

ERVARINGEN MET EEN HYDRODYNAMISCH PRECISIE-GLIJLAGER

G. Bakker

Philips' Natuurkundig Laboratorium Eindhoven.

Inleiding

De nauwkeurigheid waarmee een as zich beweegt in een hydrodynamisch glijlager blijkt afhankelijk van de grootte en de aard van zijn instabiliteit. De instabiliteit in het algemeen moet gezien worden als radiale variatie in de hartlijnpositie van de as of rotor.

Deze variaties – die in hoofdzaak voorkomen bij onbelaste lagers – zijn zeer hinderlijk als het een glijlager voor precisie doeleinden betreft, b.v. voor rondmeetapparatuur, waarbij de nauwkeurigheid van het meten direct afhankelijk is van de nauwkeurigheid van het lager.

Als één van de oorzaken van instabiliteit wordt in dit artikel gewezen op het zogenaamde $1/2 \omega$ -whirl effect.

Daarnaast wordt gewezen op de mogelijkheden die de grootte van het effect kunnen verkleinen. Zeer snel draaiende rotoren worden buiten beschouwing gelaten.

Vóór het starten van een roterende beweging bevindt zich de hartlijn van de as op een andere plaats in het lager dan na de start.

Gedurende de eerste omwentelingen beweegt de hartlijn van de as zich spiraalsgewijze in de richting van de hartlijn van het lager en vindt daar al of niet een stabiele positie afhankelijk van de radiale belasting en het toerental, zie figuur 1.

Deze positie is stabiel als de asbelasting en de rotatiesnelheid constant blijven. Vanaf dit moment kan het lager voor precisie doeleinden worden gebruikt.

De afgelegde weg van de hartlijn – de lengte van de spiraal – wordt tevens bepaald door het diameterverschil tussen de as en het lager, de speling.

Bij een grotere speling moet de as een groter aantal omwentelingen maken om een stabiele positie te bereiken.

Het $1/2 \omega$ -whirl effect.

Gedurende de tijd dat het instabiele verschijnsel optreedt, beweegt de hartlijn van de as zich met een snelheid die gelijk is aan de halve hoeksnelheid van de as, zie figuur 1.

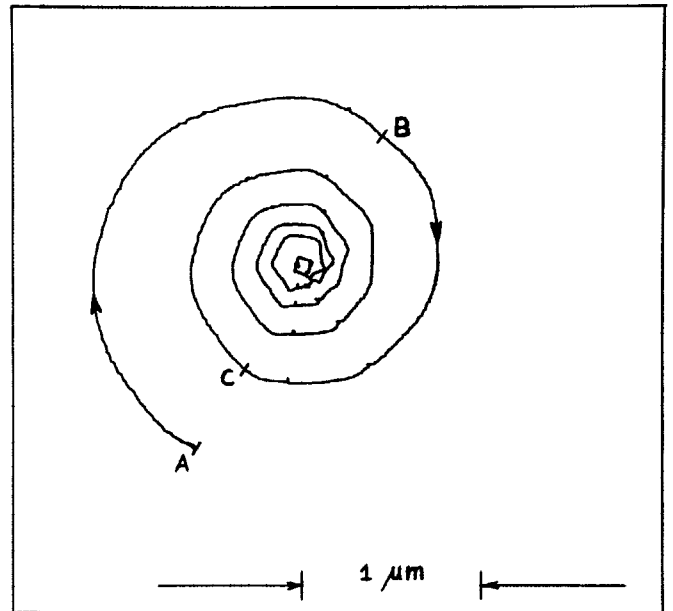
Beschouwen we een punt van deze hartlijn dan zien we dat dit punt zich gedurende de eerste omwenteling van de as verplaatst van A naar B, tijdens de tweede omwenteling van B naar C, enz. De spiraal gaat hier uiteindelijk over naar een gebied waarin de as stabiel beweegt. (A is de rusttoestand waarbij de as, t.g.v. zijn eigen gewicht, de lagerwand raakt.)

Bij vloeistof gesmeerde lagers heet dit verschijnsel 'oil whirl', 'oil whip' of ' $1/2 \omega$ -whirl' omdat de trillingsfrequentie ongeveer overeenkomt met de halve hoeksnelheid waarmee de rotor zich beweegt.

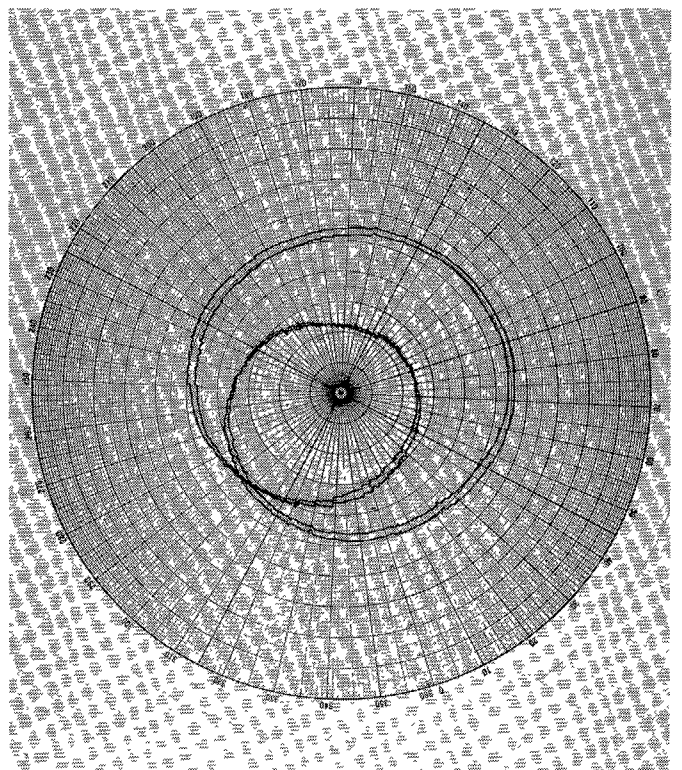
De $1/2 \omega$ -whirl kan zich manifesteren als een cirkelvormige baan waarvan de amplitude de totale speling kan bedragen.

In een hydrodynamisch precisie glijlager, zoals dit uitgevoerd is voor onze opstelling, is deze amplitude over het algemeen alleen maximaal tijdens de start.

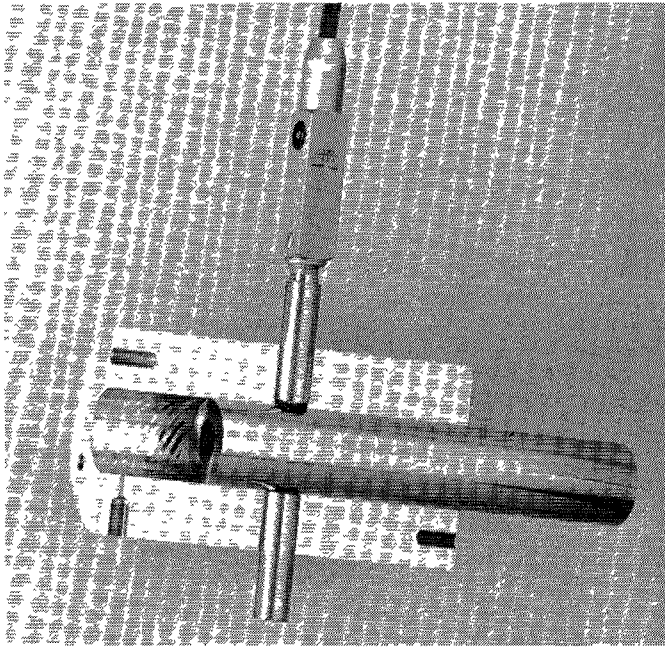
In figuur 2 zien we het effect van de $1/2 \omega$ -whirl bij vier asomwentelingen. De as is hier als meetas gebruikt. Aan de meetas is een taster bevestigd welke een cirkel-doorsnede van een object aftast. Na enige omwentelingen zal het $1/2 \omega$ -whirl effect verdwijnen en wordt een cirkel geschreven overeenkomende met de vorm en de fouten van het gemeten object.



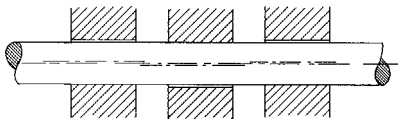
Figuur 1 $1/2 \omega$ -whirl, beschreven door een punt van de hartlijn.



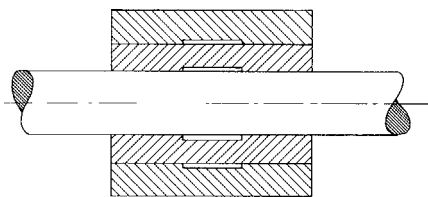
Figuur 2 $1/2 \omega$ -whirl beschreven door een willekeuring punt van de as.



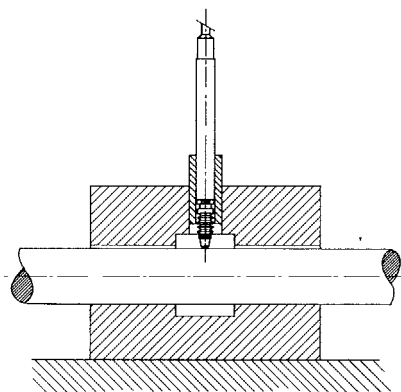
Figuur 3 Doorsnede van het lager met oliegroeven.



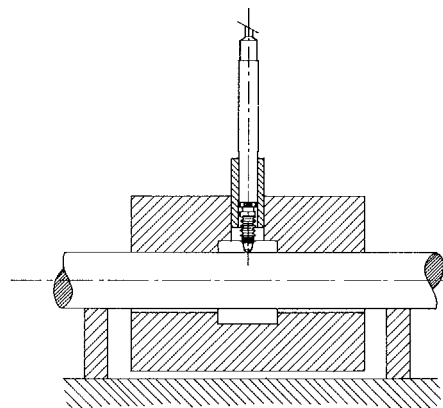
Figuur 4 Drie lagers in een 'overbepaalde positie'.



Figuur 5 As en lager gescheiden door een concentrische bus.



Figuur 6 Lager en as aanliggend op onderzijde.



Figuur 7 Lager en as aanliggend op bovenzijde.

De mogelijkheden die de instabiliteit kunnen verkleinen.

De mogelijkheden die de grootte van het $1/2 \omega$ -whirl effect kunnen verkleinen zijn:

- Het gebruik van spiraalvormige oliegroeven in de lagerwand of het asoppervlak, zie figuur 3.
In deze oliegroeven wordt, door het roteren van de as, een druk opgebouwd, waardoor de as eerder een stabiele positie in het lager kan bereiken.
Een juiste keuze van de groeven-geometrie levert een optimale radiale stijfheid. Het is juist deze stijfheid die bepaald of de beweging al of niet stabiel is.
Een grotere radiale stijfheid geeft een groter stabiel gebied.
- Een 'overbepaalde' lagerconstructie, zie figuur 4.
Hierbij zijn drie glijlagers zodanig opgesteld dat het middelste lager zich $1 \mu\text{m}$ buiten de hartlijn van de twee andere lagers bevindt.
Hierdoor ondervindt het lagersysteem een belasting die de stabiliteit bevordert.
- Een constructie uitgevoerd m.b.v. een zuivere concentrische bus, zie figuur 5. Deze bus wordt uitwendig voorzien van een lager. Inwendig van deze bus bevindt zich de as. Tijdens rotatie van de concentrische bus mag de as naar believen stilstaan of roteren. Startproblemen vanuit 'stilstand' van de as doen zich hierbij niet voor omdat er altijd een volledige oliefilm aanwezig is.

Proefopstelling.

Voor het maken van een proefopstelling is gekozen voor het gebruik van een spiraalgroeven-patroon in de lagerwand. Hierbij moet het diameterverschil tussen as en lager - de speling - aan zeer nauwe toleranties voldoen:

- De evenwijdigheid van de as moet $< 0,25 \mu\text{m}$., de afwijking op de rechtheid $< 0,5 \mu\text{m}$. en de afwijking op de rondheid $< 0,1 \mu\text{m}$. zijn.
- De evenwijdigheid van het lager moet $< 0,5 \mu\text{m}$., en de afwijking op de rondheid $< 0,2 \mu\text{m}$. zijn.
- De speling of het diameterverschil van as en lager bedraagt $2 \mu\text{m} \pm 0,25 \mu\text{m}$.

Er is uitgegaan van een lagerbus waarin de meetmogelijkheden zijn opgenomen, zie figuur 6, 7, 8 en 9. In deze lagerbus is een 'Tesa'-opnemer aangebracht.

In de figuur 6 ziet u eerst de as in het lager aanliggen op de onderzijde, vervolgens wordt de as ondersteund waardoor het lager verplaatst zodat de as nu aan de bovenzijde aan ligt, zie figuur 7.

De speling is direct afleesbaar op een afleesinstrument. Deze meting geeft geen informatie over de evenwijdigheid van de speling.

Voor dit doel echter moet de as eerst aan de ene zijde, zie figuur 8, daarna aan de andere zijde, zie figuur 9, opgetild worden. Ter correctie van de afwijkingen op de evenwijdigheid van de speling is het vaak voldoende de as in het lager om te keren.

Tenslotte kan men de as op rechtheid controleren door deze tijdens de meting te laten roteren in het lager.

De reproduceerbaarheid bij het herhalen van de metingen geven een goede indruk van de betrouwbaarheid.

Als as en lager nauwkeurig voldoen aan de vereiste geometrie, kan de as, na enige ervaring, gemakkelijk gemonteerd worden bij een diameterverschil van $1 \mu\text{m}$. Eventueel kan men het lager ca. 10°C verwarmen om de montage te vergemakkelijken.

Om het lager te testen en het gedrag ervan te bestuderen is een proefopstelling gemaakt op een granieten vlakplaat, in de meetkamer, zie figuur 10 en 11.

Het lagerhuis is opgenomen in een V-blok. De as is axiaal opgevangen met een houten taats op een gelepte nippel, terwijl de axiale speling magnetisch wordt voorkomen.

De aandrijving van de as vindt plaats d.m.v. snaarschijven en riemen. Door het gebruik van drie snaarschijven kan de as geheel worden ontlast van riemspankrachten.

Voor de proef is de as belast met gewichten variërend van $-\frac{1}{2}$ tot $+10 \text{ kg}$ per lagerdeel, de totale belasting is dus -1 tot $+20 \text{ kg}$. Deze belasting is op de as afgesteund m.b.v. kogellagers om radiale storingen te voorkomen. De belasting wordt verder afgesteund met katrollen welke zijn aangebracht op een brug. Het lager is voorzien van twee Tesatasters welke loodrecht op de as, maar t.o.v. elkaar onder een hoek van 90° zijn aangebracht. Hiermede kunnen verplaatsingen geconstateerd worden van de as in verticale richting 'x' en in horizontale richting 'y'.

De x en de y richtingen zijn afzonderlijk aangesloten op lineaire recorders en bovendien samen op een polair-recorder.

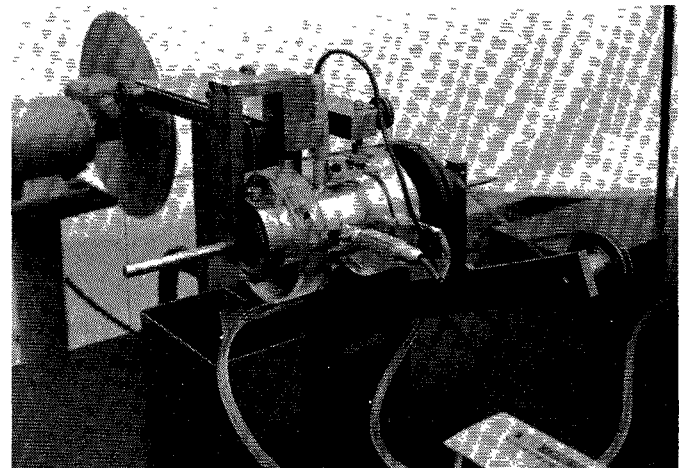
Hiermede kan het schijnbare middelpunt in een diagram opgetekend worden. Het schijnbare middelpunt is gelijk aan het asmiddelpunt, vermeerderd met de afwijking van de as op rondheid, rechtheid en doorbuiging.

Het aandrijven van de as vindt plaats met snelheden van 1 tot 40 omw./min., terwijl oliesoorten zijn gebruikt variërend in viscositeit van 1,2 tot 3°Engler bij 20°C .

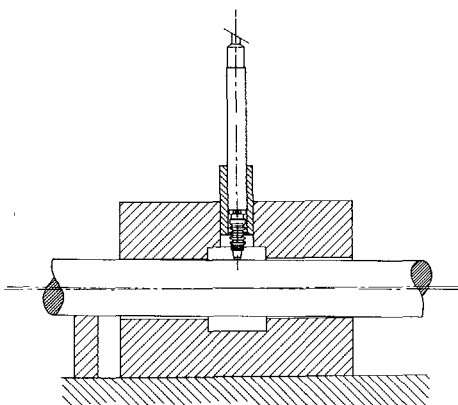
Tenslotte is de as, tijdens rotatie, altijd van de lagerwand gescheiden door een oliefilm wat d.m.v. een elektrische meting geconstateerd werd.



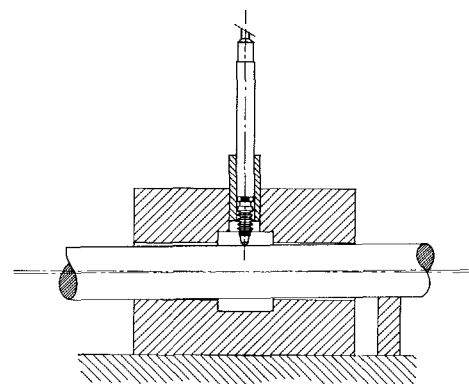
Figuur 10 Proefopstelling op vlakplaat.



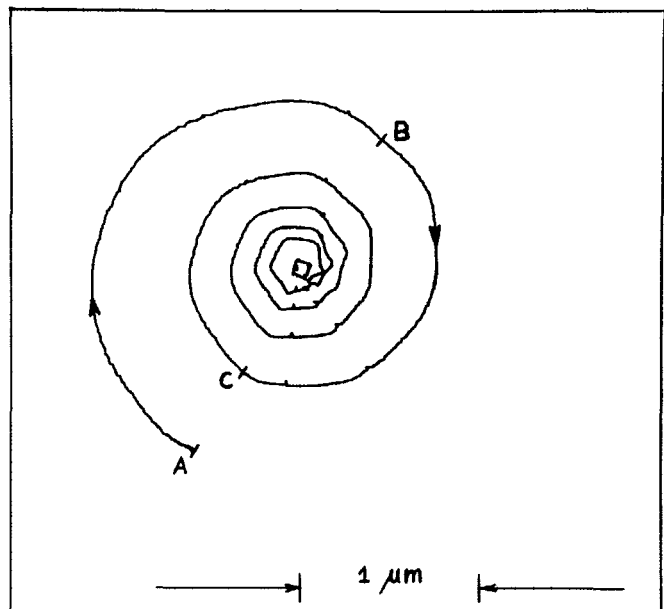
Figuur 11 Detail proefopstelling.



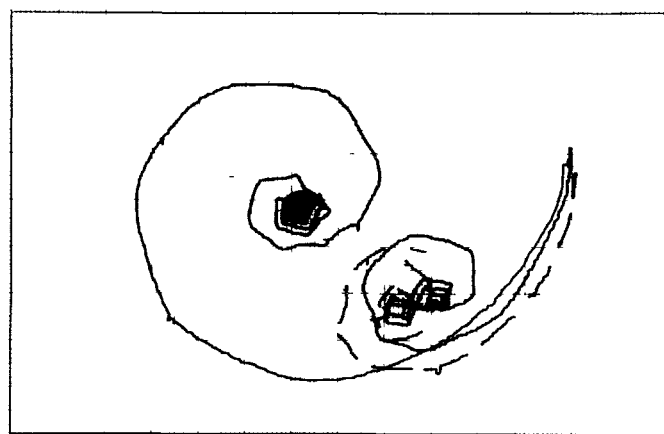
Figuur 8 Lager en as aanliggend 'in klokrichting'.



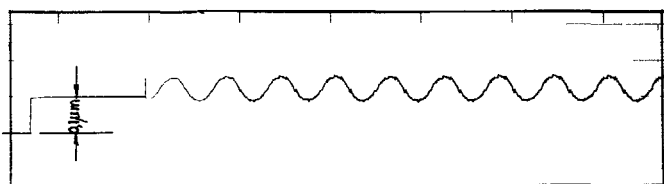
Figuur 9 Lager en as aanliggend 'tegen klokrichting'.



Figuur 1 $\frac{1}{2}$ -whirl, beschreven door een punt van de hartlijn.



Figuur 14 $\frac{1}{2}$ ω -whirl effect bij verschillende as-belastingen.



Figuur 15 Resultante asafwijkingen totaal 0,03 μm .

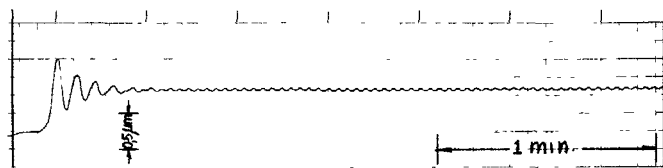
OVERZICHT VAN IN 'MIKRONIEK' GEPUBLICEERDE BIJDRAGEN OVER PRECISIE-LAGERINGEN.

Nr. II, 1968, BLZ. 246-256: 'Luchtgesmeerde standaardlagers voor precisie-slijpmachines'; voordracht Tweede intern. congres Fijnm. Techn. Delft 1968 door J. N. Tittle, Churchil Machine Works.

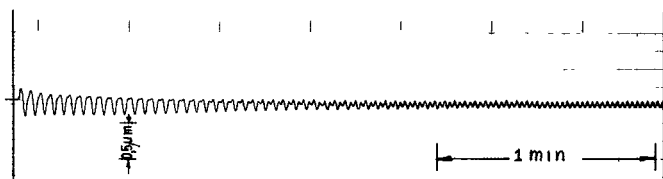
Nr. 1, 1969, blz. 2-12: 'Principes, eigenschappen en mogelijkheden van de smeerfilm in lagers en geleidingen' door Ir F H. Theyse, Werkspoor N.V. Amsterdam.

Nr. 4 1969, blz. 78-88 en nr. 5, blz. 104-112: 'Een hydrostatisch gelagerde en aangedreven precisie-draaibank' door Ir. H. J. J. Kraakman, J. G. C. de Gast en G. H. Veldhuizen, N. V Philips' Gloeilampenfabrieken.

Nr. 11, 1969, blz. 248-251: 'Precisie-draaibank met hydrodynamische hoofdaslagering' door H. J. Akkerman, Inst. Kernfysisch Onderzoek, Amsterdam.



Figuur 12 Snelle amplitude afname van de $\frac{1}{2}$ ω -whirl.



Figuur 13 Verandering van de periode van de $\frac{1}{2}$ ω -whirl.

Resultaten.

Figuur 1 laat, uitgaande van een stilstaande as, de middelpuntsverplaatsing zien tijdens de rotatie. Het $\frac{1}{2}$ ω -whirl effect bereikt een bepaalde minimum waarde waardoor in de grafiek een cirkelvormig centrum ontstaat.

De figuren 12 en 13 laten hetzelfde zien, maar nu lineair. Bij de kleinste waarde van het $\frac{1}{2}$ ω -whirl effect zien we hier een golflijn waarvan de amplitude overeenkomt met de diameter van het cirkelvormig centrum in de grafiek geschreven op de polair recorder. Figuur 14 laat zien dat dit centrum verplaatst bij wisselende belastingen op de as.

Bij al deze metingen is het effect van het doorbuigen van de as niet geheel te verwaarlozen. Tevens rusten de verplaatsingsmeters op de omtrek van de as. Een verplaatsing van de omtrek van de as in x en y richting komt niet geheel overeen met de verplaatsing van het middelpunt van de as in de x en y richting. Zij zijn direct afhankelijk van de rondheid en de rechtheid van de as.

De figuren 12 en 13 laten tevens zien dat van het $\frac{1}{2}$ ω -whirl effect niet alleen de amplitude de waarde nul nadert maar dat ook de frequentie op een gegeven moment overeenkomt met het toerental van de as.

Hiervan geeft figuur 15 een resultante waarvan de as-afwijkingen op rechtheid en rondheid de belangrijkste factoren zijn. Deze resultante of rest-amplitude is max. 0,06 μm , zodat, als invloed van de afwijkingen op de rondheid, per definitie niet meer dan

$$\frac{0,06}{2} = 0,03 \mu\text{m}$$

Literatuur.

1. On the stability of rotor and bearing systems J. P. Reinhoudt, Dissertatie 1972, Eindhoven.

2. Holmes, R. 'Instability Phenomena due to Circular Bearing Oil Films'. Journal of mech. Eng. Sc., Vol. 8, No. 4, pp 419-425. 1966.

Nr 12, 1969, blz 267-277 en nr. 1, 1970, blz. 2-9: 'Hydrostatische fixatie van de beitel bij gereedschapswerktuigen' door Dr. J. B. Hunt, Dep. Mech. Eng. Univ. Southampton. (in het bijzonder over de dempings-eigenschappen van precisie-lageringen)

Nr. 6, 1972, blz. 156-158: 'Viscoseal' door Dr. Ir. G. G. Hirs en J. Oprel, TNO-Delft.

Nr 11, 1972 blz. 317-322: 'Aspecten van de fijnmechanische werkplaats' door N. J. Minekus, TH-Delft. (over de vervaardiging van precisie-lagers)

Nr. 10, 1974, blz. 209-211: 'Het gebruik van benaderingsformules bij het dimensioneren van een in de praktijk toegepast aerostatisch lager' door C. R. van der Laan, TH-Twente.