

# Stijfheidsloos magneetlager voor trillingsgeïsoleerd positioneren

**Gert-Jan Nijse.** De vraag naar steeds hogere nauwkeurigheid voor mechanische geleidingen noodzaakt de constructeur zijn positioneersysteem te ontkoppelen van de omgevingstrillingen. Vaak gebeurt dat door de hele constructie op een trillingsisolatietafel te plaatsen of op te hangen aan lange veren. Deze oplossingen zijn echter vaak omvangrijk en/of kostbaar.

Het is ook denkbaar de trillingsisolerende eigenschappen te integreren in de lagering, wat vooral interessant kan zijn voor nauwkeurige magnetische lagers. Het hier beschreven permanentmagnetische lagerelement zonder stijfheid berust op een door de TU Delft gepatenteerd idee en is in staat forse gewichten te dragen (tot honderden Newtons) gecombineerd met minimale overdracht van trillingen.

Figuur 1. **Waarom stijfheid nul?**

Met behulp van nulstijfheid actuatoren kan een object gelagerd worden zonder (storende) positiekoppeling met de omgeving. Daarnaast kan de positie van het object regeltechnisch gekoppeld worden aan de positie van elke willekeurige referentie. Op deze wijze wordt een volledige scheiding van kracht en positie bereikt.

Het doel van trillingsisolatie is het minimaliseren van de overdracht tussen de omgevingstrillingen en de objectverplaatsingen. Als wordt aangenomen dat het te lageren object een massa  $M$  heeft en de lagering beschouwd kan worden als een veer-demper combinatie, dan is een manier om deze overdracht te minimaliseren het verlagen van de eigenfrequentie  $\omega = \sqrt{k/M}$ . Het zal duidelijk zijn dat er principieel twee mogelijkheden zijn om deze eigenfrequentie naar nul te krijgen: maak de massa  $M$  oneindig groot of maak de veerstijfheid  $k$  gelijk aan nul. De eerste optie is in de praktijk niet mogelijk, de tweede wel.

De manier om  $k=0$  te realiseren is het opwekken van een positie-onafhankelijke kracht. Dat wil zeggen, het genereren van een kracht  $F \neq 0$  terwijl

$\partial F / \partial x = 0$ . Als tevens de demping nul is, wordt de kracht naast positie-onafhankelijk ook snelheids- en versnellingsonafhankelijk, zie figuur 1.

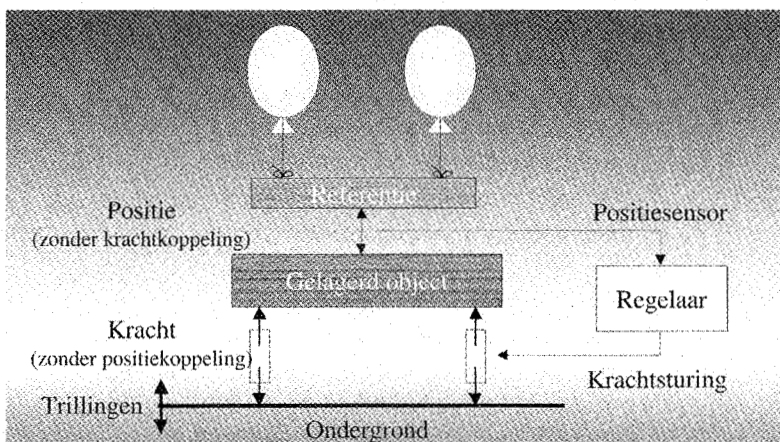
## Mogelijke realisaties van stijfheidsloze lagers

Er zijn uit de literatuur enkele constructies bekend die inherent stijfheidsloos zijn, m.a.w. die een kracht kunnen leveren onafhankelijk van de plaats van het te lageren object ten opzichte van de ondersteunende constructie. Deze realisaties zijn gebaseerd op de volgende principes:

- Contramassa; met dit principe wordt een indifferent evenwicht verkregen over een groot positiebereik. Echter, trillingen van de ondersteuning (bijvoorbeeld een katrol) worden zowel aan de contramassa als aan het te lageren object doorgegeven, zodat het niet bruikbaar is voor trillingsisolatie.

- Lorentzkracht; toegepast in 'luidspreker'- of 'voice coil' actuatoren. De Lorentzkracht  $F_L = BIl$ , onafhankelijk van de verplaatsing  $z$  zodat  $\partial F / \partial z = 0$ , onder voorwaarde dat  $\partial B / \partial z = 0$  en  $I$  constant. Echter, voor grotere lagerkrachten wordt warmteontwikkeling een probleem.

Compensatie van positieve en negatieve veerstijfheid; uitvoeringsvormen zijn bekend met bladveren, trek- en drukveren en membraanveren. Nadelen zijn de kritische afstelling en de beperkte bandbreedte door

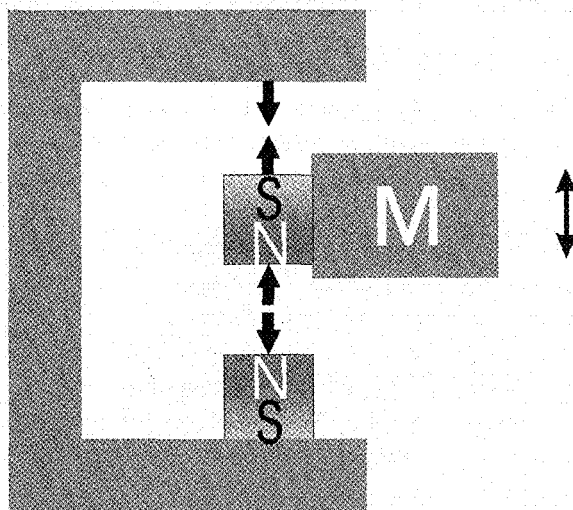


interne eigenfrequenties van de veren. Compensatie van positieve en negatieve veerstijfheid met permanente magneten; deze variant wordt in dit artikel besproken.

### Werkingsprincipe

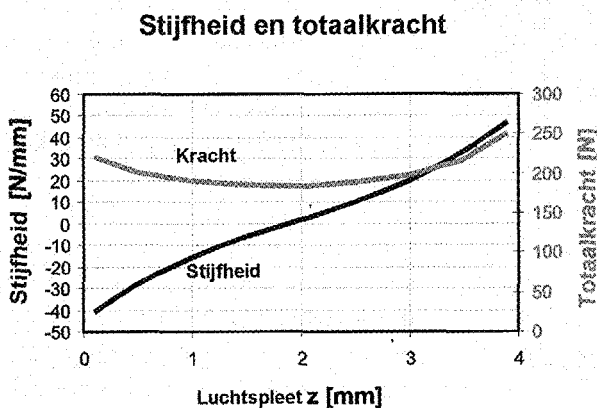
De werking van het permanentmagnetische lagerelement met nulstijfheid berust op het compenseren van positieve met negatieve veerstijfheid, zoals weergegeven in figuur 2. De vast opgestelde permanente magneet oefent een omhooggerichte kracht uit op de vrije magneet, terwijl deze tevens een omhoogge-

Figuur 2. Principeschets van het permanentmagnetische stijfheidsloze lagerelement. De aantrekkende kracht (boven) en de afstotende kracht (onder) hebben respectievelijk een negatieve en positieve stijfheid die in een bepaald punt elkaar zullen compenseren.



richte kracht ondervindt naar het ijzeren juk toe. De totale kracht op de vrije magneet is dus altijd omhooggericht, terwijl in een zeker punt de positieve veerstijfheid van de afstotende magneten en de negatieve veerstijfheid van de aantrekkende magneet elkaar zullen opheffen. Dit is weergegeven in figuur 3. Een praktische uitvoering van dit idee kan er bijvoorbeeld uitzien zoals in figuur 3. Aan het middel-

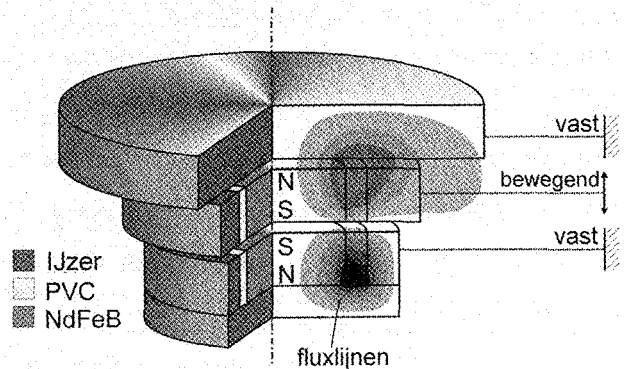
Figuur 3. De totale kracht die op de vrije magneet in figuur 1 wordt uitgeoefend heeft een minimum waar dus de afgeleide – dus de stijfheid – nul is. De waarden in deze grafiek zijn verkregen uit eindige-elementen berekeningen aan het model uit figuur 3.



ste, vrij beweegbare, deel wordt dan het te lageren object bevestigd.

### Resultaten

Uit proeven en simulaties met tamelijk willekeurig gekozen afmetingen (zie figuur 4: NdFeB magneten Ø25 x 10 mm, luchtspleet boven en onder 2 mm)



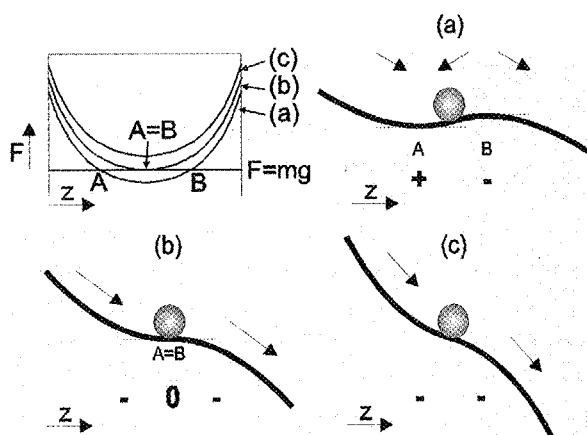
Figuur 4. Experimenteel model, bestaande uit twee NdFeB magneten en ijzeren fluxgeleidingsringen. De middelste schijf is beweegbaar, het bovenste en onderste deel is bevestigd aan de vaste wereld. Rechts in de figuur zijn de magnetische fluxlijnen afgebeeld die verkregen zijn met behulp van een eindige-elementen analyse.

volgt dat de totale draagkracht in het werkpunt ongeveer 185 N bedraagt. Rondom het werkpunt, waar de stijfheid theoretisch exact gelijk aan nul is, varieert de stijfheid nagenoeg lineair met de positie zodanig dat voor een gebiedje van ±5 mm de stijfheid overal kleiner zal zijn dan ±55 N/m. Dat betekent dat een object met een massa van 18.9 kg (overeenkomend met een lagerkracht van 185 N) een eerste eigenfrequentie zal hebben van  $\sqrt{55/185}=0,27$  Hz. Ter vergelijking: als dezelfde massa wordt opgehangen aan een spiraalveer met dezelfde stijfheid zal er een veerverlenging moeten optreden van  $185 [N]/55 [N/m] = 3,4$  m! Bij deze waarden moet worden opgemerkt dat de geleverde kracht ruwweg kwadratisch evenredig is met de grootte van de luchtspleet en eveneens kwadratisch evenredig is met de diameter van de magneet (ofwel, evenredig met het pooloppervlak).

### Stabiliteit en regeling

Zoals uit de grafiek van figuur 3 afgeleid kan worden, zal het systeem als het zich precies in het werkpunt bevindt randstabiel zijn. Voor naar beneden gerichte verstoringen zal de afstotende magneet-

Figuur 5.  
Analogon voor de stabiliteit rond het werkpunt. De horizontale beweging van de kogel correspondeert met de verplaatsing  $z$  in figuur 1 – 3. Er ontstaan respectievelijk twee, een en nul evenwichtssituaties.



kracht gaan overheersen en is er een stabiliserende terugstelkracht, maar voor naar boven gerichte verstoringen zal de instabiele negatieve stijfheid grotere invloed krijgen. Dit maakt een actieve regeling noodzakelijk om het te lagere object in het werkpunt te houden.

Het grote verschil met 'standaard' actieve trillingsisolatie is dat hier de regelaar niet de optredende trillingen moet zien weg te werken (zolang de uitwijking klein is worden die nagenoeg niet doorgegeven) maar dat er in feite alleen een driftcompensatie nodig is. Zodoende zijn de aan de regeling gestelde eisen niet hoog.

In principe kunnen drie situaties zich voordoen bij het instellen van de lagerkracht, zoals weergegeven in figuur 5 met de curves a, b en c. De lijn  $F=mg$  snijdt de curve van de lagerkracht in respectievelijk 2, 1 of 0 punten.

Wanneer het gewicht  $M \cdot g$  groter is dan de geleverde draagkracht in het werkpunt zullen er twee punten ontstaan waar krachterevenwicht is; echter, het punt met de laagste  $z$  zal stabiel zijn (dus met positieve veerstijfheid) en het punt met de hoogste  $z$  zal instabiel zijn (met negatieve veerstijfheid). Beide situaties zijn niet wenselijk voor trillingsisolatie.

Wanneer het gewicht  $mg$  exact gelijk is aan de geleverde draagkracht in het werkpunt zal er één snijpunt zijn dat tevens een raakpunt is aan de lagerkrachtcurve. Dit is per definitie het punt waar de helling van die curve, dus de lagerstijfheid, nul is. Dit punt zal randstabiel zijn.

Wanneer het gewicht  $M \cdot g$  kleiner is dan de geleverde draagkracht in het werkpunt zal er geen snijpunt zijn. Dat betekent dat het lager over het gehele bereik instabiel is zodat het gelagerde object omhoog zal bewegen tot aan de mechanische aanslag.

Deze drie situaties zijn eveneens gerepresenteerd in figuur 5 door middel van een stabiliteitsanalogon. Het variëren van de lagerkracht kan hier worden gezien als het kantelen van de gebogen rolbaan. Het werkpunt is hier het buigpunt van de baan, een krachterevenwicht treedt op ter plaatse van een horizontale raaklijn.

Het zal duidelijk zijn dat de lagerkracht gevarieerd moet worden om het te lagere object in het werkpunt te houden. Er zijn drie mogelijkheden om dit te bereiken:

Verandering van de totale luchtspleet door de bovenste plaat en/of de onderste magneet te verplaatsen. Hierdoor zal de kracht worden geschaald met ongeveer het kwadraat van deze verplaatsing.

Verandering van het magnetische veld door bijvoorbeeld de permanente magneten aan te vullen met elektromagneten. Op deze manier is echter moeilijk te voorspellen hoe het krachtenspel op het gelagerde object zal veranderen als functie van de toegevoerde stroom.

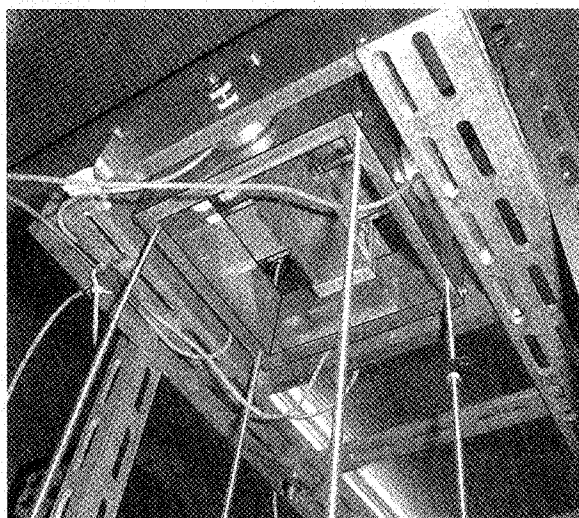
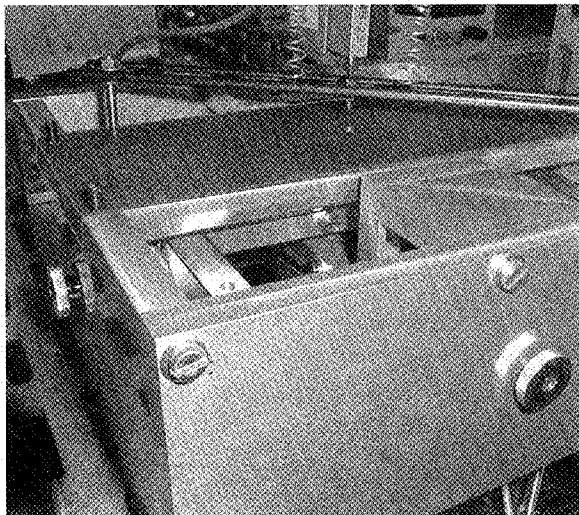
Toevoegen van een externe kracht. Dit kan bijvoorbeeld een Lorentzkracht zijn die eveneens stijfheidsloos is zodat de trillingsdempende eigenschappen niet aangetast worden.

Voor een ideale trillingsisolatie geldt dat de versnelling  $a=0$ . In de praktijk is dit te benaderen, maar er zal altijd een compromis moeten worden gesloten voor wat betreft de maximale uitwijking. In het geval van dit permanentmagnetische lagerelement moet die uitwijking beperkt blijven tot enkele micrometers. De amplitude van de meest voorkomende trillingen in een laboratoriumomgeving is kleiner.

Op dit moment wordt onderzoek gedaan naar de praktische toepasbaarheid van een gecombineerde regeling die enerzijds de versnelling nul houdt en anderzijds de positie gemiddeld in het werkpunt houdt. Immers, als de positie in het werkpunt regelttechnisch zeer strak teruggekoppeld wordt ontstaat er weer een doorkoppeling van trillingen.

Een interessante toepassing ontstaat als de positie regelttechnisch gekoppeld wordt aan een externe (zwevende) positiereferentie. In dat geval zijn de kracht en de positie volledig ontkoppeld. De positie kan willekeurig gestuurd worden zonder dat er een kracht koppeling is met de te volgen referentie, terwijl de kracht die daarvoor nodig is, wordt afgevoerd naar de vaste wereld waarmee geen positietskoppeling meer bestaat.

Figuur 6. Boven- resp. onder-aanzicht van een proefopstelling volgens het in figuur 3: geschetste model. Hiermee wordt de regelbaarheid van een dergelijk lager getest in één vrijheidsgraad, de overige vrijheidsgraden worden vastgelegd met behulp van luchtlagers. Niet zichtbaar op deze foto's zijn de positie-sensor en de Lorentz-actuator voor het regelsysteem.



## Conclusie

Het blijkt mogelijk een lagerelement te construeren dat in de lagerrichting geen stijfheid heeft maar wel een aanzienlijke kracht kan leveren, zonder dat dit energie kost.

De laterale richtingen zijn in eerste instantie buiten beschouwing gelaten. Er zijn echter geometrieën mogelijk die het stijfheidsloze concept in meerdere vrijheidsgraden realiseren. Ook hier wordt aan gewerkt.

De eisen die aan het regelsysteem gesteld worden zijn laag, in principe is alleen een driftcompensatie nodig. Eventueel kan de regelaar aangevuld worden met een versnellingsterugkoppeling.

Het permanentmagnetische lagerelement is geschikt voor toepassing in trillingsisolerende systemen of in (positioneer)systemen waar de positie en de kracht ontkoppeld moeten worden.

## Auteursnoot

Ir. G.J.P. Nijse, is werkzaam als AIO aan de TU Delft, faculteit Werktuigbouwkunde, sectie Micro-techniek.

## Literatuur

Nijse, G.J.P., J.W. Spronck, M.H.A. Leenders and H.F. van Beek, A new zero-stiffness magnetic bearing for vibration isolation, in: Proceedings of the American Society for Precision Engineering, 12th Annual Meeting, Norfolk VA, 1997, pp. 503-506.  
Nijse, G.J.P. en J.W. Spronck, Draagsysteem, Nederlandse octrooiaanvraag nr. 10.07127, september 1997.