

# Het magnetische lager, een hulpmiddel bij nieuwe elektromechanische constructies

Dr. ir. W.A. van Kampen

**Magnetische lagers kunnen gebruikt worden als bijna wrijvingsloze opvanging voor o.a. vliegtuigen. Het volgende artikel sluit daarom aan bij het artikel over vliegtuigen in het maart-aprilnummer van Mikroniek. Er zijn natuurlijk talloze andere toepassingen mogelijk. Het lijkt aannemelijk dat het actieve magnetische lager een interessante toekomst tegemoet gaat.**

## Inleiding

In magnetische lagers worden krachten opgewekt met magnetische velden ter ondersteuning van draaiende of schuivende constructiedelen. Reeds lang worden magneten gebruikt om lagerkrachten in rotoren te verminderen. Een lager uitsluitend met magnetische velden te laten functioneren, is economisch mogelijk geworden door de ontwikkeling van de vermogenselektronica. Bij moderne magnetische lagering heeft geen enkel mechanisch contact te bestaan tussen bewegende en stilstaande constructiedelen.

## Magnetische krachten

Er zijn verschillende methoden om krachten in een magnetisch lager op te wekken, zie figuur 1. Zoals bij elke krachtwerking verandert de energie wanneer een verplaatsing optreedt. Bij het magnetische lager is dit de energie die in het magnetische veld is opgeslagen. De energie-uitwisseling kan mechanisch-magnetisch zijn, zoals bij twee permanente magneten waarvan de afstand wordt veranderd. Bij een elektromagneet met anker is de energie-uitwisseling mechanisch-magnetisch-elektrisch. Zie figuur 1. Bij de elektromagneet en de permanente magneten met juk en anker (a), (b), komt aantrekking in aanmerking. Bij permanente magneten in lucht (d), (f), is aantrekking en afstoteling toe te passen. Bij luchtspoelen zijn de krachten alleen voldoende groot, als zeer grote stromen worden toegepast, mogelijk bij supergeleidende spoelen. Wordt een permanente of een elektromagneet langs een geleidende plaat bewogen, (h), dan ontstaat een remmende en een afstotende kracht. Een magneet boven een supergeleidende plaat (g) zal blijven zweven omdat de veldenergie toeneemt als de magneet dichterbij de plaat komt.

De genoemde manieren om krachten op te wekken kunnen alle in magnetische lagers worden toegepast. We beperken ons hier tot permanente magneten en elektromagneten met wekijzereen juk en anker. In die gevallen zijn relatief grote krachten op te wekken met eenvoudige middelen en lage elektrische vermogens.

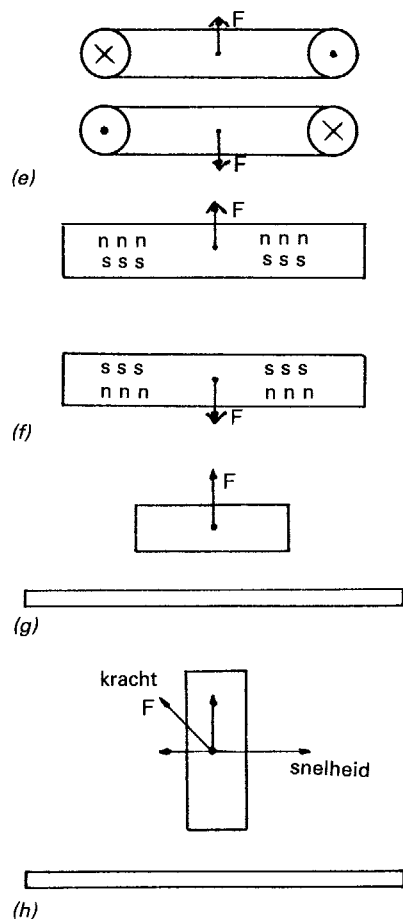
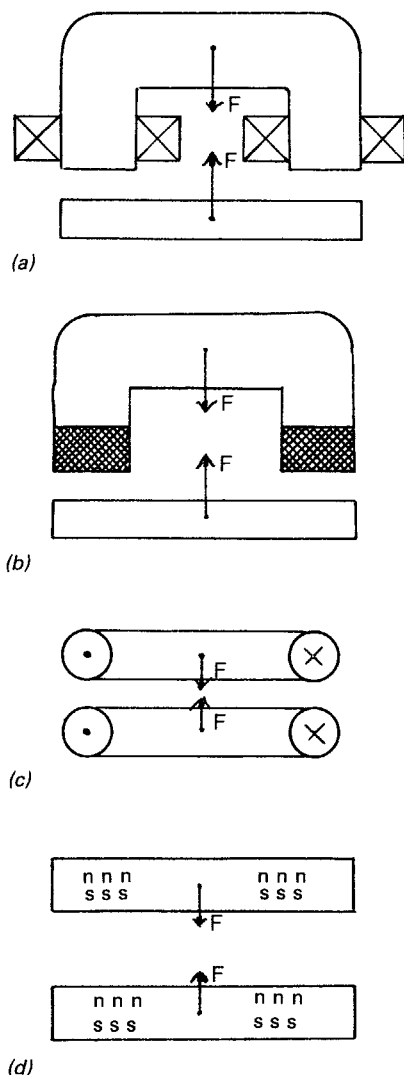


Fig 1 Aantrekkende, afstotende en remmende krachten bij magnetische lagers (a) elektromagneet, (b) permanente magneten met juk, (c) luchtspoelen, (d) permanente magneten in lucht, (e) luchtspoelen, (f) permanente magneten in lucht, (g) magneet boven supergeleidende plaat, (h) magneet bewegend boven geleidende plaat

## Stabiliteit

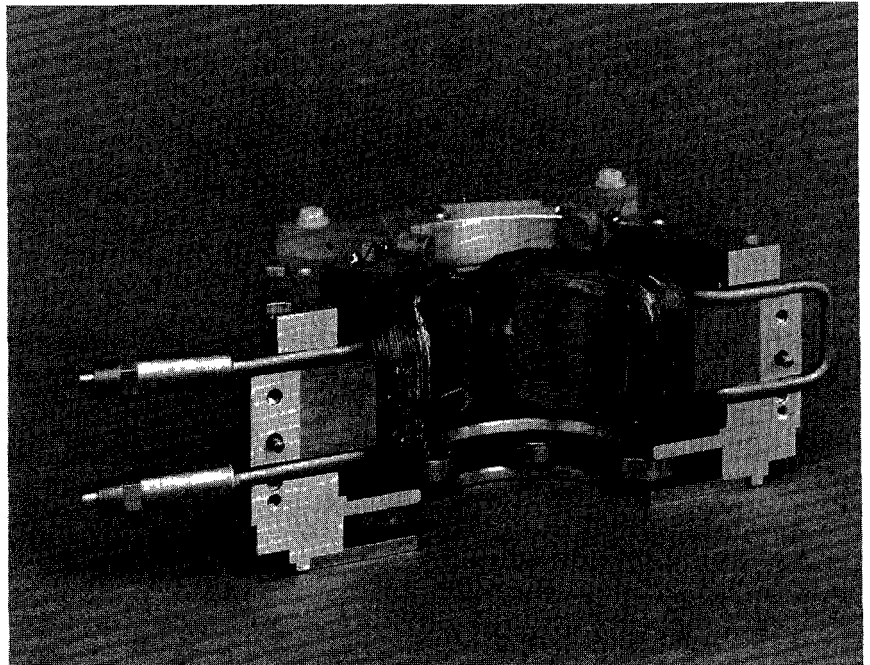
Indien een elektromagneet (a) wordt bekrachtigd, dan zal het anker niet zonder bijzondere maatregelen op een vaste afstand van het juk blijven. Wordt het anker met bijvoorbeeld de zwaartekracht van het juk getrokken, dan zal bij een constante stroom door de elektromagneet op slechts één afstand de aantrekkende kracht van de elektromagneet de zwaartekracht opheffen. Zodra door een verstoring het anker zich iets naar het juk beweegt, neemt de kracht toe en zal het anker zover mogelijk naar het juk verplaatsen. Een systeem van

elektromagneet met anker op een zekere afstand van het juk is dan niet stabiel. Stabieleit kan worden gemaakt door de stroom door de elektromagneet elektronisch te regelen. Wanneer een contactloze voeler wordt toegepast, waarmee wordt vastgesteld, hoe ver het anker zich van het juk bevindt, dan kan het voelersignaal de stroom door de elektromagneet beïnvloeden. Wordt de stroom verminderd als het anker zich naar het juk beweegt of zich daar te dichtbij bevindt, dan is het mogelijk het anker in een stabiele positie op enige afstand van het juk te houden. Men zou denken dat met afstotende permanente magneten een stabiele ondersteuning is te maken. Echter, in de vorige eeuw al is bewezen, dat dit theoretisch niet mogelijk is; in zo een systeem is er altijd een weg die het systeem moet volgen en die eindigt bij een extreme positie van de magneten. Worden magnetische en mechanische lagers gecombineerd, dan kan stabiliteit door het mechanisch lager worden bepaald. In het geval dat een elektronisch regelsysteem wordt toegepast om stabiliteit te verzekeren bij een magnetische lager, spreken we van een actief magnetisch lager.

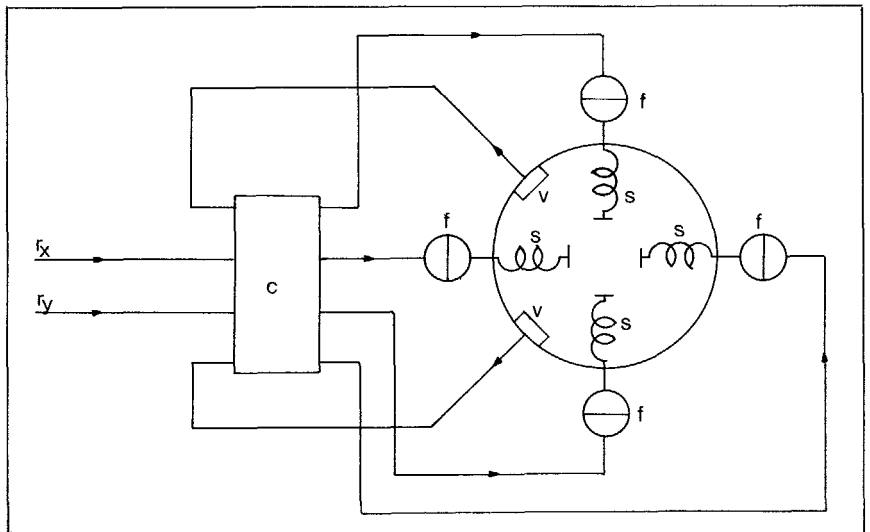
**Het actieve magnetische lager**

Bij het volledig ondersteunen van een mechanische as met magnetische lagers moeten radiale en axiale krachten kunnen worden geleverd. We beschouwen een draaiende as met twee radiale lagers in een vierpolige uitvoering (figuur 2). Het mechanische gedeelte van een lager bestaat uit twee blikpakketten, waarvan alleen het stilstaande bewikkeld is. Elke pool heeft een wikkeling, welke afzonderlijk is te bekrachtigen. De bekrachtiging wekt per pool altijd een noord- of altijd een zuidpoolveld op. Wordt een kracht gewenst in

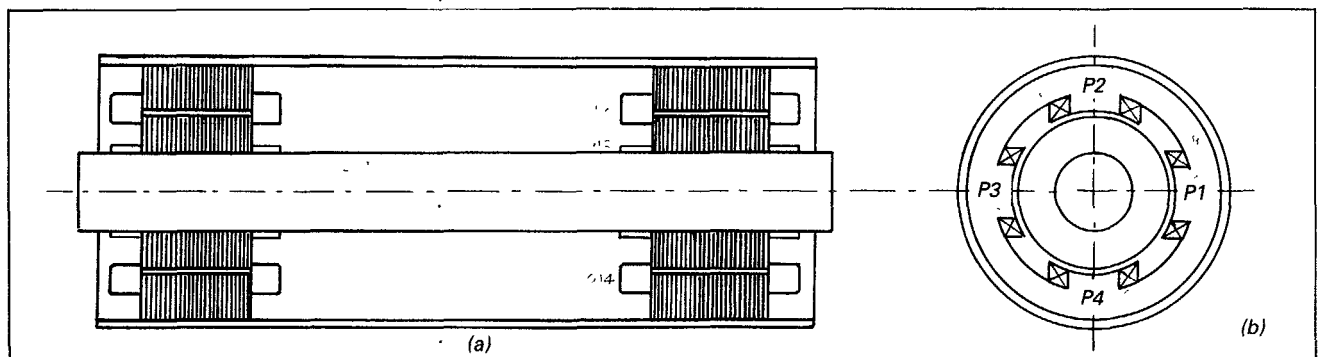
*Fig 2 Radiaal gelagerde as met vierpolige magnetische lagers*



*Fig 3 De helft van het juk van een radiaal magnetisch lager, met voelers en mechanische hulplagers. Het juk is watergekoeld om in vacuüm te kunnen werken*



*Fig 4 Regelsysteem magnetisch lager  
s spoelen v voelers f vermogensventiel c regelchip  
rx ry invoer referentiestand*



de richting van de Y-as, dan wordt de wikkeling  $w_2$  met een stroom bekrachtigd en ongeveer met de halve stroom de wikkeling van de naastliggende polen  $P_1$  en  $P_3$ . De magnetische flux door de pool  $P_2$ , verdeelt zich via het juk dan over de polen  $P_1$  en  $P_3$ , waarbij de aantrekkende krachten over de laatste twee polen elkaar opheffen, zodat alleen de kracht op de pool  $P_2$ , die de gehele flux voert, overblijft. Door de magnetische flux te verdelen over steeds drie opeenvolgende polen, is een kracht in elke gewenste richting op te wekken. Figuur 3 toont de helft van het stilstaande gedeelte van een radiaal lager.

Tot voor kort was de vermogenselektronica, die voor een dergelijk lager was vereist, niet alleen duur, maar ook omvangrijk. De recente ontwikkeling zowel in de vermogenselektronica als in de signaal- elektronica brengen een nog steeds verdergaande beperking van het aantal vereiste discrete elementen met zich mee. De regelelektronica van één magnetisch lager is bij de huidige stand van de elektronische techniek terug te brengen op enkele elementen (figuur 4).

### Energie en vermogen in een magnetisch lager

De magnetische energie, die in een bekrachtigd lager is opgeslagen, bevindt zich voornamelijk in de (lucht)spleet. Is de fluxdichtheid in de spleet  $B$  en is het pooloppervlak  $S$ , dan is de kracht

$$F \approx B^2 \cdot (2 \mu_0)^{-1} \cdot S$$

Bij een goed haalbare  $B = 1$  tesla, met  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , treedt een lagerdruk op van

$$F \approx 40 \text{ newton/cm}^2.$$

De energie die hierbij in de spleet aanwezig is, bedraagt bij een spleetgrootte  $d$ ,

$$E_m \approx F \cdot d$$

Bij een pooloppervlak van  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  en een spleetgrootte  $0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$ , zijn lagerkracht en energie boven de pool respectievelijk 4000 newton en 2 joules. Als een magnetisch lager een kracht moet leveren, wordt magnetische energie in de spleet gebracht. Afhankelijk van de gewenste dynamische eigenschappen is hier een zekere tijd voor beschikbaar; is deze bijvoorbeeld 2 milliseconden, dan dient gedurende

twee milliseconden een gemiddeld vermogen van  $P_2 \approx 2 \text{ joules/2ms} = 1 \text{ kW}$  geleverd te worden. Om de kracht te onderhouden dient alleen het verliesvermogen, dit zijn de ohmse verliezen in de bekrachtigingswikkeling te worden geleverd. In het genoemde geval van  $d = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$  zijn 400 ampèrewindingen nodig om een fluxdichtheid van 1 tesla te bereiken. Voor koperdraad ( $Y_{Cu} = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ ) is de maximale stroomdichtheid  $4 \text{ A/mm}^2 = 4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ . Als we een enkele winding veronderstellen hebben we 400 ampère nodig en dus een draad met doorsnede  $100 \text{ mm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$ . Voor een vierkante pool van  $10 \times 10 \text{ cm}$  is de lengte van deze winding  $40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$ . De dissipatie  $P_{Cu} = i^2 R$  is dan:

$$P_{Cu} = (400)^2 \times 1,7 \times 10^{-8} \times 0,4/10^{-4} \approx 11 \text{ watt}.$$

Hierblijkt dus  $P_{Cu} \ll P_L$ , wat veelal het geval is.

De energie, die in het lager wordt opgeslagen,  $E_m$ , wordt niet gedissipeerd. Het afwisselend bekrachtigen en niet bekrachtigen van het lager heeft dus slechts een wisselend energietransport ten gevolge. Wordt hiervoor een niet-dissipatieve elektronische schakeling toegepast, dan wordt bij de dynamische bekrachtiging van een magnetisch lager weinig energie gedissipeerd.

In geval de continue bekrachtiging toch nog te veel dissipatie oplevert, dan kan deze worden teruggebracht met behulp van permanente magneten. Dan is alleen het dynamisch energietransport oorzaak van dissipatie bij het lager en zijn besturing.

### Eigenschappen van het magnetisch lager

Vergelijken we een magnetisch lager met andere lagertypen, dan onderscheidt dit lager zich met een aantal eigenschappen:

1. Een magnetisch lager kan functioneren zonder dat een materieel medium tussen draaiend en stilstaand gedeelte aanwezig is.
2. Om goed te functioneren is het niet nodig dat draaiend en stilstaand gedeelte ten opzichte van elkaar nauwkeurig zijn bewerkt.
3. De positie van de draaiingsas is eenvoudig instelbaar, zo nodig tijdens bedrijf.
4. De dynamische eigenschappen worden in hoge mate bepaald door de vermogens-elektronische apparatuur die aan het lager is toegevoegd.

Ten gevolge van deze eigenschappen wordt een nieuw gebied ontsloten van draaiende of schuivende mechanische constructies.

Ad. 1. Draaiend en stilstaand gedeelte kunnen door het ontbreken van een materieel medium in gescheiden ruimten worden opgesteld, bijvoorbeeld bij rotorconstructies in een chemisch agressieve atmosfeer; zo ook zijn rotoren in vacuüm zonder meer toepasbaar; zeer hoge toerentallen bij hoge asbelasting zijn mogelijk die in combinatie uitgaan boven die van rollenlagers; extreem hoge levensduur is realiseerbaar.

Ad. 2. Het rotorlichaam kan draaien om een as die enigszins afwijkt van de nominale mechanische as, waardoor uitbalanceren minder nauwkeurig hoeft plaats te vinden. Eenvoudiger en minder kostbare constructies zijn daardoor mogelijk bij behoud van de mogelijkheid, hoge toerentallen toe te passen.

Ad. 3. Mechanische slijtage of vormverandering kan worden gecompenseerd met een aanpassing van de aspositie; bijvoorbeeld bij sneldraaiende verspanende werktuigen.

Ad. 4. Eigen trillingen, van een asconstructie kunnen worden vermeden of actief worden weggedempt, waardoor geen bijzondere procedures voor het doorlopen van kritische toerentallen vereist zijn.

Parallel aan de ontwikkeling van het magnetisch lager verlopen die van de sneldraaiende elektromotoren, waardoor zeer interessante samengestelde constructies mogelijk worden.

### Conclusies

1. Het actieve magnetische lager vormt een economisch, nieuw hulpmiddel bij elektro-mechanische constructies en kan daar worden toegepast waar andere lagertypen niet of moeilijk bruikbaar zijn: bij zeer hoge toerentallen en hoge belastingen, in stoffige of vuile omgevingen, in vacuüm, ook waar montage door niet-deskundig personeel moet kunnen plaatsvinden, en wanneer extreem hoge levensduur is gewenst.
2. De dynamische eigenschappen van een magnetisch lager in termen van uitbalanceren en in die van dynamische trillingsonderdrukking, maken dit lager uniek t.o.v. andere lagertypen.