

Aerostatische lagers in de werktuigbouw

J.L.M. Hagen Philips Natuurkundig Laboratorium Eindhoven

In toenemende mate worden bij mechanische constructies aerostatische lagers toegepast.

De specifieke eigenschappen zijn: lage wrijving, geen stick-slip, grote stijfheid en hoge draagkracht. Deze maken dit constructie-element zowel geschikt voor geavanceerde instrumenten als voor de machinebouw.

In deze voordracht zal een overzicht van het toepassingsgebied worden gegeven.

Aan de hand van een aantal figuren zal de werking en de eigenschappen van aerostatische lagers worden besproken. Met behulp van praktische voorbeelden zullen enkele nieuw ontwikkelde lagers worden toegelicht.

Inleiding

Algemeen

Kenmerkend voor werktuigen is, dat ze bewegende, naast niet bewegende delen bezitten.

Ze transformeren energie in een gewenste vorm waarbij kracht wordt uitgeoefend.

Lagers, geven ons een principiële mogelijkheid om het bewegende deel te geleiden en krachten op het stilstaande deel over te brengen.

De vlakken die ten opzichte van elkaar bewegen (de loopvlakken genoemd) zijn aan slijtage onderhevig en vertonen wrijving.

Van de meest voorkomende lagerprincipes kunnen we de volgende indeling maken: (Fig. 1)

- Contact of glijdende wrijving
- Rollende wrijving
- Inwendige wrijving
- en lagers die werken met behulp van andere fysische verschijnselen.

- Contact of glijdende wrijving:

Lagers met contact of glijdende wrijving zijn weer onder te verdelen in lagers met:

Opmerking:

Deze geschreven tekst is een samenvatting van een voordracht gehouden op 18-03-1980 op het Nat. Lab., N.V. Philips, Eindhoven. Ze heeft niet de pretentie om volledig te zijn. Bovendien moeten de meetgegevens niet vertaald worden als constructieve richtlijnen, de gegevens zullen met zorg moeten worden toegepast. Het is altijd aan te bevelen om eerst contact op te nemen met de auteur om zodoende desillusies te voorkomen.

grenssmering

gemengde smering

volle film smering

Van lagers met grenssmering wordt over het algemeen gesproken als contact tussen loopvlakken plaatsvindt via laagjes die op het metaal gevormd worden door substanties uit de olie.

Tegenwoordig worden ook grenssmeer laagjes langs chemische weg opgebracht, bijvoorbeeld teflon coating.

Onder lagers met volle film smering verstaan we lagers waarbij, de naam zegt het al, een continue film van het gebruikte smeermiddel tussen de loopvlakken aanwezig is.

Luchtlagers horen in deze categorie thuis.

Rollende en Inwendige Wrijving:

In het overzicht zien we lagers met rollende wrijving waarvan als overbekend voorbeeld de kogellagers.

Ook kunnen we met veel voordeel gebruik maken van lagers die alleen maar inwendige wrijving hebben, denk hierbij aan blad- en torsieveren.

Lagering door middel van andere fysische verschijnselen:

Dit zijn onder andere magnetische lageringen en lageringen met behulp van oppervlakte spanning. Hiervan zijn de magneetlageringen de belangrijkste, ze zijn de laatste jaren sterk in opkomst.

Aerostatische lagers:

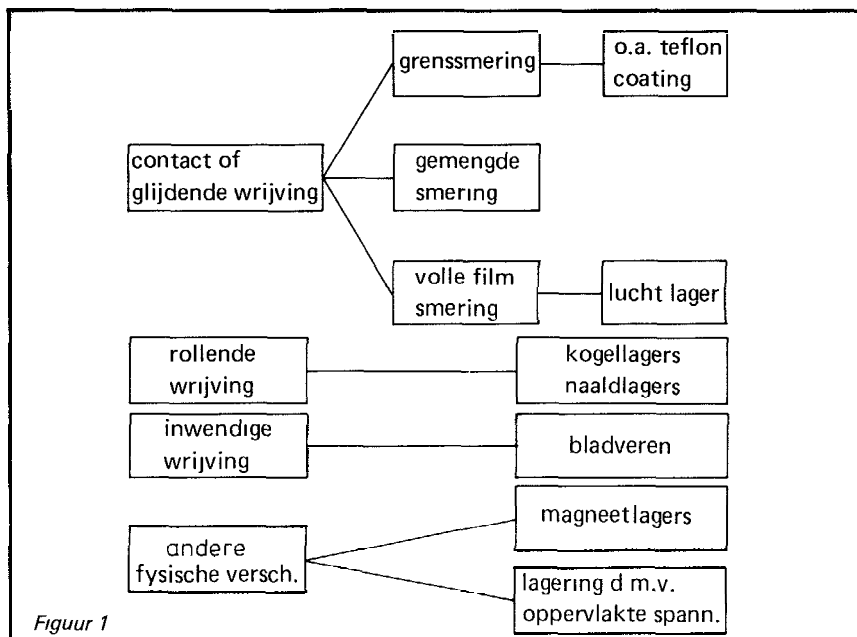
Situering

Komen we nog even terug op lagers met volle film smering. De volle film smering is een der essentiële uitvindingen in de tribologie

Wat de noodzakelijke voorwaarden zijn om volle film smering in lagers te realiseren is pas betrekkelijk kort bekend.

In 1883 was het Beachap Towers die dit ontdekte, terwijl Reynolds in 1886 de eerste berekeningen uitvoerde.

Zonder volle film smering zouden onder andere auto's op den duur vastlopen of zolang dit niet gebeurt, zou de wrijving



Figuur 1

dermate hoog zijn dat het rendement onaanvaardbaar laag zou worden. Conclusie: volle film smering is niet meer weg te denken uit de hedendaagse techniek.

Volle film smering kan op 2 manieren worden bereikt:

- zelfwerkend
- met uitwendige drukbron (Fig. 2)

Afhankelijk van het smeermiddel worden de zelfwerkende lagers, hydrodynamisch bij olie en aerodynamisch bij lucht genoemd. Zo ook bij lagers met uitwendige drukbron.

Hydrostatisch met olie als smeermiddel en aerostatisch met lucht als medium.

Een groot voordeel van de statische lagers is dat ze functioneren zelfs als het snelheidsverschil tussen het bewegende en stilstaande deel gering is.

Daarentegen behoeven de dynamische lagers geen uitwendige drukbron.

Een voorbeeld van een aerodynamische lager is het zogenaamde vlakke spiraal-groeflager

Dit lager bestaat in principe uit 2 schijven, die ten opzichte van elkaar kunnen roteren.

De ene schijf is vlak, de ander is voorzien van spiraal-groeven. (Fig. 3)

Een spiraal-groeflager kan gezien worden als een recente ontwikkeling van het stoeplager

Door nu het ene deel ten opzichte van het andere te roteren in de juiste richting wordt lucht vanuit de omgeving tussen de loopvlakken gepompt. Door dit pompeffect, samen met het vernauwingseffect, ontstaat een drukopbouw, waardoor de delen loskomen van elkaar

Werking:

We beschouwen hiervoor een cilindervormige lagervoet. (Fig. 4)

De toegevoerde lucht P_s stroomt via een nauwe opening, de zogenaamde toevoerrestrictie, en de lagerspleet naar zijn omgeving.

De toevoerrestrictie is nodig om het lager een stabiele statische positie te geven.

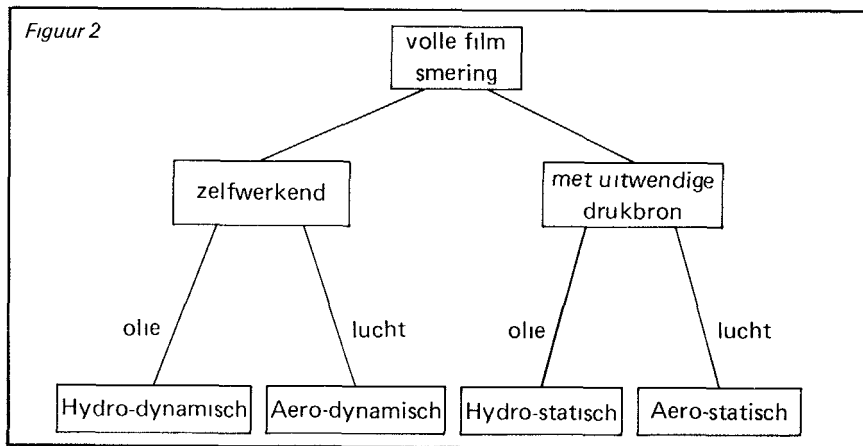
Tussen de toevoerrestrictie en de lagerspleet bevindt zich soms een kamer waarin geen drukval plaatsvindt.

Deze druk is afhankelijk van de verhouding tussen de weerstanden in de toevoerrestrictie en de lagerspleet

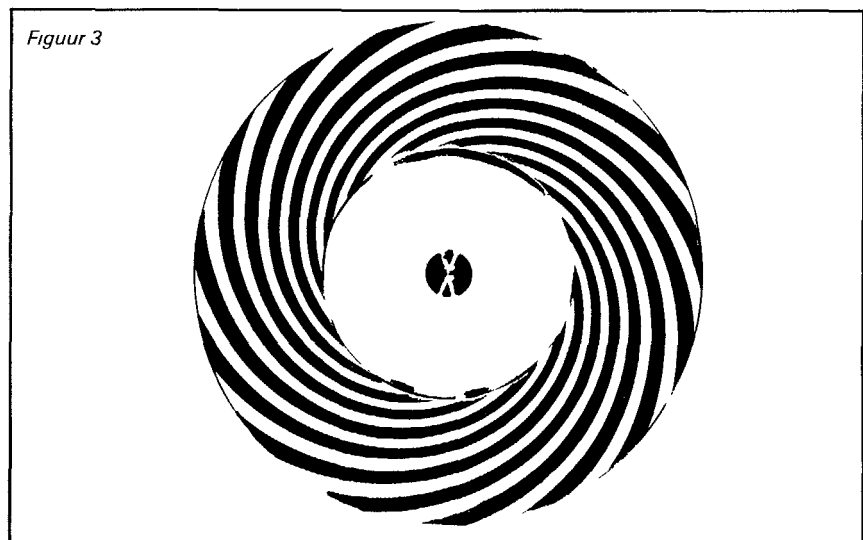
De afleiding hiervan ziet u in fig. 4.

Onder de gehele lagervoet ontstaat een zodanige overdruk dat de draagkracht W van de lagervoet evenwicht maakt met de belasting F . Indien we nu de belasting opvoeren ontstaat een spleetvernauwing. Hierdoor wordt de druk in de kamer verhoogt waardoor de drukberg hoger wordt. De vorm van de drukberg is

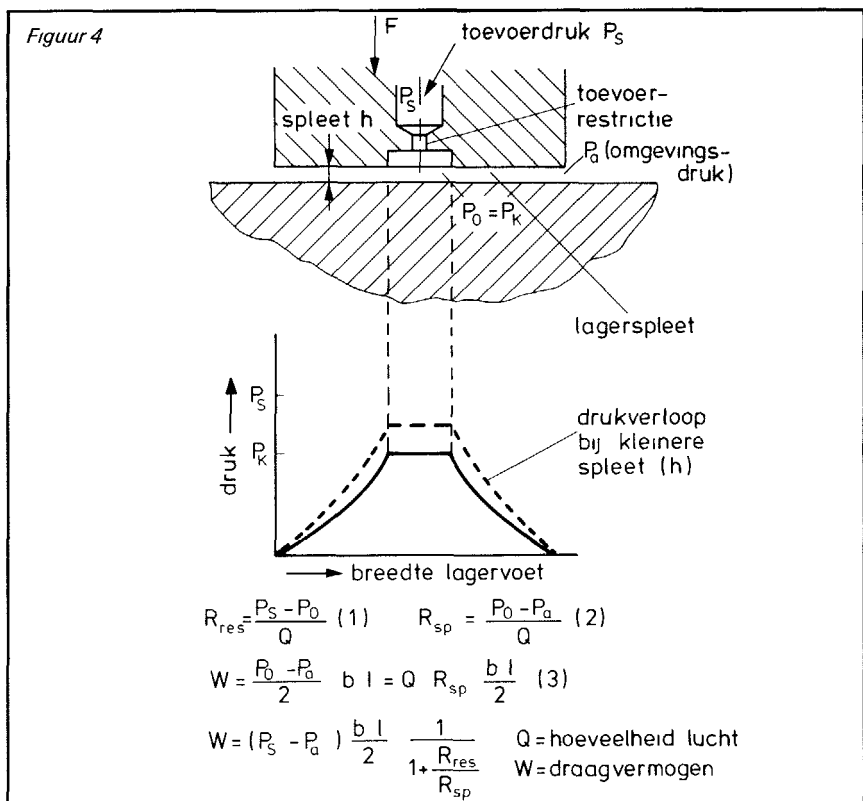
Figuur 2



Figuur 3



Figuur 4



$$R_{res} = \frac{P_s - P_0}{Q} \quad (1) \quad R_{sp} = \frac{P_0 - P_a}{Q} \quad (2)$$

$$W = \frac{P_0 - P_a}{2} \cdot b \cdot l = Q \cdot R_{sp} \cdot \frac{b \cdot l}{2} \quad (3)$$

$$W = (P_s - P_a) \cdot \frac{b \cdot l}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{res}}{R_{sp}}} \quad \begin{matrix} Q = \text{hoeveelheid lucht} \\ W = \text{draagvermogen} \end{matrix}$$

sterk afhankelijk van de verhouding tussen de gaatjesdiameter en de buitendiameter van de lagervoet

Aangezien de oppervlakte van de drukberg een maat is voor de draagkracht is dit een belangrijk gegeven. We komen hier later nog op terug

In een grafiek kunnen we het verband tussen draagkracht en de lagerspleet aanschouwelijk maken. (Fig 5)

De grafiek geeft het verband tussen de draagkracht en de lagerspleet weer. Dit verband is niet lineair zodat de stijfheid dw/dh niet constant is.

De hoogste stijfheid wordt verkregen als dw/dh maximaal is. Dit bij 60 à 80% van de maximale draagkracht.

We onderscheiden 3 gebieden:

- Het gebied waarin een aerostatische lager werkt.
- Het gebied met een negatieve draagkracht, het zogenaamde Bernoulli gebied
- Het impulsgebied (tafeltennis bal zwendend op luchtstroom).

Toevoerrestricties:

Toevoerrestricties spelen een zeer belangrijke rol bij aerostatische lagers. Deze toevoerrestricties kunnen verschillende vormen hebben

Afhankelijk van deze vormen zal een bepaald stromingsgedrag ontstaan.

Figuur 6 geeft een overzicht van de meest voorkomende restricties

Gelet op het stromingsgedrag onderscheiden we bij toevoerrestricties.

- viskeuse 6d en 6g
- traagheids 6a, 6b en 6c
- poreuse 6f en 6h
- uitwendige controle 6h

In onze constructies worden meestal traagheidsrestricties toegepast.

De traagheidsrestricties bestaan in principe uit 2 restricties in serie. (Fig. 7)

We beschouwen een restrictie waarbij het gat direct in de lagerbus is geboord.

De twee restricties worden zo gedimensioneerd dat een van de twee klein is ten opzichte van de ander

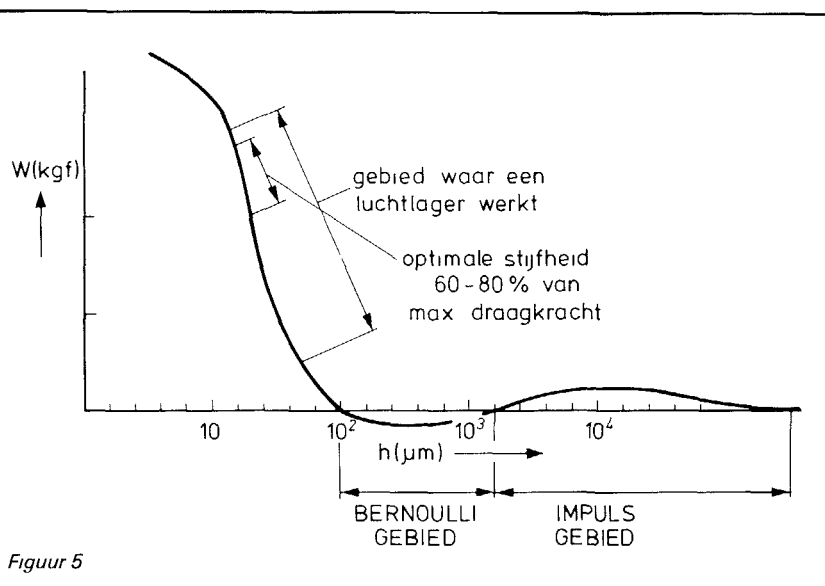
De eerste restrictie A1 wordt bepaald door het oppervlak van het gaatje

$$\frac{\pi}{4} d^2.$$

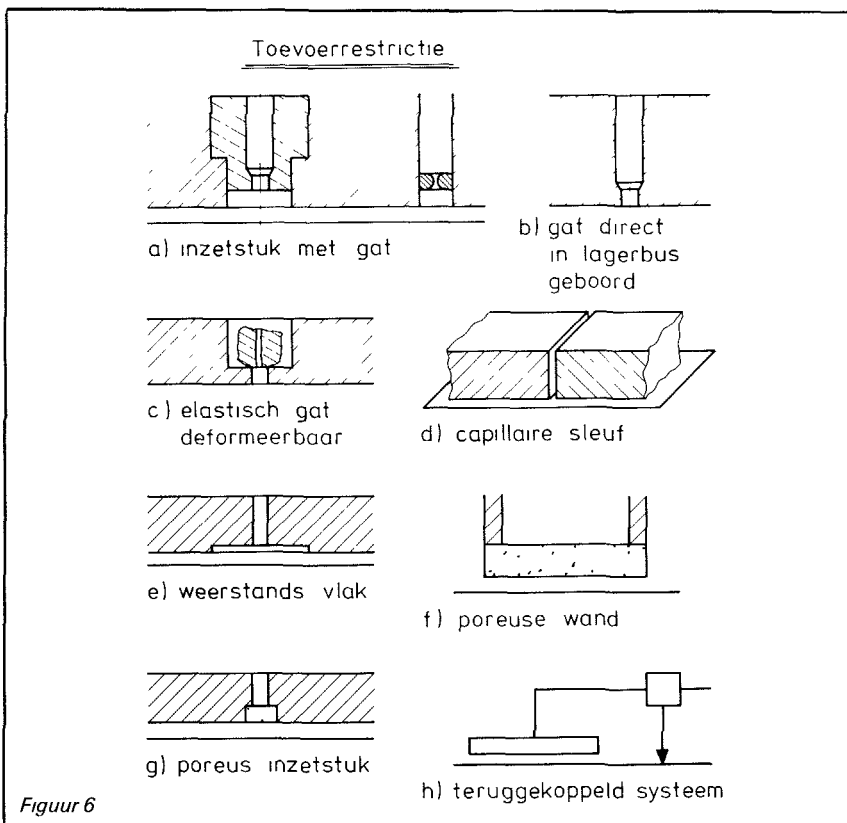
De tweede restrictie A2 wordt bepaald door het oppervlak van de mantel van de uitstromingscilinder $\pi \cdot d \cdot h$.

Afhankelijk van de bepalende restrictie noemen we het lager inherent of orifice gecompenseerd.

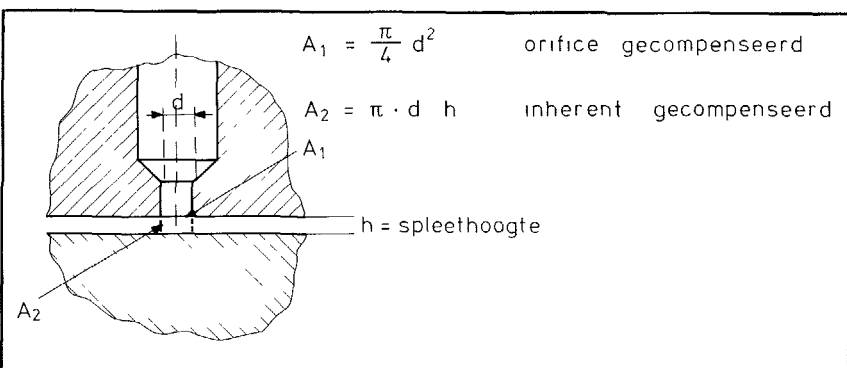
Elk lager waarbij met een hoogtevariatie van de lagerspleet ook de toevoerrestrictie verandert is een inherent gecompenseerd lager



Figuur 5



Figuur 6



Is de toevoerrestrictie onafhankelijk van de lagerspleetvariatie dan noemt men het lager orifice gecompenseerd.

De grote verschillen tussen orifice of inherent gecompenseerde lagers zijn de stijfheid en de stabiliteit

Een orifice gecompenseerd lager heeft een grotere stijfheid maar de kans op instabiliteit is groter

Vanwege deze slechtere stabiliteit kiezen we meestal voor het inherent gecompenseerde lager.

Lagervoeten:

Bij aerostatische lagers onderscheiden we verschillende vormen van lagervoeten die bij benadering opgebouwd zijn uit langwerpige of cilindrische vormen. De draagkracht, stijfheid en luchtverbruik kunnen analytisch exact worden bepaald.

Voor de gaatjeslagers zijn bovendien door de HH. Holster en Muijerman benaderingsformules opgesteld.

Figuur 8 toont een overzicht van de meest voorkomende lagervoeten.

Methoden van voorspannen:

We hebben gezien dat de maximale stijfheid van een aerostatische lager ligt bij 60-80% van de maximale draagkracht. Om de lagers in dit gebied te laten functioneren is het vaak noodzakelijk om ze voor te spannen.

Dit voorspannen kan op verschillende manieren gebeuren. (Fig. 9)

Door middel van:

- Een tweede aerostatisch lager
- Een massa
- Een vacuum

- Een permanent of electromagneet
Voorspannen door een tweede lager heeft als groot voordeel dat daardoor een dubbele stijfheid wordt verkregen. Nadeel is dat de constructie moeilijker is. Een radiaallager mag gezien worden als een lager dat met een tweede lager is voorgespannen.

Het voorspannen van een lager door middel van voldoende massa kan constructief zeer eenvoudig zijn. De grote massa vormt samen met het lager een massaveersysteem met een lage eigenfrequentie.

Ook wordt de massa draagbaarheid hierdoor verhoogd.

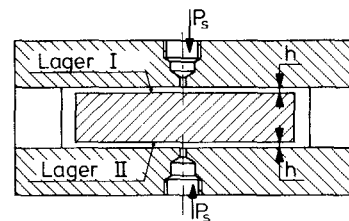
Beide kunnen een nadeel zijn.

Voorspannen van een lager met een kamer waarin onderdruk aanwezig is. Met dit type lager kan zeer licht en stijf worden geconstrueerd, waardoor de eigenfrequentie van het massaveersysteem zeer hoog kan zijn. Een nadeel kan zijn dat het oppervlak van de kamer groot moet zijn om een behoorlijke voorspan-

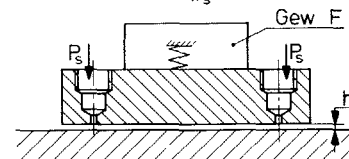
Diverse uitvoeringsvormen van lagervoeten					
geringe kantelstijfheid			met kantelstijfheid		benaming
					(vlakke) cirkelvormige lagervoeten
					(vlakke) langwerpige lagervoeten
					cilindrische lagervoeten
meestal inherent gecomp	orifice gecomp te maken	orifice gecomp te maken	meestal inherent gecomp	orifice gecomp te maken	compensatie methode
stabiel	grote kans op instab	kans op instab	stabiel	kans op instab	stabiliteit

FIG 8

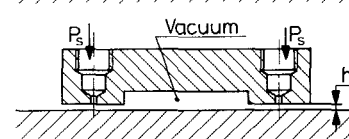
Methoden van voorspannen



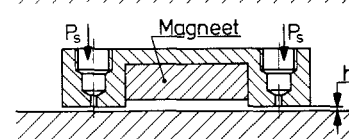
Lager I voorgespannen door lager II



Lager voorgespannen door gewicht of veer



Lager voorgespannen door vacuum



Lager voorgespannen door permanent- of electromagneet

FIG 9

ning te krijgen.

Voorspannen van lager met een permanent of electromagneet. Dit kan ook zeer licht geconstrueerd worden. De voorspankrachten kunnen per oppervlakte eenheid groter zijn dan bijvoorbeeld kamers met onderdruk.

Nadeel kan zijn: het aantrekken van ijzerhoudende stofdeeltjes.

Specifieke eigenschappen van aerostatische lagers (fig. 10)

- Door de volle film smering is er geen mechanisch contact. Daardoor heeft men in principe een grotere vrijheid in de materiaalkeuze. We moeten, daar waar mogelijk, toch materialen kiezen met goede droogloopeigenschappen.

- Door zuivere viskeuze wrijving hebben we geen stick-slip verschijnselen. Dit kan op zichzelf al een goede reden zijn om een aerostatisch lager toe te passen.

Eigenschappen van aerostatische lagere

- Door de volle film smering is er geen mechanisch contact, geen slijtage
- Zuiver viskeuze wrijving
- Uitmiddelen van vorm-onnauwkeurigheden
- Gering wrijvingsverlies
 - ↗ met kleine vermogens hoge snelheden
 - ↘ minder warmte ontwikkeling dan bijv hydrostatische lagere
- Toepasbaar zowel bij hoge als lage temperatuur
- Aerostatische lagere hebben geen speling

FIG 10

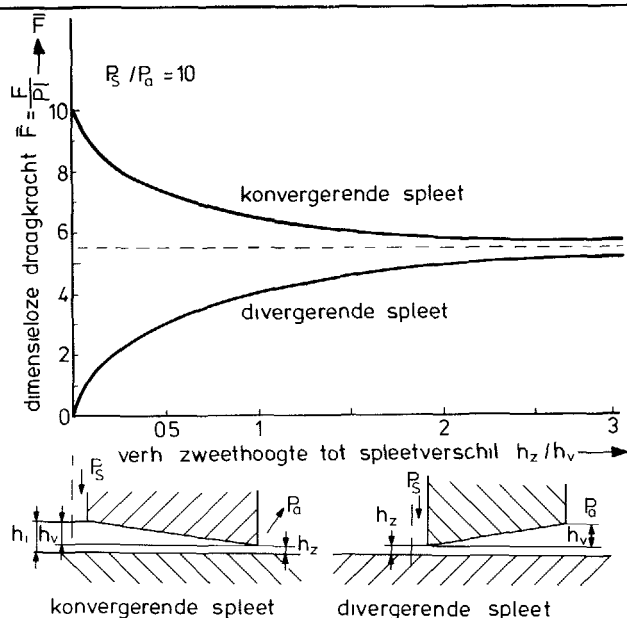


FIG 11

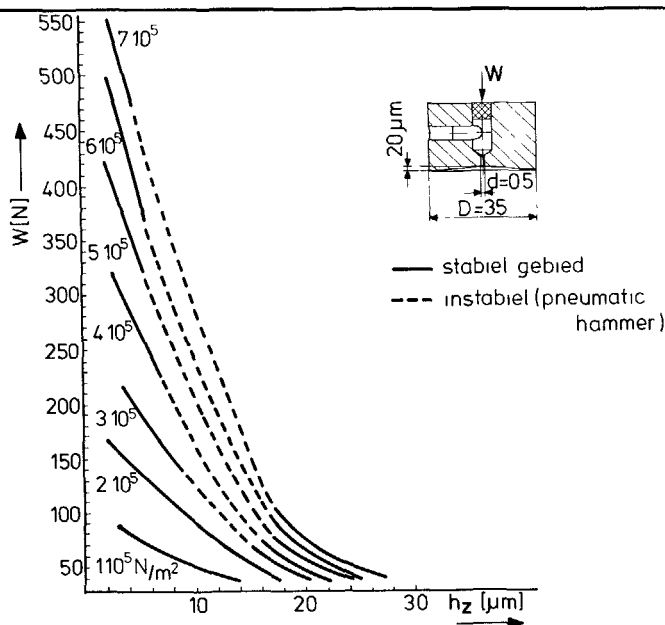


FIG 12

- Door de uitmiddelingseffecten worden hogere nauwkeurigheden bereikt.
- Er wordt algemeen aangenomen dat bij gaatjeslagere dit uitmiddelen een factor 10 is, dus bijvoorbeeld bij oneffenheden van $2 \mu\text{m}$ in het lager worden de bewegingsonnauwkeurigheden teruggebracht $0,2 \mu\text{m}$ naar $0,2 \mu\text{m}$.
- Door de geringe wrijvingsverliezen is het mogelijk om met betrekkelijk kleine vermogens hoge snelheden te bereiken. Dit is onder andere ten opzichte van hydrostatische lagere een groot voordeel. Door de geringe wrijvingsverliezen wordt ook veel minder warmte ontwikkeld, wat uiteraard de nauwkeurigheid ten goede komt. Omdat minder warmte wordt ontwikkeld, is een machine, geconstrueerd met aerostatische lagere, direct gebruiksklaar (geen opwarmtijd).
- Er hoeft geen recycling plaats te vinden, de gebruikte lucht kan naar de omgeving wegstromen.
- De lagere kunnen door voorgaande eigenschappen bij hoge en lage temperaturen worden toegepast.
- Een belangrijke eigenschap is nog dat aerostatische lagere geen speling hebben.

Nieuw ontwikkelde aerostatische lagere

Door de toenemende vraag naar aerostatische lagere zijn enige ontwikkelingen gedaan aan zowel axiaal- als radiaallagere

- Axiaallager met vaste conische lagerspleet.
- Radiaallager met vaste conische lagerspleet
- Axiaallager met drukafhankelijke lagerspleet.
- Radiaallager met drukafhankelijke lagerspleet.

Axiaallager met vaste conische lagerspleet

Figuur 11 toont 2 halve doorsneden van cilindervormige lagervoeten.

De grafiek geeft het verband weer tussen de specifieke draagkracht W en de verhouding zweefhoogte/spleetverschil. We maken onderscheid tussen convergerende en divergerende lagerspleten. We spreken van een convergerende lagerspleet als vanaf de luchttoevoer de lagerspleet kleiner wordt.

We spreken van een divergerende lagerspleet als vanaf de luchttoevoer de lagerspleet groter wordt.

Er zijn 7 metingen gedaan bij verschillende toevoerdrücken. Deze zijn uitgedrukt in $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$. De coniciteit is $20 \mu\text{m}$ over $17,5 \text{ mm}$. Bij een toevoerdruk van $1 \cdot 10^5$ en $2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ is het lager stabiel.

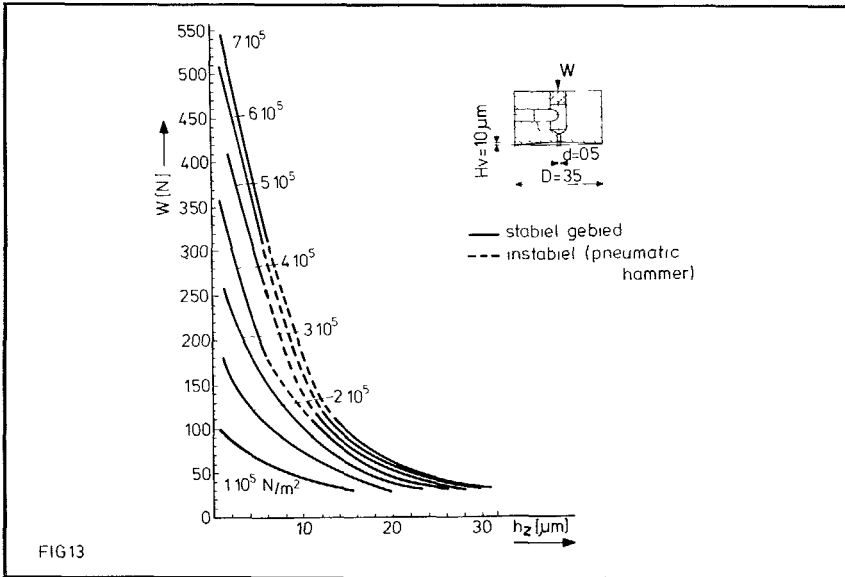


FIG 13

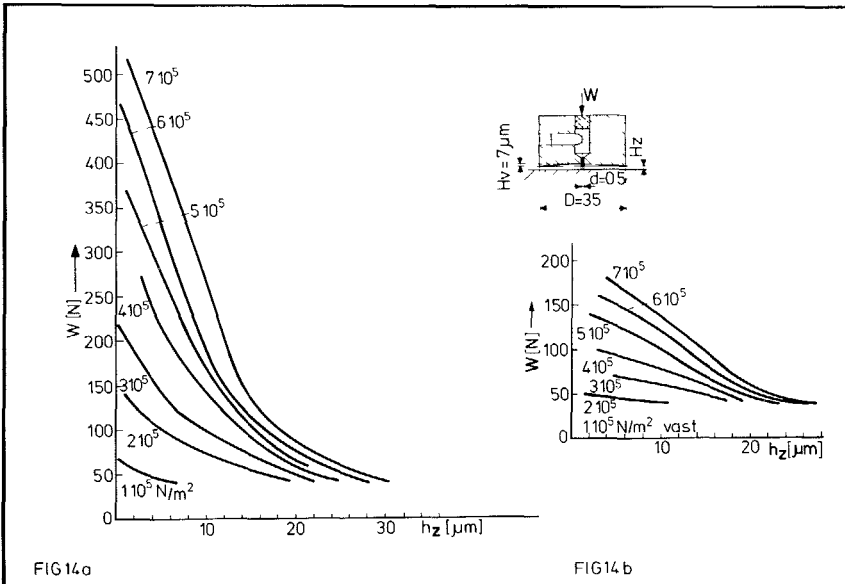


FIG 14a

FIG 14b

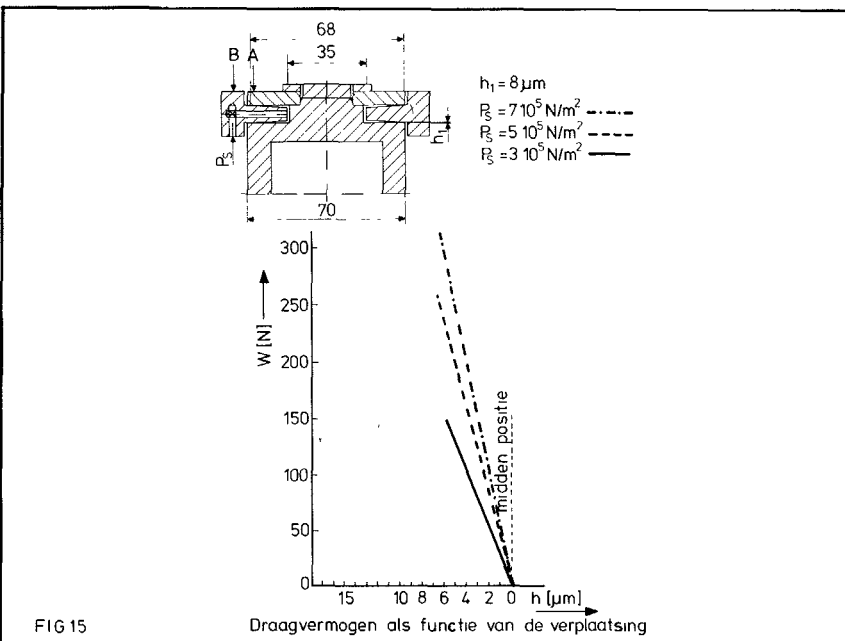


FIG 15

Bij alle andere drukken vertoont het lager instabiliteit. Om deze instabiliteit te vermijden is de coniciteit gewijzigd van $20 \mu\text{m}$ naar $10 \mu\text{m}$ over $17,5 \text{ mm}$. Figuur 13 is het resultaat. De instabiliteit is minder geworden, maar nog steeds aanwezig. In figuur 14a is alle instabiliteit verdwenen. De coniciteit is dan $7 \mu\text{m}$ over $17,5 \text{ mm}$. De grafiek (Fig. 14b) is een meting van een vlakke lagervoet. De draagkracht en stijfheid zijn aanzienlijk minder. Een bijzondere uitvoering van een axiaal conisch spleetlager is weergegeven in fig. 15. Het betreft hier een axiaal lager voorgespannen door een tweede lager. Ook de meetresultaten zijn in deze figuur weergegeven.

Radiaal lager met vaste conische lagerspleet:

De eigenschappen van de axiaal lagers met vaste conische lagerspleet zijn vervaardigd in een radiale uitvoering. Figuur 16 toont een schets en de meetresultaten van dit lager. De rondloopnauwkeurigheid was zeer goed: $< 0,05 \mu\text{m}$, ondanks het feit dat de rondheid van de as niet beter was dan $2 \mu\text{m}$. Dit type lager kan ook met veel voordeel worden toegepast als, om constructieve redenen, de luchttoevoer via de as moet gebeuren.

Axiaallagers met drukafhankelijk lagerspleet:

Lagers met drukafhankelijke lagerspleet zijn verder ontwikkeld, om hun eenvoud van vervaardigen, hun hoge draagkracht en stijfheid, gekoppeld aan een laag luchtverbruik. De vervaardiging van een axiaal lager gaat als volgt: van dikwandige membranen en afstandstukken wordt een doos geconstrueerd. Door druk in de doos aan te brengen komen de membranen enigszins bol te staan. Onder druk worden de membranen nu vlak afgewerkt. Afhankelijk van de druk in de doos zal een of meer of minder convergerende lagerspleet ontstaan. Een schets en meetresultaten zijn weergegeven in figuur 17.

Radiaal lager met drukafhankelijk lagerspleet:

Op soortgelijke wijze als bij axiaal lagers met een drukafhankelijke lagerspleet is een radiaal lager vervaardigd. Omdat de stijfheid van holle cilinders in radiale richting erg groot is, worden de flexibele wanden erg dun. Ook het vervaardigen is moeilijker dan bij de axiaal lagers. Dit alles weegt niet op tegen het grote

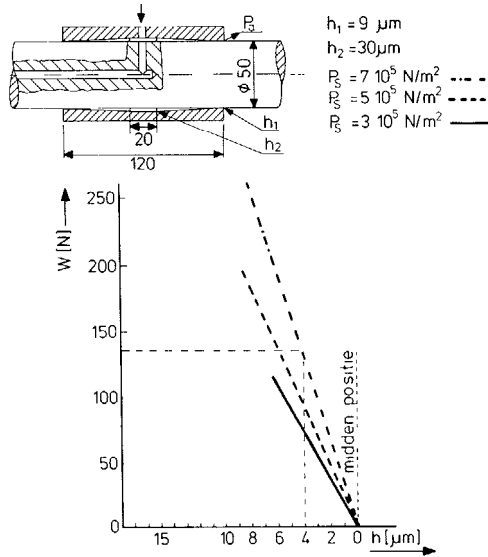


FIG 16 Draagvermogen als functie van de asverplaatsing

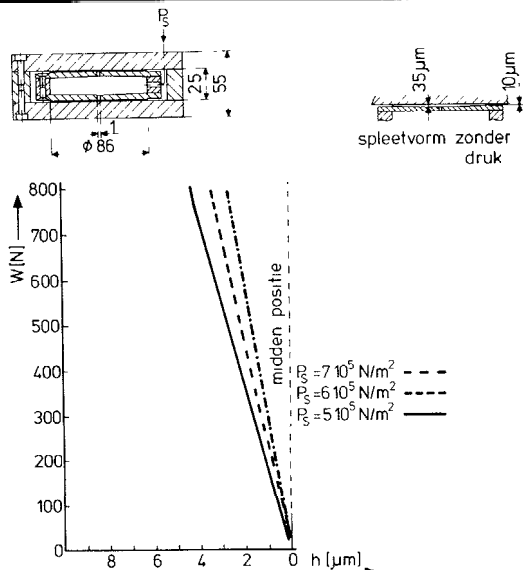
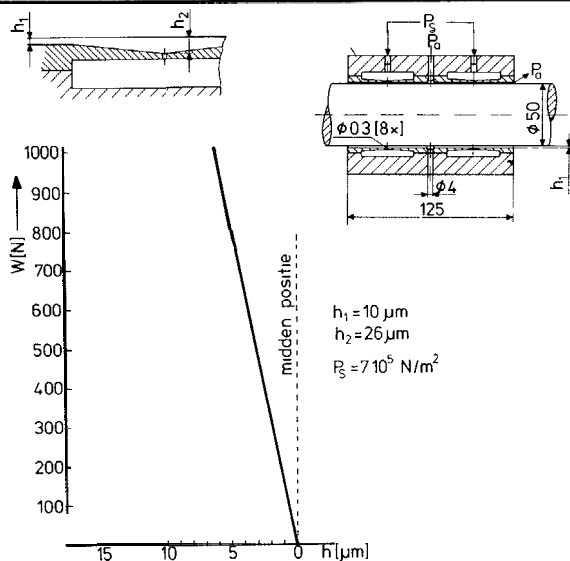


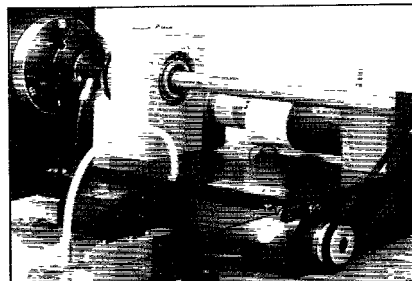
FIG 17 Draagvermogen als functie van de verplaatsing



oordeel, dat de stijfheid en draagkracht an deze lagere een factor 2 à 3 hoger zijn lan bij gaatjeslagere met hetzelfde volume en schets en meetresultaten zijn weergegeven in figuur 18.

Constructievoorbeelden:

Belichtingsapparaat voor vervaardiging van dunne film kanon, fig 19

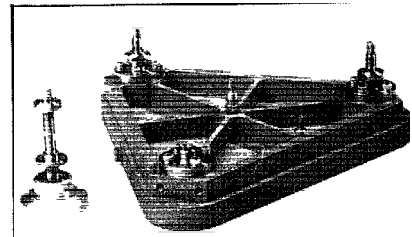


Toegepaste lagertype: Radiaal gaatjeslager

- 3-dimensionele magneetveld meetmachine voor T.V. afbuigspoelen fig. 20.

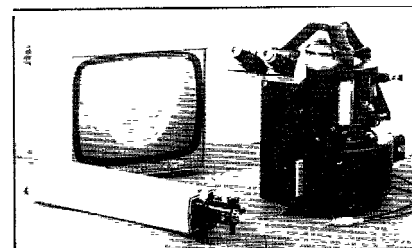
Toegepaste lagertypes:

- Radiaal gaatjeslager.
- Axiaal gaatjeslager voorgespannen door eigen gewicht.
- Radiaal poreuse wand lager.
- Lagervoet voor x-y sledes. fig. 21



Toegepaste lagertypes:

- Axiaal vast conisch spleetlager voorgespannen door kamer met onderdruk.
- Kotterbank voor fiber connectors, fig. 22.



Toegepaste lagertypes:

- Radiaal vast conisch spleetlager.
- Axiaal vast conisch spleetlager voorgespannen door 2de lager.

Literatuur

Formulas for stress and strain, R.J. Roark
Strength of Materials, S Timoshenko
Aerostatische lagere, E Blondeel
Collegedictaat inleiding tribotechniek, E A Muyderman