeren te bepalen. Bij drukken $>10^{-4}$ Pa moet continu gesublimeerd worden. Bij drukken $<10^{-8}$ Pa is eenmaal per week voldoende. In het laatste geval moge er op gewezen worden dat het sublimeren beter de avond voor het experiment kan plaatsvinden dan op de dag zelf. Het kan vaak enige tijd duren voordat de waterstof, gedesorbeerd gedurende het sublimeren, weer verpompt is.

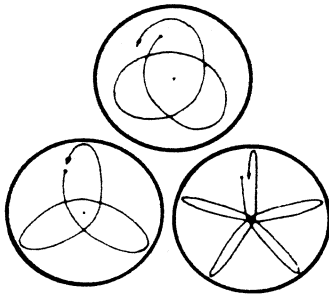
Het kan nuttig zijn de getterlaag te koelen. Koelen met vloeibare stikstof levert een winst in pompsnelheid op van een factor 3. Als er continu gesublimeerd wordt is waterkoeling



gloeikathode

titaancynders aan de anode

gekoelde wand waarop het titaan sublimeert



banen van de electronen

fig. III 49, Orbitron pomp

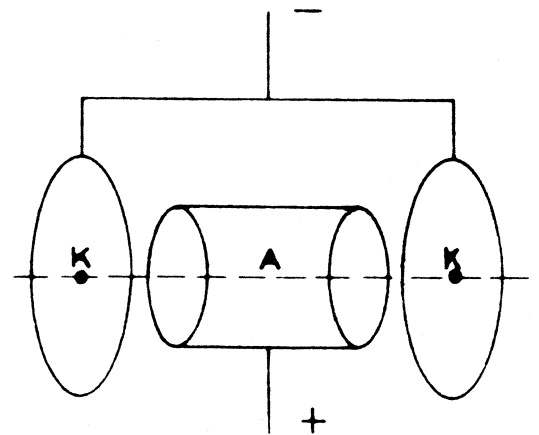


fig. III 50, Penningcel

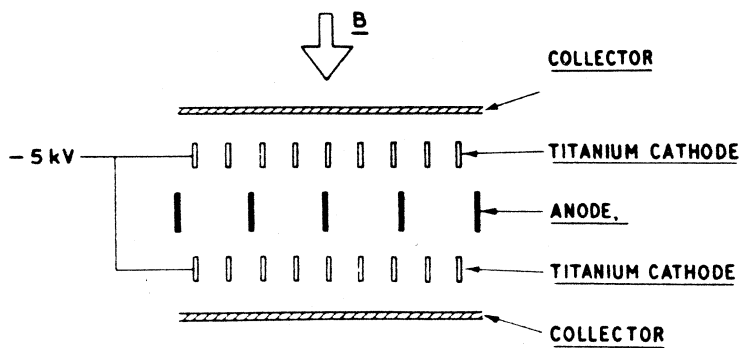


fig. III 51, Getterionenpomp van het triode type

onvermijdelijk om de desorptie van waterstof als gevolg van de warmtestralingsbelasting te beperken. Koelen van het oppervlak gedurende sublimeren kan ook een meer poreuze titaanlaag opleveren. Dit kan belangrijk zijn als grote hoeveelheden waterstof verpompt moeten worden. Het is uiterst onverstandig bij een niet uitgestookt systeem het sublimatie oppervlak met vloeibare stikstof te koelen omdat waterdamp er dan in een ijslaag op gaat zitten en verdere adsorptie blokkeert.

III.2.5. Getter ionenpompen

Principe en opbouw

Zoals hiervoor opgemerkt zijn gettermaterialen in normale omstandigheden niet geschikt om edelgassen te binden. Dit is te verbeteren door de edelgas moleculen eerst te ioniseren en vervolgens in het gettermateriaal te schieten. Als gevolg van verder opdampen zullen de ingeschoten gasdeeltjes verder opgesloten en bedekt worden. Hierdoor wordt desorptie van het slecht gebonden gas verder voorkomen.

Het meest voor de hand liggend is een titaan verdampend systeem te combineren met een ionisatieproces. Een elegante oplossing hiervan is de orbitron pomp (Fig. III.49). Deze pomp bestaat uit een gekoelde cylinder met centraal daarin een penvormige anode met twee titaancylinders en twee gloeidraden. Deze gloeidraden zijn op zorgvuldige wijze gepositioneerd ten opzichte van de anode en de cylinderwand. De kathodes staan meestal op een geringe positieve spanning van 200 V. De anode wordt meestal op 8 kV gezet. Electronen door de gloeidraden geëmiteerd zullen in het gevormde elektrische veld via lange spiraliserende banen de anode bereiken. Op hun weg zullen gasmoleculen geïoniseerd worden. Tevens zal de electronenstroom de cylinders titaan zodanig verhitten dat sublimatie optreedt. De gevormde ionen worden naar de wand versneld en aldaar begraaven door het neergeslagen titaan. De baanlengte van de electronen is echter nog niet groot genoeg om een bruikbare ionenopbrengst te leveren. Een tweede probleem is dat een kleine verandering van de positie van de anode of de aanwezigheid van een magnetisch veld de baanlengte van de electronen ongun-

stig kunnen beïnvloeden. Uiteraard worden de chemisch actieve gassen ook verpompt, zowel na ionisatie als door directe chemisorptie. De hoeveelheid opgedampte titaan en de pompstroom zijn niet evenredig met de druk maar wordt extern ingesteld.

Een veel gebruikt principe berust op de sputterende werking van oppervlakken door ionenbombardement. De pompende werking van een magnetisch-begrensde ontlading werd het eerst waargenomen door Penning, die gebruik maakte van een ringvormige anode cel. Later bleek dat met een lange anode cel (Fig. III.50) drukken beneden 10^{-7} torr gehandhaafd konden worden. Zoals in Figuur III.50 te zien is bestaat een zgn. Penningcel uit een ring- of cilindervormige anode met aan weerszijden (twee) kathodes van titaan; het geheel wordt omsloten door een glazen- of r.v.s.-omhulling. Een uitwandige magneet zorgt voor een axiaal magneetveld van ca. 1 kGauss. Tussen de anode en de kathode wordt een spanning van enkele kVolt aangelegd, waarbij de kathodes op aardpotentiaal staan. Electronen die door de kathode geëmitteerd worden, bewegen zich in de richting van de anode. Het magnetische veld dwingt ze echter tot het volgen van spiraalvormige banen. De electronen worden dus door een gecombineerd magnetisch-electrisch veld gevangen gehouden in de cel en leggen daarbij een grote weg af, hetgeen resulteert in een hoge botsings- en ionisatiekans van de gasmoleculen. Bij deze ionisaties ontstaan tevens nieuwe electronen die eveneens aan het ionisatieproces deelnemen. De electronen verliezen bij de botsingen steeds meer energie en zullen in banen gaan lopen die steeds dichterbij de anode liggen en zullen uiteindelijk eindigen op de anode (Jepsen, Helmer en Hoffman). De gevormde positieve ionen zullen naar de kathodes versneld worden. Door hun massa zullen ze nauwelijks beïnvloed worden door het magneetveld en de kathode treffen met een energie van enkele keV. Op deze manier kan over een groot drukgebied een ontlading in stand gehouden worden. Hierbij zal een deel van de ionen zich in de kathodes begraven en een ander deel zal het kathode materiaal verstuiven. Door voor de kathodes titaan te kiezen wordt een optimale pompende werking van een dergelijke Penningcel verkregen.

Het verdient aanbeveling het pompeffect nader in beschouwing

te nemen. Ten aanzien van chemisch-actieve gassen bestaan de diverse mogelijkheden: Het gasion zal zich chemisch met titaan binden, het ion zal schoon titaan wegsputteren, het ion zal titaanverbindingen wegsputteren, of zal regeneratie van een aantal gebonden gasresten plaatsvinden. Het weggesputterde schone titaan dat op de pompomgeving, de anode en sommige plaatsen op de kathodes terecht komt zal de aanwezige gasresten eveneens verpompen en door ophoping de eerder op voornoemde plaatsen neergesputterde titaan verbindingen begraven. Dit laatste effect treedt ook op door de weggesputterde titaanverbindingen, waarbij dan tevens de kathodes schoongesputterd worden. Er vindt dus ophoping plaats van titaan in sommige delen van de pomp. Het is nog niet duidelijk hoeveel chemische bindingen plaatsvinden op de kathodes of de anode.

Edelgassen gaan hoogstens een fysische binding (zwak) aan met titaan maar zullen door nieuwe ionen weer gemakkelijk vrij gemaakt worden. Edelgassen worden dan ook alleen maar op die plaatsen in de pomp verpompt waar geen ionen hun sputterende werking uitoefenen, dus op de anode, de pompomgeving en sommige delen van de kathode (D. Andrew), al waar door neerslag van gesputterd materiaal het begravingseffect de verpompte edelgassen kan consolideren.

Het probleem doet zich echter voor dat de mogelijkheid dat edelgasresten op voornoemde plaatsen komt niet groot is. Voor een zeer klein deel zal het edelgas zich in gebonden toestand met het titaan laten versputteren en er zal een kleine kans zijn dat niet geïoniseerde edelgasresten zich in deze gebieden met het schone titaan zullen binden. De gewone diode Ionen Getterpomp heeft dan ook een erg geringe pompsnelheid voor edelgassen. Als één van de oplossingen van dit probleem is gedacht om de kathodes van verschillende materialen te maken. T. Tom en B.D. James hebben een pomp besproken waarvan de ene kathode van titaan en de andere van tantaal is. Er kan direkt opgemerkt worden dat deze pomp een betere edelgas pompwerking vertoont. Een verklaring hiervoor zou zijn dat tantaal veel minder makkelijk versputterd wordt en dat het edelgas op deze tantaal kathode begraven zou worden door het versputterde titaan van de andere titaankathode. Deze theorie is door Jepsen

weersproken met de theorie van de energetische neutralen. Deze theorie stelt eveneens dat edelgaspompen alleen geschiedt door begraven op die plaatsen waar geen sputteren plaatsvindt, maar ophoping van gesputterd materiaal. Het is dus in de eerste instantie duidelijk dat dit deel van het pompoppervlak zo groot mogelijk moet zijn. Hier kan echter niet mee volstaan worden; de edelgasresten moeten ook nog deze plaatsen bereiken. Jepsen heeft hiervoor de theorie opgesteld dat edelgas ionen tijdens de botsing met de kathodeplaat neutraliseren en als energetische neutralen hun begraafplaatsen kunnen bereiken. De mate van ontstaan van deze energetische neutralen zou dan afhangen van de hoek van inval van het ion op het kathode-oppervlak en van de massaverhouding van het ion en de atomen van het oppervlak. Met het laatste deel van theorie is dan ook de edelgas pompwerking van de D.I. pomp aannemelijk gemaakt. Deze theorie houdt echter geen rekening met de microgeometrie van het oppervlak en tijdens de werking worden de kathodes een mengsel van beide kathodematerialen.

Enkele voorbeelden waarbij een gunstige edelgaspompwerking verkregen wordt volgens voornoemde invalshoek theorie zijn de "slotted cathode" pomp en de triode pomp.

In het eerste geval is de kathode voorzien van sleuven; hierdoor wordt het oppervlak waarbij titaalophoping plaatsvindt, groter en de vorming van energetische neutralen door gunstige invalshoek wordt groter. Bij de triodepomp hebben de kathodes dezelfde honingraatachtige vorm als de anode. De anode en de buitenkant (de buitenelectroden) van de pomp (Fig. III.51) staan op aarde. De kathodes staan op enkele kV. De ionen die in de anode gevormd worden zullen de kathodes onder een gunstige hoek treffen voor het vormen van energetische neutralen. Tevens zullen de ionen die doorschieten naar de buitenste elektroden afgeremd worden en daardoor een kleinere kans hebben het uit het aldaar verstoven titaan te begraven of half-begraven edelgassen weer vrij te maken.

Ondanks al deze verbeteringen blijft de pompcapaciteit voor edelgas een fractie van de pompcapaciteit voor actieve gassen (< 20%). Dit verschilt zelfs nog voor verschillende edelgassen, hetgeen met voorgaande theorie verklaarbaar is. Verder betekent dit eveneens dat een oplossing ter verbetering van de pompca-

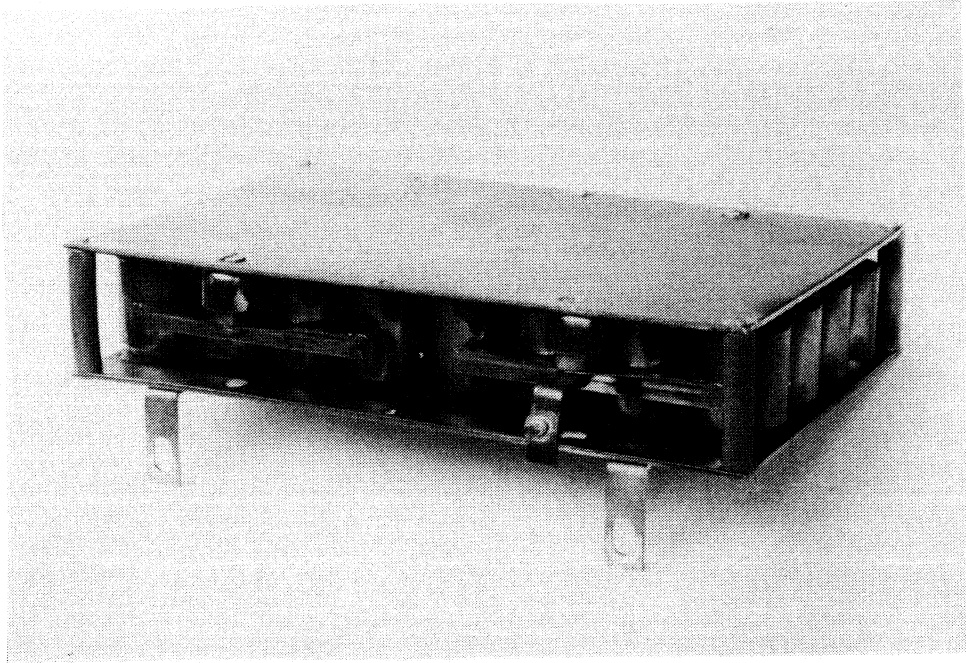


fig. III 52, Een getterionenpompelement bestaande uit twee kathodeplaten van titaan met daartussen een array van anode ringetjes.

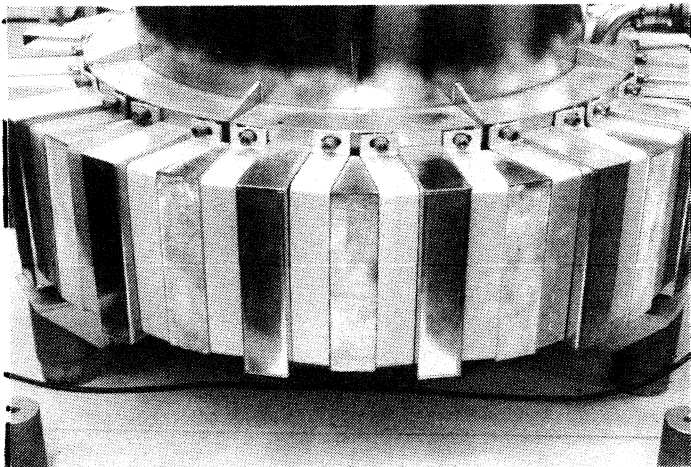


fig. III 53a,
Technische uitvoering van een ionengetterpomp, bestaande uit een aantal elementen, cilindrisch om het pomphuis gemonteerd.

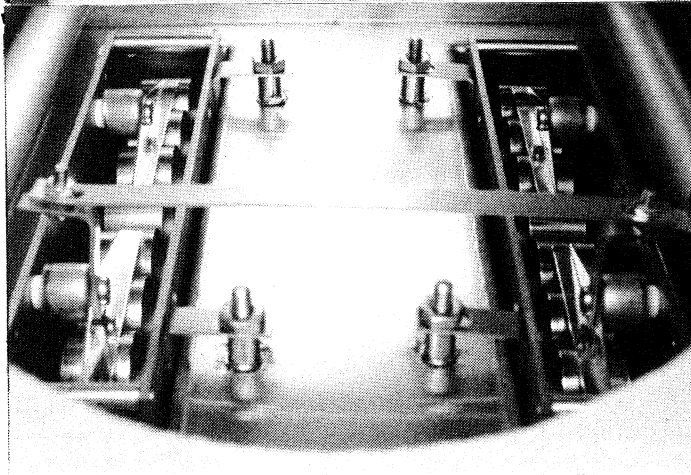


fig. III 53b,
Binnenaanzicht van een getterionenpomp.

paciteit voor argon nog niet een beter resultaat voor helium hoeft op te leveren. Hieruit mag tenslotte geconcludeerd worden dat er geen edelgaspompsystemen bestaan die dezelfde pomp-capaciteit voor alle edelgassen hebben.

In de praktijk is een pompelement samengesteld uit een aantal parallel geschakelde penningcellen. Dit wordt gerealiseerd door de anode uit te voeren als een honingraad van ringetjes met aan weerszijden twee kathodeplaten van titaan (Fig. III.52). Een dergelijk element wordt dan in een roestvrij stalen omhul-ling aan het systeem gelast, waarbij aan de buitenkant aan weerszijden een magneet aangebracht wordt. De anode wordt op een hoogspanning van ~5 kV gezet en de kathodes blijven op aardpotentiaal. Een getterionenpomp bestaat gewoonlijk uit één of meerdere elementen, afhankelijk van de benodigde pompsnel-heid, die dan cilindrisch om een pomphuis gelast wordt (Fig. III.53). Het is tevens op deze manier mogelijk om een gesloten magneetveld te verkrijgen, waardoor veel minder strooi-velden optreden, welke het experiment zouden kunnen beïnvloe-den. Verder moet er rekening mee gehouden worden dat ionen zo-wel elektronen het pompelement en het pomphuis kunnen ver-laten. Ook dit kan aanleiding geven tot storingen in de experi-menteerterruimte boven het pomphuis. Dit is te voorkomen door de opening van het pomphuis te voorzien van respectievelijk een gaas op anodepotentiaal en daarboven (dus aan de experimen-teer kant) een gaas op aardpotentiaal. Er zijn fabrikanten die deze voorziening standaard kunnen leveren.

Gebruik en eigenschappen

Zoals te verwachten is het ook met deze pompen niet moge-lijk vanaf atmosferische druk te pompen. De bovengrens in druk wordt bepaald door de hoeveelheid warmte die door de ontlading in een element gegenereerd wordt. Vooral bij triode pompen, waarbij geen thermisch contact is tussen de kathodes en de pompwand, kan dit probleem ernstige vormen aannemen. Dit kan variëren van desorptie van waterstof tot mechanische deforma-tie van de pompelementen. Tevens hangt de levensduur sterk af van de druk waarbij de pomp gebruikt wordt. Bij 10^{-4} Pa is een element na een jaar versleten, d.w.z. er gaan dan gaten

in de kathodes vallen. Bij een constante druk van 10^{-5} Pa duurt dit 10 jaar. De vraag doet zich voor in hoeverre de pompsnelheid gehandhaafd blijft bij zeer lage drukken ($2 \cdot 10^{-9}$ Pa). Uit het onderzoek van S.L. Rutherford blijkt dat de pompsnelheid van een Getter-Ionenpomp afhangt van de intensiteit (I/P) van de koude kathode ontlading. I is hierbij de pompstroom (Ampere) en P de druk (torr). Het blijkt dat I/P vanaf 10^{-2} Pa tot een overgangsgebied vrijwel constant is. In dit overgangsgebied verandert de ontlading ineens erg snel en neemt snel af waarna uitdoving volgt. Dit overgangsgebied wordt voornamelijk bepaald door parameters zoals anode geometrie, diodespanning en magnetisch veld. Met de gewoonlijk gebruikte combinatie van deze parameters ligt het overgangsgebied tussen 10^{-6} - 10^{-7} Pa. Met een andere combinatie van deze parameters is het echter mogelijk een constante I/P tot 10^{-9} Pa te bereiken. Door het aanbrengen van een β -bron is het eveneens mogelijk deze limiet verder te verlagen.

Zoals bij alle opslagpompen hebben we ook hier te maken met het opnieuw vrijkomen van eerder verpompte gassen, hetgeen aangeduid wordt met instabiliteiten. Instabiliteiten worden voornamelijk door edelgassen veroorzaakt en kunnen in drie soorten onderverdeeld worden:

- a) periodieke instabiliteiten,
- b) continue desorptie instabiliteiten,
- c) verzadigingsinstabiliteiten.

Periodieke instabiliteiten zijn periodiek optredende drukfluctuaties van enkele honderden malen de basisdruk als gevolg van veranderingen in de gasontlading. Volgens de onderzoeken vertonen de triodepomp, de magnetronpomp en de "slotted cathode" pomp een goede argonstabiliteit. Uitgebreidere onderzoeken zijn gedaan met diverse edelgassen aan D.I. pompen met diverse kathode materiaal combinaties.

Uit de experimenten bleek dat voor bepaalde materiaalcombinaties de pomp voor een bepaald edelgas wel en voor een bepaald ander edelgas geen stabiliteit vertoonde. Dit blijkt niet afhankelijk van de sputteropbrengst van de materialen maar van de massaverhouding van het gasion en het kathodemateriaal stoom, waarbij het zwaarste kathodemateriaal doorslaggevend is. Continue desorptie instabiliteit treedt op als er

aan een constant lek gepompt wordt en het gas door thermische oorzaak weer uit de kathodes komt en niet meer verpompt wordt.

Ook kan continue instabiliteit optreden doordat als gevolg van het verpompen van een actief gas een ander gas weer vrij komt. Dit manifesteert zich vooral bij lage drukken. Als door een of ander ongeluk een getterionenpomp te veel argon verpompt heeft komt dit weer vrij als er zuurstof of andere actieve gassen verpompt worden. Dit manifesteert zich in een snel behalen van een redelijke einddruk, gevolgd door een weer langzaam oplopen en zich stabiliseren op een druk die ongeveer een factor 10 hoger ligt. Een mogelijke oplossing van het probleem is de pomp met tussenpozen uit en aan te schakelen, waarbij de vrijkomende argon met behulp van een andere ultrahoog vacuumpomp te verwijderen. Als dit niet lukt moet de gehele getterionenpomp bij 200°C tegen een andere pomp (b.v. turbopomp) uitgestookt worden. Ook koolwaterstoffen geven aanleiding tot continue instabiliteiten. Door verpompen van zuurstof wordt CO gevormd wat weer vrijkomt. De enige oplossing is in dit geval het verwijderen van de elementen. Na de montage en glasstralen moeten de elementen verder op 400°C in schoon vacuüm uitgestookt worden. Ook de binnenkant van het pomphuis moet goed gereinigd worden.

Verzadigingsinstabiliteiten treden op bij lichte gassen zoals helium en waterstof. In de eerste plaats zijn de uit deze gassen gevormde ionen te licht om kathodemateriaal te versputteren. Deze gassen worden alleen maar verpompt door implantatie en diffusie in de kathodes. Als gevolg hiervan kan verzadiging van de bulk van het kathodemateriaal optreden. Slechts uitstoken van de getterionenpomp waarbij simultaan met een andere UHV pomp wordt afgepompt kan de pomp regenereren.

De pompsnelheid van een getterionenpomp stabiliseert zich na verloop van tijd op een bepaalde waarde. Het is deze gestabiliseerde waarde die door fabrikanten opgegeven wordt. De pompsnelheid kan een factor 1.5 hoger liggen. Hiertoe is uitstoken op 200°C tegen een andere UHV pomp een probaat middel. Als de getterionenpomp in warme toestand gestart wordt, de magneten zijn dan ook warm en hebben niet hun optimale magneetveld, zal door de wat minder begrensde ontlading nog veel gas vrijkomen.

De druk kan een factor 1000 of meer oplopen. Als de pomp zijn einddruk bereikt heeft, kan door zacht tikken met een kunststof hamertje op de buitenkant, zwak gebonden gas vrijkomen wat vervolgens in een beter gebonden toestand opnieuw verpompt wordt. G.I. pompen worden meestal gebruikt in combinatie met een titaansublimatie pomp. Deze combinatie is vooral gunstig omdat de G.I. pomp een verbetering van de pompsnelheid van de titaansublimatiepomp geeft. De totale pompsnelheid is niet de som van de pompsnelheden van de beide pompen maar ligt duidelijk hoger (A.B. Francis, R.L. Jepsen) voornamelijk t.g.v. verbeterde argonpomp werking.

III.3. Pompkeuze

III.3.1. Inleiding

Bij de keuze van een pomp speelt een groot aantal overwegingen een rol. In de eerste plaats is de benodigde einddruk een belangrijke factor. Deze einddruk wordt niet alleen bepaald door de einddruk die de pomp zelf kan behalen, maar tevens door het gasaanbod wat verpompt moet worden. Naast een kwalitatieve keuze moet er dus ook een kwantitatieve keuze gedaan worden. Er zijn twee gasbronnen: de ontgassing van de binnenkant van het vacuümsysteem en het gas wat gegenereerd of gebruikt wordt tijdens een experiment. De ontgassing is primair bepalend voor de basis einddruk van een vacuümsysteem. De belangrijkste gassen die hierbij vrijkomen zijn: waterdamp, kooldioxide en waterstof en kunnen tamelijk probleemloos door ieder pomptype verpompt worden. De pompsnelheid van de gekozen pomp moet alleen dusdanig groot zijn dat de heersende ontgassing in rekening brengende, de juiste einddruk behaald kan worden. Op een bepaald moment worden we in onze keuze van de pompsnelheid beperkt door de dimensies van het vacuümsysteem ten aanzien van de maximale geleidbaarheid van de pompgaten. In praktische gevallen voor kleine systemen worden geen pompen met een pompsnelheid >2000 l/s gekozen. De winst in einddruk die gewoonlijk een factor 100 of meer moet bedragen, kan alleen verkregen worden door maatregelen te treffen om de ontgassing

te verminderen. Hier zal in een volgend hoofdstuk uitvoerig op ingegaan worden. Extra ontgassingsproblemen treden op als de handeling in vacuüm verricht, met hoge temperaturen gepaard gaat, zoals het geval bij opdampprocessen. In dat geval zal de omgeving van de warmtebron zoveel mogelijk met gekoelde oppervlakken omgeven moeten zijn. De werkdruk wordt bepaald door de hoeveelheid gas geproduceerd, of nodig tijdens een proces. Hierbij kan het wel noodzakelijk zijn edelgassen of chemisch agressieve gassen te verpompen. We krijgen dan te maken met de selectieve pompsnelheid en de corrosiebestendigheid van verschillende pompen. Als we voor het verpompen van agressieve gassen b.v. een diffusiepomp kiezen, moet niet alleen de pompolie stabiel zijn, maar moeten ook voor de voerpomp de juiste voorzieningen getroffen zijn om afbraak van de pompolie en corrosie te voorkomen. Verder zal rekening gehouden moeten worden met de gassen die de pomp zelf genereert. Als voorbeelden moge dienen olie uit diffusiepompen en de methaan van titaan-sublimatiepompen. Ook bedieningsgemak speelt een rol, een turbomoleculairepomp is gemakkelijker te bedienen dan een diffusiepomp. Hierin heeft men ook te maken met beveiliging tegen stroomuitval en luchtinbreuk. Hoewel de aanschafprijs een niet te verwaarlozen factor is, mag het energieverbruik zeker niet over het hoofd gezien worden. Dit manifesteert zich duidelijk bij de keuze tussen een diffusiepomp en een turbomoleculairepomp voor grote pompsnelheden. Het stroomverbruik van een diffusiepomp kan dan zodanig hoog zijn dat in de loop van enkele jaren de meerprijs van de turbomoleculairepomp gecompenseerd kan worden. Al deze problemen zullen in een aantal voorbeelden in de volgende paragrafen uitgewerkt worden.

III.3.2. Het verpompen van agressieve gassen of dampen

In het algemeen moet gelden dat een pomp bestand is tegen corrosie door de gebruikte agressieve gassen veroorzaakt. In de hogere drukgebieden (> 1000 Pa) voldoen zowel de waterstraalpompe als de waterringpompe aan deze eis. Voor lagere drukken ($> 10^{-1}$ Pa) kan gebruik gemaakt worden van de speciale chemische uitvoering van een draadschuivenpompe. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat er corrosie bestendige olie

gebruikt wordt. Het verdient aanbeveling deze olie regelmatig te verversen. Als alternatief kan een gewone draaischuivenpomp met een koelval (80 K) in serie gebruikt worden. Bij het opwarmen van de koelval zal de pomp toch vervuild worden. De voorpomp moet dan na zo'n opwarmcyclus zorgvuldig enkele malen met schone olie gespoeld en van verse olie voorzien worden. Voor drukken $< 10^{-1}$ Pa zijn er de diverse mogelijkheden. Een diffusiepomp gevuld met corrosie-ongevoelige olie (polyphenyl ethers) zal goed bruikbaar zijn. Alleen een aluminium binnenwerk zal na verloop van langere tijd schade ondervinden. Voor agressieve dampen is een turbopomp wat minder geschikt vanwege condensatie op het aluminium schoepensysteem. Voor agressieve gassen moet rekening gehouden worden met de smeerolie van de lagering. Polyphenylethers zoals Santovac en Convalex hebben uitstekende smerende eigenschappen en zijn corrosie-ongevoelig. Alvorens deze smeermiddelen te gebruiken moeten eerst alle oude smeermiddelen zorgvuldig verwijderd worden. Bij gebruik van zowel de diffusiepomp als de turbopomp moet zoals eerder beschreven de juiste aandacht aan de keuze en de olie van de voorpomp besteed worden. Ook is in dit geval het gebruik van een koelval tussen de hoogvacuümpomp en de voorpomp een goede mogelijkheid.

Zeker voor agressieve dampen is het gebruik van getterionenpompen niet aan te bevelen, aangezien de isolatoren sterk kunnen vervuilen. Een titaansublimatiepomp is daarentegen bruikbaar. Als dampen verpompt moeten worden is ook het gebruik van een cryo-oppervlak een uitstekende oplossing. Vooral als deze agressieve dampen in bundelvorm het vacuümsysteem binnenkomen is dit een optimale methode om de bundel ineens weg te pompen. Echter bij opwarmen van het cryovlak zullen de agressieve dampen weer verder verpompt moeten worden. We moeten dus toch weer over een diffusiepompsysteem beschikken.

Het belangrijkste probleem blijft de desorptie van de aan de wanden van het vacuümsysteem geadsorbeerde gas. Een dergelijk vacuümsysteem moet dus na verloop van tijd grondig gereinigd worden.

III.3.3. Het verpompen van veel gas bij een lage druk

In de eerste plaats moeten we over een groot pompend vermogen beschikken. Getterionenpompen zijn dan in het nadeel van snelle slijtage. Tevens gaan voor hoge pompsnelheden de dimensies een rol spelen. Een titaansublimatiepomp daarentegen is uitstekend geschikt voorzover het geen edelgassen of methaan betreft. Ook waterstof kan a.g.v. diffusie problemen opleveren. Echter door op een gekoeld oppervlak te sublimeren kan een dusdanig poreuze titaanlaag gevormd worden dat het waterstof bindende oppervlak aanzienlijk groter wordt. Bij drukken $> 10^{-4}$ P kan geen TS pomp gebruikt worden. Cryopompen vormen de ideale oplossing voor dit probleem, grote pompsnelheid bij bescheiden afmetingen. Helium wordt slecht verpompt. Waterstof kan door middel van cryosorptie met actief kool gepompt worden. Als het gasaanbod in bundelvorm geschiedt is dit de meest ideale oplossing om een goed achtergrondvacuüm te verkrijgen. De bundel wordt dan direct verwijderd, op de plaats waar dit het meest optimaal kan gebeuren, zonder dat eerst verspreiding van het gas door het gehele systeem optreedt. Tevens kan zonder problemen een koolwaterstof vrij vacuüm verkregen worden. Zeker als we van het cryosorptie principe gebruik moeten maken, zoals voor waterstof, dient zeer regelmatig geregenereerd te worden.

Turbomoleculairepompen en diffusiepompen zijn ook uitstekend geschikt om bij drukken $< 10^{-2}$ Pa grote hoeveelheden gas te verpompen. Voor lage drukken gaat bij gebruik van een turbomoleculairepomp voor het verpompen van waterstof de compressieverhouding een rol spelen. Het nadeel van een diffusiepomp is de olie terugstroom. Als we de prijs van de verschillende pompen gaan vergelijken, dan blijkt dat tot 2000 l/s, de diffusiepomp inclusief baffle, en de cryopomp met koelmachine in dezelfde prijsklasse liggen. De turbomoleculairepomp is dan zeker 2 maal zo duur. Het verbruik van elektrisch vermogen van de diffusiepomp en de cryopomp met koelmachine is vergelijkbaar. Het verbruik van elektrisch vermogen van een turbopomp ligt een factor 3 lager. De cryopomp verdient dus wel de voorkeur, tenzij grote hoeveelheden helium verpompt moeten worden. In dat geval moet de keuze tussen een turbopomp en een diffusie-

pomp gemaakt worden. Wat de prijs aangaat is de diffusiepomp in het voordeel, ook als het verbruik aan electriciteit meegerekend wordt. Alleen een koolwaterstof vrij vacuüm en bedieningsgemak rechtvaardigen dan de keuze van een turbopomp. Als we een pompsnelheid van 5000 l/s nodig hebben is het elektrisch vermogen van de diffusiepomp een factor 14 hoger dan voor een turbopomp. Ondanks het prijsverschil is dan, over enkele jaren gerekend, de turbomoleculairepomp goedkoper.

Ook de keuze van de voorpompen moet zorgvuldig overwogen worden. Als de hoogvacuüm pomp volledig belast wordt, moet rekening gehouden worden met het feit dat de voorpomp voor eenzelfde belasting gedimensioneerd wordt. Om dit duidelijker te maken, als de hoogvacuüm pomp 2000 l/s bij een druk van 10^{-4} Pa verpompt, dan betekent dit dat een voorpomp 2 l/s bij 10^{-1} Pa moet verpompen of 0.2 l/s bij 1 Pa. Dit komt overeen met respectievelijk 7.2 en 0.72 m³/h. Dit lijkt niet veel, maar is in het betreffende drukgebied wel veel, waar de pompsnelheid meestal een fractie is van de nominale opgegeven pompsnelheid. Er kan dan gekozen worden voor een tweede comprimerende trap in de vorm van een rootspomp, waarbij dan van een kleinere draaischuivenpomp in een hoger drukgebied voldoende pompsnelheid geleverd kan worden. Een ander voordeel is dan dat als de hoogvacuüm pomp niet belast wordt, via een omloop door de rootspomp kortgesloten kan worden. Dit levert dan weer een winst in het energiegebruik vergeleken met de situatie dat alleen een heel grote voorpomp het voorvacuüm verzorgt.

III.3.4. Het verkrijgen van Ultra Hoog Vacuüm

Een van de belangrijkste eisen voor ultra hoog vacuüm is het ontbreken van koolwaterstoffen. Uit deze overweging verdienen alle opslagpompen de voorkeur. De eindruck van een vacuümsysteem wordt voornamelijk bepaald door waterstof en water. Voor cryopompen speelt helium een grote rol. Behalve dat helium een normaal atmosferisch restgas is (4×10^{-1} Pa), wordt het ook nog eens als restgas voor lektesten gebruikt. Hetzelfde probleem geldt voor een titaansublimatiepomp. In combinatie met een getterionenpomp levert dit echter een pompsysteem met een vrij grote pompsnelheid en beperkte pompcapaciteit voor edel-

gassen. Traditioneel wordt voorgepompt met een combinatie van sorptiepompen. Het is echter steeds meer gebruikelijk geworden om met een turbomoleculairepomp voor te pompen. Het voordeel is dan tevens dat gedurende het verhitten van het gehele vacuümstelsel de getterionepomp uitgeschakeld kan blijven en op deze manier zelfs geregenereerd kan worden tot een betere pompsnelheid dan de gebruikelijke. Ook alle gassen die aanleiding zouden kunnen geven tot instabiliteiten worden uit het systeem verwijderd.

Het is ook mogelijk UHV te verkrijgen m.b.v. een turbomoleculairepomp gecombineerd met een titaansublimatiepomp. De einddruk van de turbopomp wordt beperkt door de waterstof teruggediffusie a.g.v. een geringe compressieverhouding voor dit gas. Dit wordt dan ruimschoots gecompenseerd door de waterstofpompcapaciteit van de titaansublimatiepomp. De compressieverhouding voor waterstof van de turbopomp kan verbeterd worden m.b.v. een andere turbopomp of een diffusiepomp in serie met de voorpomp. Echter de grote pompsnelheden, zoals voor een titaansublimatiepomp (> 1000 l/s) zijn alleen maar haalbaar met onevenredig grote turbopompen.

Ook op het gebied van diffusiepompen en bijbehorende pompolie soorten hebben zich dusdanige ontwikkelingen voorgedaan, dat met een zorgvuldige behandeling van de pomp, ook hiermee ultra hoog vacuüm gehaald kan worden. Hierin is een belangrijke bijdrage geleverd door de polyphenylethers, waarvan de oliedampsterugstroom uiterst gering is. In combinatie met een goede vloeibare lucht gekoelde baffle is het mogelijk drukken te behalen tot in het 10^{-8} Pa gebied. De nieuwste ontwikkeling in diffusiepompen is de integratie van een watergekoeld baffle in het pomphuis. Bij gebruik van polyphenylether als pompvloeistof gecombineerd met een zorgvuldige werkdiscipline, is het mogelijk gebleken ook met dit pomptype in het 10^{-8} drukgebied te komen. De belangrijkste voorwaarden hiervoor zijn: schone diffusiepompolie en er moet voorkomen worden dat er voorpompolie in de diffusiepomp komt. Het geringste spoortje voorpompolie verontreiniging in de polyphenylether geeft niet alleen aanleiding tot pompinstabiliteiten, maar levert ook een bijdrage in de terugstroom.

Door een diffusiepomp van voornoemd model te combineren met een titaansublimatiepomp is het mogelijk drukken $< 10^{-8}$ Pa te behalen. Het grote voordeel van een dergelijke combinatie is, dat alle gassen goed verpompt worden. Het nadeel is de noodzakelijke aanwezigheid van kleppen en een beveiliging. Een voordeel van de turbomoleculairepomp boven een diffusiepomp is de mogelijkheid om deze pomp niet alleen onder, maar ook op of opzij van een systeem te monteren. Uit dit alles kan geconcludeerd worden dat veel pompcombinaties geschikt zijn voor het behalen van ultra hoog vacuüm. De keuze wordt nu voor een belangrijk deel bepaald door: prijs, bedieningsgemak en wat er eventueel aan gebruikte apparatuur voorhanden is. Het belangrijkste is in dit geval de kennis van de fysica en de eigenschappen van de gekozen pompen of pompcombinatie, daarnaast speelt de werkdiscipline een belangrijke rol.

REFERENTIES

1. R.L. Jepsen, The physics of sputter-ionpumps, Proc. of the Fourth Int. Vacuum Congress, 1968.
2. R.L. Jepsen, Magnetically Confined Cold-Cathode Gas Discharges at Low Pressure, J.Appl.Phys. 32, 12, 2619-2626 (1961).
3. J.C. Helmer en R.L. Jepsen, Electrical Characteristics of a Penning Discharge, Proceedings of the IRE.
4. Vance E. Hoffmann, Ion Pumping, Industrial Research, Sept. 1964.
5. D. Andrew, The Development of Sputter-ion Pumps, Processes of the Fourth International Vacuum Congress, 1968.
6. D. Andrew, The role of energetic neutrals in a magnetron sputter-ion pump. Brit.J.Appl.Phys. (J.Phys. D) 2, 2 (19
7. T. Tom en B.D. James, Inert gas ion pumping using differential sputter yield cathodes. J.of Vac.Sci.and Technol. 6, 2, 304