

Gaslagers: ontwerp

Met de huidige stand van de fabricagetechniek kunnen tegen beperkte kosten gaslagers worden gefabriceerd met zeer dunne luchtfilms. In combinatie met de vele gunstige eigenschappen van gaslagers mag worden verwacht dat deze de komende jaren steeds vaker zullen worden toegepast, ook in minder hightech-toepassingen. Aan de hand van de beschrijving van het ontwerp en de berekening van de in dit artikel beschreven gaslagers zullen de mogelijkheden van gaslagers duidelijk naar voren komen.

• *Dr.ir. A. van Beek TU Delft, Werktuigonderdelen en Tribotechniek* •

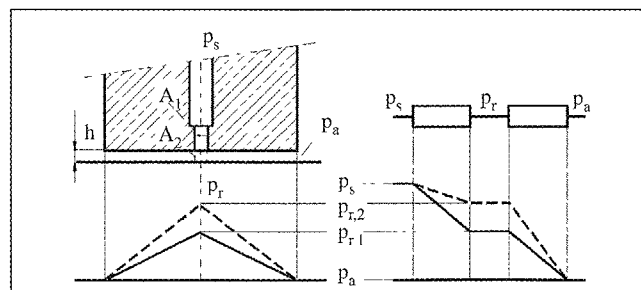
Het meest bekende voordeel van gaslagers is het ontbreken van contact waardoor er geen wrijving en geen slijtage optreedt. De levensduur van gaslagers is hierdoor onbeperkt en volledig onderhoudsvrij. In principe worden gaslagers gesmeerd met lucht waardoor vervuiling van de omgeving door smeermiddelen als olie en vet of slijtagegedeeltes niet voorkomt. Extreme omstandigheden als hoge temperaturen zijn geen enkel probleem. Met een zeer dunne luchtfilm wordt nog nauwelijks lucht verbruikt, en is het vrijkomen van verbruikte lucht niet of nauwelijks hoorbaar. Met gaslagers kunnen uiterst nauwkeurige bewegingen worden gerealiseerd doordat stick-slip ontbreekt, er geen vrije lagerspeling bestaat, een hoge stijfheid te realiseren is en geen mechanische trillingen worden opgewekt. Verder zijn zeer hoge bewegingssnelheden mogelijk door het ontbreken van rollichamen of warmteontwikkeling.

Na deze indrukwekkende lijst van voordelen wordt misschien een lijst met nadelen verwacht. De nadelen zijn echter zeer beperkt en liggen meer in het vlak van: anders dan het selecteren van kogellagers moeten gaslagers in het algemeen worden ontworpen en geoptimaliseerd

voor specifieke toepassingen. Hierbij worden hoge eisen gesteld aan de fundamentele kennis en creativiteit van de constructeur. In dit artikel zal deze beperking al voor een groot deel worden weggenomen.

Principe en werking van gaslagers

Bij de meeste gaslagers wordt perslucht via een zogenaamde voorweerstand tussen de te scheiden oppervlakken geperst, waarna dit aan de omtrek van het lager vrij komt (figuur 1)



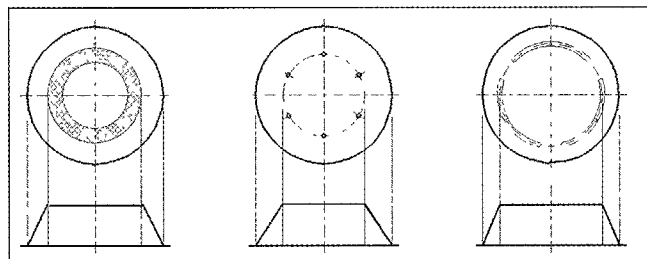
Figuur 1 Filmdruk bij twee verschillende belastingen.

en berekening

De gasdruk valt over de voorweerstand (Eng. restrictor) af van de toevoerdruk p_s (Eng. supply pressure) tot de druk na de voorweerstand p_r . Vervolgens valt de druk over de dunne film die gevormd is tussen de oppervlakken af tot de omgevingsdruk p_a (Eng. ambient pressure). Als gevolg van een toename in de belasting zullen de oppervlakken naar elkaar toe bewegen. Hierdoor neemt de stromingsweerstand door de dunne film toe, het debiet neemt af. Over de voorweerstand, gevormd door een stromingsweerstand zal de drukval afnemen. De filmdruk kan hierdoor het evenwicht met de nieuwe belasting herstellen (stippellijn in figuur 1).

De meest voorkomende voorweerstand worden gevormd door een viskeuze voorweerstand gevormd door een poreus materiaal, of door een traagheidsvoorweerstand gevormd door een kort gaatje (Eng. orifice). Bij een traagheidsvoorweerstand (figuur 1) wordt nog onderscheid gemaakt tussen een vaste traagheidsvoorweerstand waarbij oppervlak A_1 bepalend is voor de doorstroming en een inherente traagheidsvoorweerstand waarbij oppervlak A_2 bepalend is.

Bij een inherente traagheidsvoorweerstand is zowel de filmweerstand als de voorweerstand afhankelijk van de filmdikte (ongunstig). Immers, oppervlak A_2 is afhankelijk van de filmdikte. Doordat de filmweerstand evenredig is met de filmhoopte h^3 , terwijl de voorweerstand evenredig is met h , zal bij een kleinere filmdikte de filmweerstand toch toenemen ten aanzien van de voorweerstand. Echter, door de minder gunstige filmdikteafhankelijkheid van de inherente voorweerstand is de stijfheid die wordt verkregen circa 30% lager dan met de andere voorwestanden. Bij de vaste traagheidsvoorweerstand worden meerdere gaatjes aan het oppervlak veelal verbonden door sleufjes (figuur 2 rechts). Traagheidsvoorwestanden, zowel de

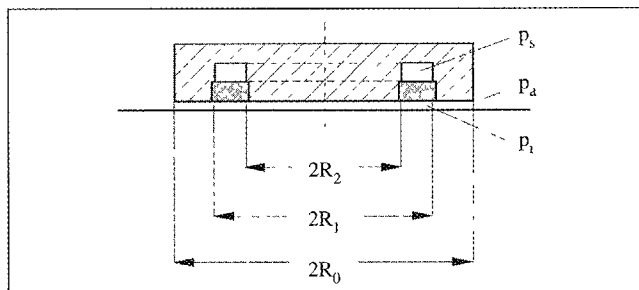


Figuur 2. Poreuze voorweerstand, inherente traagheidsweerstand, vaste traagheidsweerstand

vaste als de inherente voorwestanden, komen door de constructieve eenvoud het meest voor.

Berekening axiaal gaslager met poreuze voorweerstand

In figuur 3 is een axiaal gaslager weergegeven, bestaande uit een glad oppervlak waarvan een ringvormig gedeelte vervaardigd is uit een poreus materiaal. Via dit poreus materiaal wordt perslucht tussen de oppervlakken geperst. Hierbij worden de oppervlakken uit elkaar gedrukt waardoor een dunne luchtfilm ontstaat.



Figuur 3 Axiaal gaslager met poreuze voorweerstand.

De toevoerdruk p_s valt door de stromingsweerstand van het poreus materiaal af tot de filmdruk p_r . Voor de viskeuze massastroom door poreuze materialen geldt de empirische relatie 'wet van d'Arcy' [lit.1]

$$M = \frac{k_p A_p}{2s} \frac{p_s^2 - p_r^2}{\eta RT} \quad (1)$$

Hierin is A het poreus oppervlak, s de dikte en k_p de permeabiliteit of doorlaatbaarheid van het poreus oppervlak. De filmdruk valt vervolgens, afhankelijk van de stromingsweerstand van de film af tot de omgevingsdruk p_a . Voor een radiale stroming door een lange dunne parallelle film geldt [lit.1]:

$$M = \frac{\pi h^3}{12 \ln(r_0/r_1)} \frac{p_r^2 - p_a^2}{\eta RT} \quad (2)$$

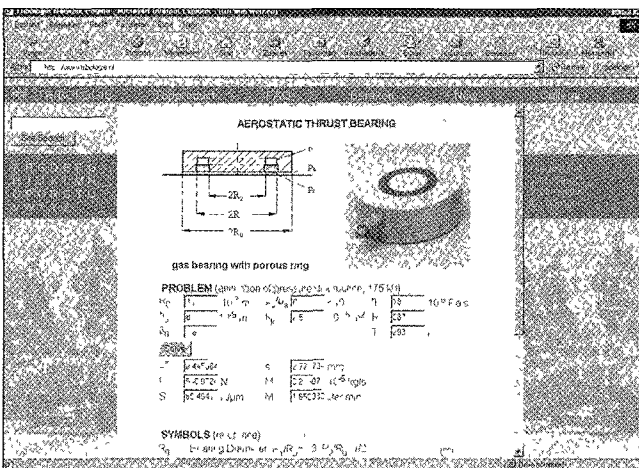
Om de drukverdeling in de film te berekenen wordt de stroming door de voorweerstand gelijkgesteld aan die

door de film. Uit de vergelijking die dan wordt verkregen wordt vervolgens de druk p_f na de voorweerstand opgelost.

In de film ter plaatse van het centrale gedeelte van het oppervlak vindt geen stroming plaats, waardoor daar een constante druk p_f heerst (figuur 2). De belasting die evenwicht maakt met de drukverdeling volgt uit de som van de druk op het centrale gedeelte en het ringvormig oppervlak. Uit het oppervlak onder de curve van de drukverdeling volgt voor de belasting die evenwicht maakt met de drukverdeling, als benadering:

$$F = A_e(p_f - p_a) \quad A_e = \pi \left(\frac{R_0 + R_1}{2} \right)^2 \quad (3)$$

Hierin is A_e het zogenaamde effectief oppervlak. Om de grootte van een willekeurig axiaal gaslager te bepalen kan als vuistregel uitgegaan worden van $F/A=0.3(p_s-p_a)$. Deze vuistregel is gebaseerd op een praktische waarde van de drukverhouding $\beta=(p_f-p_a)/(p_s-p_a)=0.6$ en een effectief oppervlak van circa 50%. Voor een meer nauwkeurige berekening wordt verwezen naar een eenvoudig programmaatje dat zonder installeren kan worden uitgevoerd. Dit programma is te vinden op www.tribologie.nl onder gaslaggers (figuur 4).



Figuur 4 Een van de gaslagerprogramma's beschikbaar via www.tribologie.nl.

Wanneer de belasting toeneemt zal de filmdikte kleiner worden waardoor ook de stromingsweerstand en de drukval over de film toeneemt. Hierdoor neemt de filmdruk p_f toe tot de maximale waarde p_s . Dit betekent dat de maximale belastbaarheid, waarbij voor het eerst

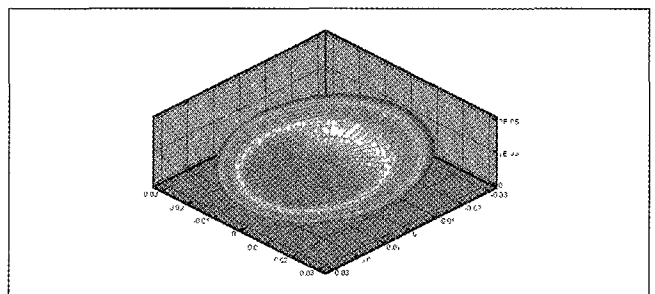
Voorbeeld 1: Ontwerp en berekening axiaal gaslager met poreuze voorweerstand:

Bereken van een axiaal gaslager de benodigde diameter, de grootte van het poreus ringvormig oppervlak (R_0) en het debiet wanneer gegeven is:

- $F = 600 \text{ N}$
- $R_1/R_0 = 2/3$
- $R_2/R_0 = 1/2$
- $p_s/p_a = 6$
- $p_a = 10^5 \text{ Pa}$
- $\beta = 0.6$
- $h = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- $k_p = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$
- $R = 287 \text{ m}^2/(s^2K)$
- $T = 293 \text{ K}$

De draagkracht kan dan worden benaderd door: $F = \pi ((R_0+R_1)/2)^2(p_f-p_a)$. Hieruit volgt de benodigde diameter van $2R_0=60 \text{ mm}$. Gekozen wordt voor $R_0=30 \text{ mm}$. Het debiet volgt uit verg.(2), $M=3.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$, omgerekend met de gaswet $PV=MRT$ levert dit een debiet van 1.65 liter/min. Na gelijkstellen van het debiet door het poreus oppervlak aan het radiaal debiet door de buitenring, kan de dikte van het poreus oppervlak s worden berekend, $s=2.77 \text{ mm}$.

Uit de berekening met de exacte drukverdeling volgt $F(h=8 \mu\text{m})=630 \text{ N}$ en $F(h=8.85 \mu\text{m})=600 \text{ N}$. De filmdikte verkregen met de benaderingsformule blijkt 10% groter dan met de meer exacte berekening!



Figuur 5. Drukverdeling bij scheefstelling.

mechanisch contact ontstaat ($p_f = p_s$) een factor 1/0.6 hoger ligt. De maximale belastbaarheid zal slechts gevonden worden bij een perfecte vlakheid en uitlijning. In figuur 5 is de drukverdeling gegeven die ontstaat wanneer het lager excentrisch wordt belast. De drukverdeling

past zich door scheefstelling automatisch aan waardoor opnieuw evenwicht ontstaat.

Berekening axiaal gaslager met traagheidsvoorweerstand

Voor de massastroom door een traagheidsvoorweerstand geldt [lit.1]:

$$M = C_D A p_s \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa-1)RT} \left[\left(\frac{p_L}{p_s}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_L}{p_s}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \left(\frac{p_L}{p_s}\right)_{krit} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa+1}}$$

Hierin is A het oppervlak A_1 voor de vaste traagheidsvoorweerstand of A_2 voor de inherente traagheidsvoorweerstand, C_D is de insnoeringscoëfficiënt en κ de isentroepexponent.

De berekening van het gaslager met traagheidsvoorweerstand verloopt gelijk aan de eerder beschreven berekening van het lager met poreuze voorweerstand, behalve dat voor het debiet door de voorweerstand een andere relatie geldt.

Voorbeeld 2: Ontwerp en berekening axiaal gaslager met traagheidsvoorweerstand.

Beschouw het axiaallager beschreven in voorbeeld 1, echter uitgevoerd met drie vaste traagheidsvoorweerden of zes inherente voorweerden als weergegeven in figuur 2.

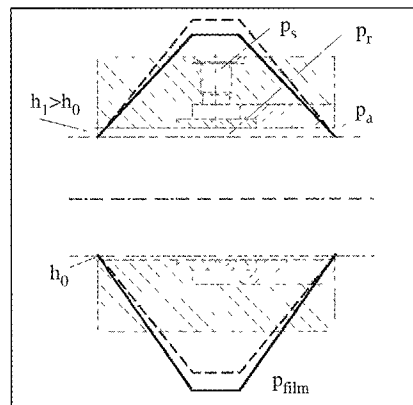
De draagkracht en het debiet zijn onafhankelijk van het type voorweerstand en kunnen dus overgenomen worden uit het voorgaande voorbeeld. Na gelijkstellen van het radiaaldebiet door de buitenring aan het debiet door de voorweerden kan de diameter d van de gaatjes worden berekend.

Met $\kappa=1.4$ voor lucht, $C_D=0.9$ voor $d/l=2$ [lit.1] en 3 vaste traagheidsvoorweerden volgt voor de diameter van de gaatjes, $d=0.073$ mm. Met 6 inherente traagheidsvoorweerden volgt voor de diameter van de gaatjes $d=0.084$ mm. Met dergelijke kleine gaatjes is de kans op verstopping groot. Er zal voor een grotere filmdikte gekozen moeten worden waardoor een eveneens groter debiet ontstaat. Hier blijkt direct de beperking van traagheidsvoorweerden bij zeer dunne luchtfilms

Ontwerp en berekening radiaal gaslager

De werking van het radiaal gaslager lijkt op een dubbel uitgevoerd axiaal gaslager. De persluchtdruk valt weer af via het poreus oppervlak en de dunne luchtfilm tot de omge-

vingsdruk. Wanneer de as onder belasting vanuit de concentrische positie excentrisch wordt gedrukt, dan neemt de stromingsweerstand van de luchtfilm ter plaatse van de minimale filmdikte toe. Dit resulteert lokaal in een toename van de drukval over de luchtfilm en dus een afname van de drukval over het poreus oppervlak. Aan de andere zijde van de as gebeurt dit net andersom. Er ontstaat een drukverdeling over de as als weergegeven in figuur 6.



Figuur 6 Drukverdeling bij excentrische aspositie

Bij een concentrische aspositie is de drukverdeling rondom de as gelijk (gestippelde curve). Deze positie zal slechts in onbelaste toestand voorkomen. Wanneer de as uit het midden wordt gedrukt, dan stelt de drukverdeling zich zo in dat er een kracht ontstaat, tegengesteld gericht aan de uitwijking. De as wordt teruggedrukt naar de concentrische positie. Het quotiënt van de kracht en de uitwijking ten gevolge van deze kracht wordt de stijfheid genoemd. Een hoge stijfheid heeft een relatief kleine verplaatsing tot gevolg.

Een voorweerstand als het poreus oppervlak blijkt nodig om de drukverdeling rond de as afhankelijk te maken van de uitwijking. Zonder voorweerstand zou de drukverdeling rond de as altijd overal gelijk zijn waardoor deze niet gecentreerd zou blijven. Om de afmetingen van de voorweerstand te berekenen wordt in concentrische positie de stroming door de voorweerstand gelijkgesteld aan die door de film. Voor een longitudinale stroming door een lange dunne parallelle film geldt [lit.1].

$$M = \frac{h^3 B p_s^2 - p_a^2}{24 L \eta RT} \quad (5)$$

Om de benodigde grootte van een radiaal gaslager in te schatten kan gebruik gemaakt worden van de vuistformule $F = 0.25 D^2 (P_s - P_a)$. De waarde 0.25 is gebaseerd op

een optimale drukverhouding $\beta=0.5$, een lagerbreedte $B=D$ en een belasting F waarbij de uitwijking van de as zo groot als de halve lagerspleet bij concentrische aspositie. Voor andere lagerbreedtes wordt verwezen naar lit.1 of het programmaatje voor radiale gaslagers dat te vinden is op www.tribologie.nl onder gaslagers.

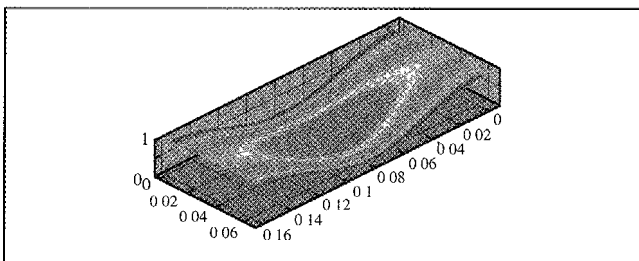
Omdat het luchtverbruik evenredig is met de lagerspleet tot de derde macht wordt deze zo klein als fabricage-

Voorbeeld 3: Ontwerp en berekening radiaal gaslager met poreuze voorweerstand:

Bereken van een radiaal gaslager met viskeuze voorweerstand (figuur 6) de afmetingen van de voorweerstand, het debiet en de draagkracht. Gegeven is

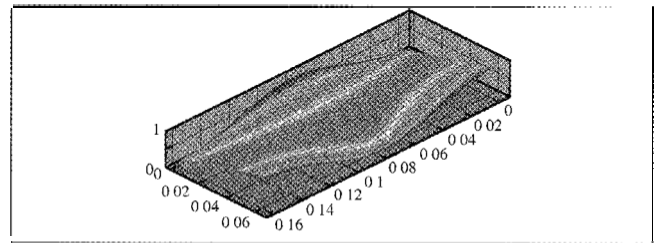
- $D = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $L_p = B/10$
- $\Delta R = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- $B/D = 1$
- $p_s/p_a = 6$
- $p_a = 10^5 \text{ Pa}$
- $\beta = 0.5$
- $\epsilon_{max} = 0.5$
- $F^* = 0.247$
- $k_p = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$
- $R = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$
- $T = 293 \text{ K}$

Gelijkstellen van het debiet door het poreus oppervlak aan het debiet door de parallelle film levert een vergelijking met als enige onbekende de dikte van het poreus oppervlak s die nu kan worden berekend, $s=3.6 \text{ mm}$. Het debiet volgt nu uit verg.(1) of (5), $M=4.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$, omgerekend met de gaswet $PV=MRT$ levert dit een debiet van 2.2 liter/min. Met de vuistformule voor F volgt voor de draagkracht $F=310 \text{ N}$.



Figuur 7. Drukverdeling radiaal gaslager bij excentrische aspositie.

technisch haalbaar is gemaakt. Verder moet rekening gehouden worden met stofdeeltjes en maatveranderingen die kunnen optreden door bijvoorbeeld temperatuurverschillen. Als vuistregel kan voor de lagerspleet worden uitgegaan van $\Delta R=1/2000 R_{as}$. Dit is half zo groot als bij zelfwerkende oliegesmeerde lagers gangbaar is

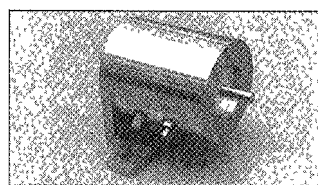


Figuur 8 Drukverdeling radiaal gaslager bij scheefstelling.

Wrijvingsloze persluchtcilinder

Conventioneel uitgevoerde persluchtcilinders met afdichtingen om de zuiger en om de as komen vaak met een schok in beweging. Dit is het gevolg van een hoge statische wrijving tussen de afdichting en de cilinderwand. Doordat de zuiger al een zekere tijd stil staat is het smeermiddel dat zich mogelijk op het oppervlak bevindt volledig uit het contact weggedrukt. Er is sprake van een zogenaamd droog contact met een hoge wrijving. Wanneer de zuiger in beweging komt kan het droge contact overgaan in een grensgesmeerd contact waarbij de wrijving lager is. Met het terugvallen van de wrijving zal de gecompriëerde lucht achter de zuiger expanderen waardoor de zuiger met een schok in beweging komt. Wanneer de persluchtcilinder zonder beweging of hooguit met een kleine beweging een constante kracht moet blijven uitoefenen, dan is dit door de statische wrijving of stick-slip niet mogelijk. Een variatie op de kracht ter grootte van 10 tot 20% van de toevoerdruk is niet ondenkbaar.

Een persluchtcilinder is een goed voorbeeld waarbij perslucht toch al aanwezig is en dus tevens kan worden benut



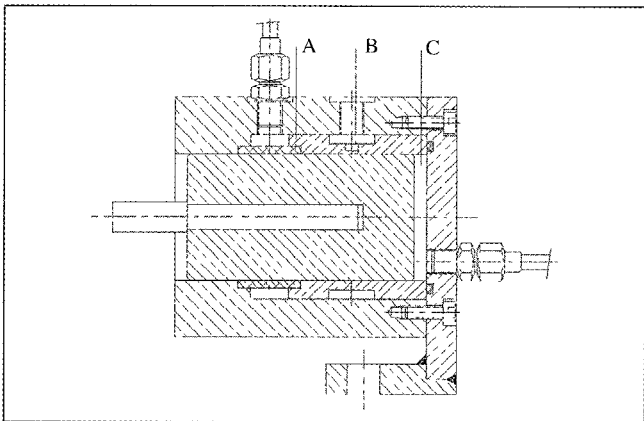
Figuur 9. Luchtgesmeerde, wrijvingsloos werkende persluchtcilinder, zuigerdiameter 50 mm, toevoerdruk 6 baro, radiale belasting tot 500 N, lagerspleet 10 μm , luchtverbruik gaslager 5 liter/min Totaal luchtverbruik persluchtcilinder bij maximale aandrukkracht van 1200N. 10 liter/min.

Conventioneel uitgevoerde persluchtcilinders komen vaak met een schok in beweging

om de interne wrijving te elimineren. In figuur 9 is een afbeelding gegeven van een persluchtcilinder die door luchtsmering volledig wrijvingsloos werkt

De wijze waarop de zuiger in de persluchtcilinder kan worden gecentreerd door perslucht is niet anders dan bij een radiaal gaslager. In de uitvoering zoals toegepast bij de persluchtcilinder wordt de perslucht via een poreus oppervlak (A) tussen de zuiger en de cilinder geperst (figuur 10)

De drukzijde rechts van zuiger (C), waarmee de effectieve zuigerkracht wordt aangebracht, is gescheiden van het gaslager door een ringvormige uitsparing in het oppervlak (B), die in open verbinding staat met de omgevingsdruk.



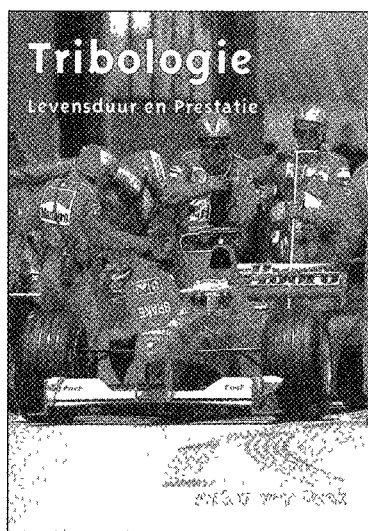
Figuur 10. Doorsnede tekening van de luchtgesmeerde persluchtcilinder.

Met enige aanpassingen in de bewegende massa van de zuiger bleek deze luchtgelagerde persluchtcilinder ook geschikt voor zeer hoge bewegingssnelheden (10 – 20 Hz). Bij conventionele persluchtcilinders werden de afdichtingen te warm waardoor een ernstige vorm van slijtage optrad met een zeer korte levensduur tot gevolg.

Slotbeschouwing

Het ontwerpen van gaslagers is een creatieve bezigheid. In dit artikel is slechts een beperkt aantal uitvoeringsvormen van voorweerstand gegeven. Door te werken met basisvergelijkingen heeft de constructeur goed inzicht in de parameters waarmee een optimaal ontwerp kan worden gerealiseerd.

Tot nu toe zijn gaslagers veelal daar toegepast waar zeer hoge eisen aan de bewegingsnauwkeurigheid gesteld worden. Er zijn tal van andere redenen om voor gaslagers te kiezen. Met de huidige stand van de fabricage-techniek vormen de hoge eisen aan de nauwkeurigheid van de onderdelen vaak geen belemmering meer. Hierdoor vormen gaslagers bij de keuze van lageringen en rechtgeleidingen een serieus alternatief.



Lit.1. De inhoud van dit artikel is ontleend aan hoofdstuk 10 van het boek *Tribologie, Levensduur en Prestatie*. In dit boek zijn tal van basisvergelijkingen terug te vinden waarmee de constructeur in staat is alle mogelijke geleidingen te ontwerpen en berekenen. Onderwerpen die verder in dit boek aan bod komen zijn: statisch en dynamisch draaggetal van punt- en lijncontacten onder invloed van tractie, tandwielen, beheersing van wrijving en slijtage, stick-slip, smeringsregimes, slijtvaste materialen en materiaalkeuze, eigenschappen en selectie van coatings, hydrodynamische en hydrostatische smering et cetera.

Prijs € 45.- Voor meer informatie of bestel gegevens zie www.tribologic.nl of mail a.vanbeek@wbmt.tudelft.nl en vraag naar de promotiefolder