

Lage-stijfheid actieve magneet- lagering

High-tech bedrijven besteden veel geld om dingen stil te laten staan, bijvoorbeeld in lithografiemachines, elektronenmicroscopen en CD- en DVD-masteringmachines. Voor scherpe afbeeldingen moeten de verschillende onderdelen van deze machines ultra-precies stilstaan ten opzichte van elkaar. Dat is geen sinecure. Vloertrillingen door verkeer of voorbijlopende mensen verstoren het productieproces, terwijl er juist steeds hogere eisen worden gesteld aan productiecapaciteit en kwaliteit. De Delftse Mechatronica-groep heeft zich de afgelopen zeven jaar gericht op het ontwerp en de realisatie van een nieuwe generatie lagering en trillingsisolatie: lage-stijfheid actieve magneetlagering. Dick Laro en Peter Overschie presenteerden op de Euspen 2007 conferentie in Bremen (zie het verslag elders in deze Mikroniek) een overzicht. Dit artikel is een samenvatting van hun session-keynote.

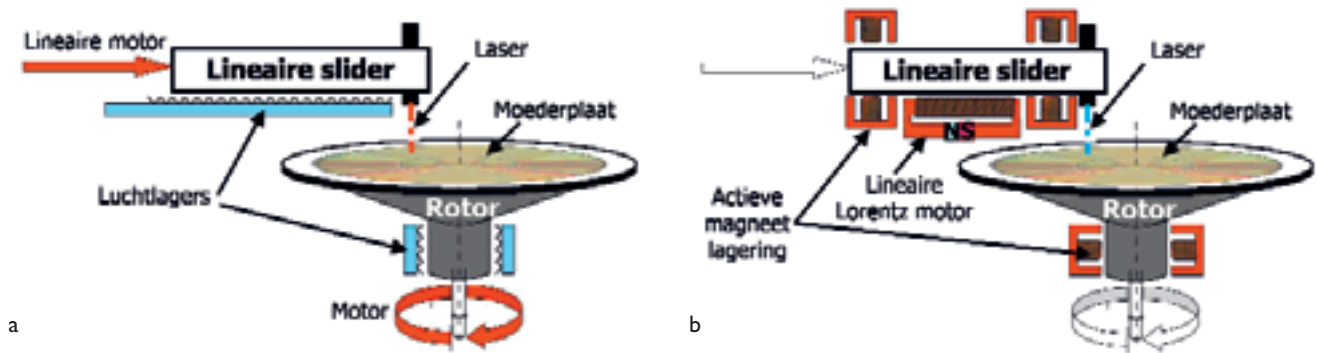
• Peter Overschie •

In actieve magneetlagering wordt het bewegende deel (de rotor) op zijn plek gehouden met behulp van elektromagneten. De elektromagneten kunnen op de rotor een kracht uitoefenen die afhangt van de stroom door de spoelen. Met nauwkeurige sensoren wordt de positie van de rotor continu gemeten. Met een regelsysteem wordt vervolgens continu iedere positieafwijking gecorrigeerd. Daardoor kan de rotor vrij zwevend in de lucht blijven hangen. Het mooie van actieve magneetlagers is dat de lagereigenschappen worden bepaald door de instellingen van het

regelsysteem. Dit biedt verschillende nieuwe lageringsmogelijkheden ten opzichte van conventionele lagers.

Blu-Ray disc mastering

Als voorbeeld laten we de toepassing van actieve magneetlagering zien voor het creëren van moederplaten (masters) voor optische schijven zoals CD en DVD. In Figuur 1 is te zien dat een mastering-apparaat bestaat uit een rotor en een lineaire slede. Een onbeschreven master met een fotogevoelige laag wordt op de rotor geplaatst, waarna de rotor wordt



Figuur 1. Concepten voor optical disc mastering.
 (a) Huidige generatie
 (b) Nieuw concept met magneetlaging.

aangedreven met snelheden tot 9000 toeren/ minuut. De lineaire slede, waarop een laser gemonteerd is, beweegt vervolgens langzaam over de rotor heen. De laser schrijft de informatie (bijvoorbeeld films, muziek of computerdata) in de vorm van putjes in de lichtgevoelige laag. Na ontwikkeling van de lichtgevoelige laag kunnen er met de master zo'n 70.000 CD's, DVD's of Blu-Ray discs worden gerepliseerd.

Blu-Ray is de nieuwste generatie optische schijven, ontwikkeld voor het opslaan van HD-TV films. Op een Blu-Ray disc moet meer dan vijf keer zo veel data passen als op een DVD en bijna 40 keer zoveel als op een CD. Dit is mogelijk door gebruik te maken van een smallere laserbundel met een kortere golflengte, blauw licht in plaats van rood. Daarnaast moeten de dataspoortjes op de Blu-Ray disc master veel dichter op elkaar worden geschreven. De nauwkeurigheid waarmee de spoortjes worden geschreven, moet bovendien veel groter zijn dan bij het schrijven van DVD-masters. Zowel de rotor als de lineaire slede moeten een positienauwkeurigheid beter dan 1 nanometer hebben. De Mechatronica-groep van de TU Delft, onder leiding van de hoogleraren Jan van Eijk en Rob Munnig Schmidt, heeft een magneetgelagerde rotor en een magneetgelagerde lineaire slede gerealiseerd, die aan deze extreme eisen voor positiestabiliteit voldoen; zie Figuur 1b.

Nieuwe aanpak

De belangrijkste verstoringen bij het schrijven van de data op de moederplaat zijn vloertrillingen. Die kunnen ervoor zorgen dat de laser de verschillende sporen te dicht op elkaar schrijft, waardoor de informatie niet meer leesbaar

is. In de huidige generatie apparaten voor beschrijven van moederplaten worden vloertrillingen weggefilterd door een zware massa die rust op slappe vering. Tijdens het schrijfproces moet de rotor op hoge snelheid ronddraaien, maar mag hij niet bewegen ten opzichte van de laser. Hiervoor worden in de huidige apparaten lucht-lagers met lucht onder hoge druk toegepast, om zowel de laser als de rotor zo stijf mogelijk op te sluiten, zodat de afstand tussen de laser en de master niet varieert.

In Delft is gekozen voor een andere aanpak. Om de positie van de rotor constant te houden ten opzichte van de positie van de lineaire slede, worden actieve magneet-lagers toegepast. Het gedrag van actieve magneet-lagers kan worden gevarieerd in de regelaar, en zo worden gekozen dat vloertrillingen maximaal worden onderdrukt. Hierdoor is er geen extra trillingsisolatiesysteem nodig tussen de vloer en de rotor en lineaire slede. Dit spaart ruimte, omdat de grote massa kan worden weggelaten. In een high-tech omgeving is ruimte duur, zeker in een cleanroom.

Lage-stijfheidsconcept

Om vloertrillingen zo goed mogelijk te onderdrukken, is ervoor gekozen de stijfheid tussen de rotor en de vaste wereld zo laag mogelijk te maken. Anders dan bij kogel-lagers en lucht-lagers wordt er in het lage-stijfheidsconcept naar gestreefd om de rotor zo vrij mogelijk te laten zweven. De rotorpositie wordt slechts beïnvloed door minimale krachten van de (corrigerende) elektromagneten. Op dezelfde manier wordt ook de lineaire slede vrij zwevend in de lucht gehouden met minimale stijfheid naar de vaste wereld. Door deze minimale stijfheid beïnvloeden vloertril-

lingen de positie van de rotor en van de lineaire slede vrijwel niet. Voor het masteringproces is het wel nodig dat de onderlinge afstand tussen de slede en de rotor nauwkeurig constant wordt gehouden. Dit is mogelijk door de lineaire slede de positie van de rotor nauwkeurig te laten volgen via het regelsysteem.

Vrij zwevende rotor

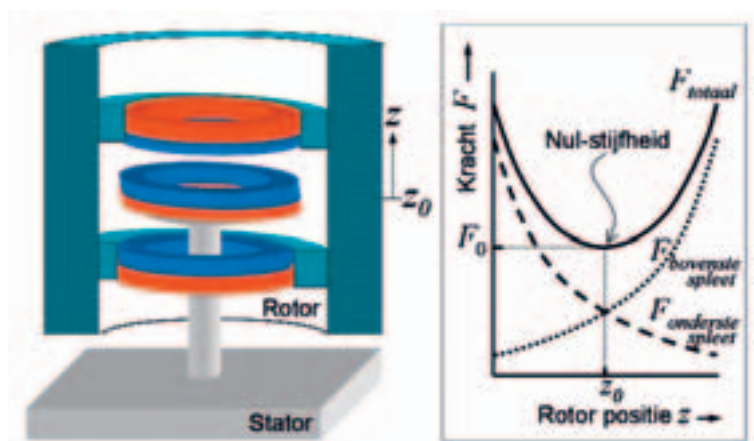
Een cruciale stap in het toepassen van het lage-stijfheidsconcept is de uitvinding van de nul-stijfheid zwaartekracht-compensator; zie Figuur 2. Deze bestaat uit drie permanente magneten, die met de kracht die ze leveren het gewicht van de rotor compenseren. De bovenste twee magneten zijn gelijkpolig aangebracht en de onderste twee magneten tegenovergesteld. Daardoor heffen hun stijfheidseffecten elkaar precies op.

Een andere belangrijke stap voor het lage-stijfheidsconcept is het gebruik van een metrologieframe; zie Figuur 3. Op dit frame, dat loshangt van de stator, zijn de referentiesensoren gemonteerd. Deze meten de rotorpositie met subnanometerresolutie. Vloertrillingen zouden de meting te veel verstoren als de referentiesensoren in de stator waren gemonteerd. Daarom is het metroframe uitgevoerd als een zware massa aan slappe veren, zodat het alle vloertrillingen (> 2 Hz) onderdrukt.

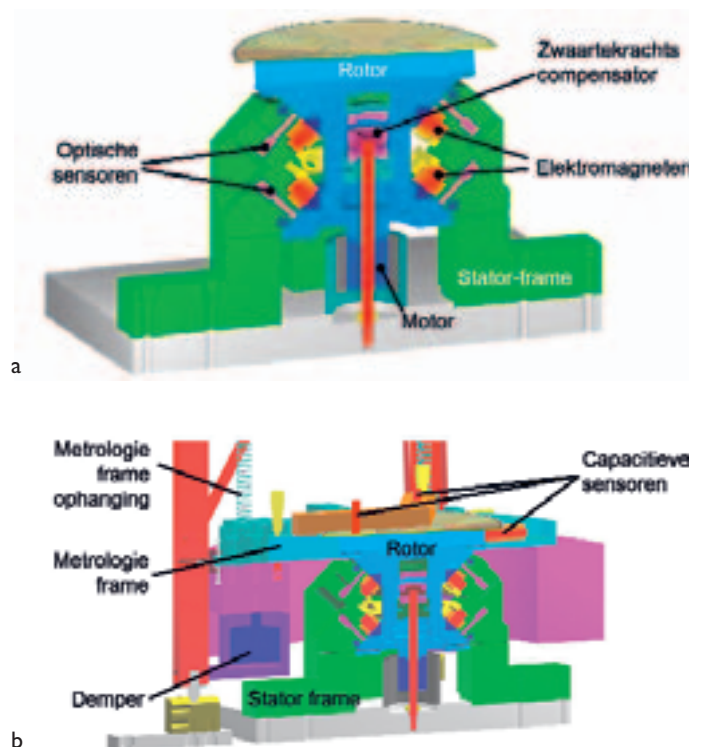
Om stijfheid ter plaatse van de actuatoren te minimaliseren, is tot slot een extra compensatie-algoritme in het regelsysteem aangebracht. De kracht die de actuator levert, varieert met de breedte van de spleet tussen de actuator en rotor. Door deze spleetbreedte te meten met een extra set sensoren, kan de positie-afhankelijkheid van de kracht (= stijfheid) worden gereduceerd.

Modulaire lineaire slede

Om de mogelijkheden van actieve magneetlaging maximaal te kunnen benutten, is de stator van de lineaire slede opgebouwd uit drie identieke modules; zie Figuur 4. Op iedere stator-module zijn een motorfunctie en een lagerfunctie geïntegreerd, volgens het principe van Molenaar [1]. Met deze modules kunnen verschillende 'slider'-vormen worden gelagerd en aangedreven. Voor de optische schijf-mastering toepassing is gekozen voor een \perp -vormige slider. De laserstraal, waarmee de data op de master wordt geschreven, wordt op de master gepositioneerd via spiegels in het centrum van de \perp .



Figuur 2. Schematische opbouw van nul-stijfheid zwaartekracht-compensator. Rechts het verband tussen rotorverplaatsing en verandering van de kracht.



Figuur 3. Ontwerp voor een actief magneetgelagerde rotor voor optical disc mastering.

- (a) Dwarsdoorsnede.
- (b) Inclusief metrologieframe.

Minimaal energieverbruik

Sterke permanente magneten, die in de modules van de lineaire slede zitten, zorgen ervoor dat de slider gelagerd kan worden met een minimale hoeveelheid energie. De netto aantrekkende kracht van het magneetveld hangt af van de hoogte waarop de slider zweeft. Door de slider op de juiste hoogte te brengen, wordt het gewicht precies gecompenseerd door de magnetische krachten. De dissipatie ter plaatse van de slider is dan nog maar enkele mW. Dit is erg gunstig voor toekomstige toepassingen, want zo'n lage dissipatie is goed bruikbaar in vacuüm.

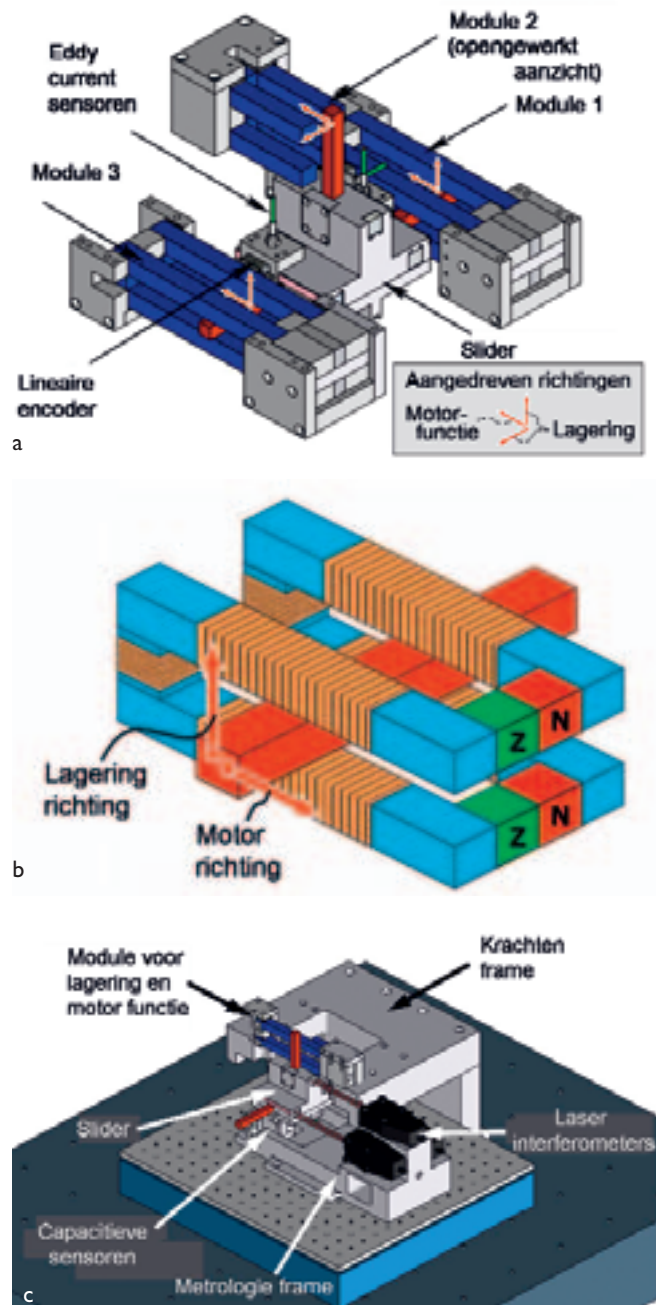
Meer mogelijkheden

Vanwege de flexibiliteit van actieve magneetlagers kunnen er nog meer technieken worden toegepast die de positie-nauwkeurigheid van de rotor en lineaire slede verhogen. Bij de rotor, bijvoorbeeld, treden positiefouten op als gevolg van massa-onbalans en vormfouten van de rotor. Deze fouten, die door de sensor worden opgepikt, zijn echter iedere omwenteling vrijwel hetzelfde. Daarom is er in het regelsysteem een algoritme geïmplementeerd dat deze fouten meet (gedurende enkele honderden omwentelingen) en ervoor compenseert, zodat ze geen invloed meer hebben op de rotorpositie.

Een andere toepassing is het gebruik van over-actuatie voor het compenseren van vervormingen door interne resonanties in de \perp -vormige slider; zie Figuur 5. De linkerhelft en gespiegelde rechterhelft van de modules uit Figuur 4b kunnen elektrisch van elkaar worden losgekoppeld. Daardoor kunnen beide helften ieder afzonderlijk een verticale en een horizontale kracht uitoefenen (over-actuatie). Door het regelsysteem juist in te stellen, kunnen deze extra krachten de vervormingen bij resonantiefrequenties tegenwerken. Hiermee wordt de sliderpositiefout bij deze resonantiefrequenties aanzienlijk gereduceerd. Daarnaast geeft dit de mogelijkheid om het regelsysteem veel scherper af te stellen, zonder het systeem instabiel te maken.

Resultaat

Op de foto's in Figuur 6 zijn de gerealiseerde magneetgelagerde rotor en magneetgelagerde lineaire slede te zien. Met de rotor is een positie-stabiliteit van 0,6 nm in stilstand gerealiseerd en met de lineaire slede een positie-stabiliteit van 0,11 nm. Dit is ruim binnen de gestelde specificaties van 1 nm, benodigd voor het masteren van optische schijven. Door gebruik te maken van over-actuatie in de lineaire

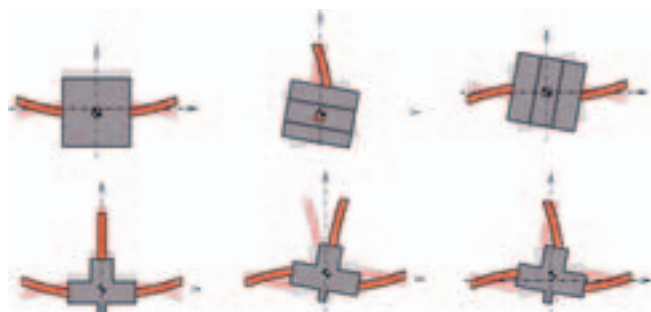


Figuur 4. Modulaire opbouw van het ontwerp. (a) Lineaire slede met \perp -vormige rotor en drie modules met geïntegreerde motorfunctie en lagerfunctie. (b) Module met motorfunctie in één richting en lagerfunctie in één richting. (c) Opengewerkt aanzicht van de lineaire slede.

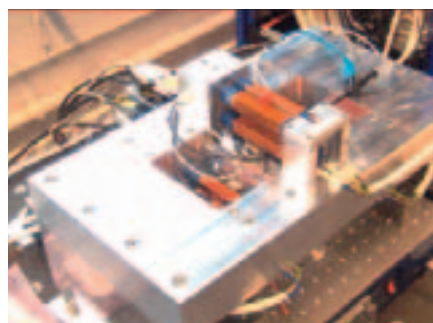
slider, is de positiestabiliteit toegenomen tot een ongekende 60 picometer sensoruitlezing. Dit vergroot de mogelijkheden voor het gebruik in toekomstige toepassingen enorm.

Toekomst

Magneetlagers worden momenteel al toegepast in bijvoorbeeld de magneetzweeftrein in Shanghai, China, in hogesnelheid turbocompressors en voor de trillingsisolatie-platforms in spaceshuttle-missies. Omdat magneetlagers contactloos zijn, hebben ze geen last van wrijving en slijtage. Daarnaast is er geen smeermiddel en wordt er geen lucht toegevoerd, waardoor ze goed kunnen worden toegepast in een vacuümomgeving. Bij veel high-tech toepassingen is een trend naar steeds hogere positioneringseisen en naar toepassing in vacuüm zichtbaar. Doordat de eigenschappen



Figuur 5. Interne resonanties in de \perp -vormige slider.



Figuur 6. De realisatie.

- (a) De actief magneetgelagerde rotor. Het metrologie-frame is omhoog gezet; in gebruik wordt dit over de rotor en stator heen geplaatst.
- (b) De actief magneetgelagerde modulaire lineaire slede.
- (c) De rotor in opbouw.

van magneetlagers flexibel in te stellen zijn, en de grenzen van de nauwkeurigheid nog niet zijn bereikt, zal het gebruik van magneetlagers in high-tech toepassingen steeds gangbaarder worden.

Referentie

- [1] A. Molenaar (1997), "Magneetlagering", Mikroniek nr. 5.

Verantwoording

De actief magneetgelagerde rotor en lineaire slider zijn gerealiseerd door de promovendi en post-docs Leon Jabben (2, 1), Peter Overschie (1), Hussein El-Husseini (3, 1), Dick Laro (4, 1), Anton Lebedev (5) en Dipali Thakkar (1), hun coaches Jo Spronck (1) en Jan van Eijk (1, 6), projectmedewerker Feike Savenije (7, 1) en vele studenten. De auteurs willen het SenterNovem-IOP (rotor, project IPT00110) en het STW (slider, project DWO5777) bedanken voor de financiële ondersteuning en de begeleidingscommissieleden voor hun actieve participatie in deze projectw.

- (1) TU Delft, fac. 3mE (Wb), vakgr. Precision and Microsystems Eng., sectie Mechatronics, www.pme.tudelft.nl;
- (2) TNO Industrie en Techniek, Delft, www.tno.nl;
- (3) De Valck Consultants, www.devalckconsultants.com;
- (4) Singulus Mastering bv, www.singulus.nl;
- (5) TU Eindhoven, fac. EI, vakgroep Electrische Vermogens Techniek, w3.ele.tue.nl/nl/evt/epe/;
- (6) Mice bv – Mechatronic Innovation & Concept Engineering, www.micebv.nl;
- (7) Saventec, fjsavenije@gmail.com