

Magneetlagering

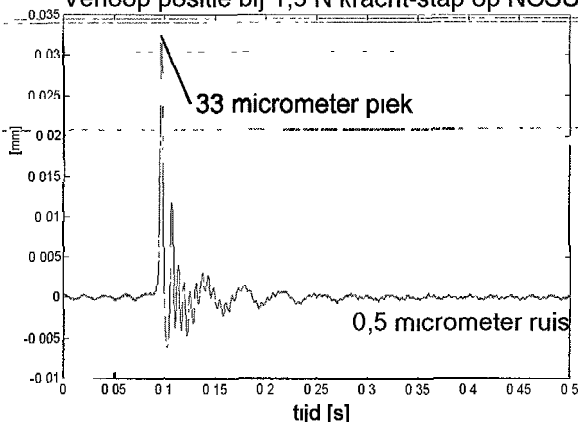
Alexander Molenaar De bouw van de eerste actieve magneetlager opstellingen viel samen met de oprichting van de NVPT, zo'n 50 jaar geleden. Hoewel het idee daarvoor al een eeuw oud was, werd praktische realisatie pas mogelijk dankzij de ontwikkeling van vermogenselektronica en regeltechniek na de tweede wereldoorlog. Magneetlagering is een vorm van mechatronisch ontwerpen bij uitstek (zie kader-AMB). Bij moderne integrale ontwerpen als het sensorloos magneetlager en de lagerloze motor komt dit nog duidelijker naar voren.

AMB

De basisvorm van een actief magneetlager (ofwel Active Magnetic Bearing [AMB]) is een stilstaande elektromagneet (stator) waarmee een regelbare reluctantiekracht wordt uitgeoefend op een rotor (die kan roteren of translateren!). Een AMB bestaat uit een regeling van actuator, positie-sensor, regelaar en versterker. Omdat de reluctantiekracht een negatieve veerstuifheid heeft is dit regelsysteem noodzakelijk voor de stabiliteit en geeft het instelbare verings- en dempings-eigenschappen.

De statische stijfheid kan met een integrator in de regelaar oneindig groot worden gemaakt, tot de maximale belastbaarheid wordt bereikt door verzadiging van de rotor (Kobalt legeringen met een verzadigingsfluxdichtheid van 1,9 T halen 60 N per cm² pooloppervlak). De dynamische stijfheid wordt echter beperkt door de snelheid waarmee de kracht kan veranderen. Deze hangt af van zowel de gehele regellus (maximale uitgangsspanning van vermogensversterker, gevoeligheid van de sensor) als van de actuator (magnetische voorspanning, hysteresis) en is typisch 1 N/mm voor harmonische verstoringen binnen de bandbreedte van de regelaar (typisch 100 Hz).

Verloop positie bij 1,5 N kracht-stap op NCSU



In de figuur is de reactie zichtbaar van een 1,5 newton last-stap op de rotor van een lineair magneetlager met PID regeling. De doorschot van 33 μm wordt veroorzaakt door de eindige bandbreedte van de (digitale) regelaar. De uiteindelijke positiefout valt binnen de positieruis van 0,5 μm (veroorzaakt door de eddy current-wervelstroom-positiesensor).

Motivatie

Voor de toekomst heerst de verwachting dat door hun specifieke voordelen magneetlagers zullen worden toegepast waar alternatieven als kogel-, glij- en luchtlagers geen optie zijn. Deze voordelen zijn contactloosheid (geen slijtage en dus onderhoudsloosheid), toepasbaarheid in ultra hoog vacuum (UHV) of ultra schone omgeving (UCE), afwezigheid van stuck-slip) en instelbare lager karakteristieken (stijfheid en demping, actieve trillingsonderdrukking). Vooral de ontwikkelingen in de lithografie richting de korte golflengte van röntgen motiveert de ontwikkeling van alternatieve positionersystemen met een hoge nauwkeurigheid die in vacuum kunnen werken. Nadelen als de hoge ontwikkelingskosten voor iedere specifieke toepassing, de warmte ontwikkeling, het uitvalrisico van een actief systeem en de beperkte belastbaarheid en stijfheid, zullen de toepassingsmogelijkheid op hun beurt beperken.

Sectie Micro-techniek

Het thema van de sectie Micro-techniek (faculteit Werktuigbouwkunde, TU Delft) is statisch en dynamisch afnemen en positioneren. Het project lineaire magneetlagering dat hier een onderdeel van is, startte in 1991 met het promotieonderzoek van Frank Auer (Auer, 1995). Auer heeft een magnetisch gelagerde positioneeretafel gerealiseerd. Deze XYF tafel zweeft met 6 graden van vrijheid in een luchtspleet van 1 millimeter, met 10 millimeter slag in het vlak bij 1 micrometer relatieve positienauwkeurigheid (Auer et al., 1996). Dit onderzoek wordt sinds juni 1995 vervolgd door de auteur met een door de STW gefinancierd promotieproject. Doel hiervan is in brede zin

Stabiliteit

In het afgelopen jaar zijn diverse vormen van magneetlagering in het nieuws gekomen. De meest markante is de zwevende levende kikker van dr.A.K. Geim (Berry en Geim, 1997).

Ook de eerste consumentenproducten zagen het licht, een passief gelagerde zwevende tol (Levitron) en een actief magneetgelagerde zwevende bol (Levitor).

Earnshaw bewees dat stabiele lagering niet mogelijk is met alleen stilstaande magneten en ladingen, dus passief (Earnshaw, 1842). Hier buiten vallen echter diamagnetisme (zwevende kikker en waterdruppels), stabiliserend impulsmoment bij draaiende rotoren (Levitron), supergeleiding (Meissner effect), actieve regeling (zwevende tol en magneetlagering), quantum effecten (de atomen van een boek zweven boven de atomen van de tafel) en oscillerende velden (inductieve lagering bij maglev treinen).

Met krachten die ontstaan uit magnetische velden kunnen op vele manieren bewegingsmogelijkheden worden beperkt. Dit noemen we lageren. Aandrijven is het positioneren in de vrijheidsgraden die niet beperkt worden door de lagering. Er kunnen vele combinaties van beide worden gemaakt, bijna alle zijn ondertussen wel eens gerealiseerd.

Er zijn drie hoofdtypen elektromagnetische kracht. Dit zijn: reluctantie- (magnetische potentiaal-), Lorentz- (elektrodynamische-) en inductieve kracht (Bleuler, 1992). Zie tabel 1 voor een klein overzicht. Reluctantiekracht blijkt de meeste voordelen te bieden voor het lageren/leviteren/dragen, vooral qua snelheid en kracht per volume-eenheid. Voor de stabiliteit moet een reluctantielager wel actief worden geregeld. Voor aandrijving is Lorentzkracht meer geschikt, zowel met permanente magneten als met geïnduceerde velden. Met inductie ontstaat echter zowel een aandrijf- als een lagerkracht.

Lorentz	stabiel	zwak	stijf	onzuinig
Inductie FOC	dynamisch	sterk	stijf	onzuinig
Inductie MDC	dynamisch	sterk	slap	zuinig
Reluctantie	instabiel	sterk	stijf	zuinig

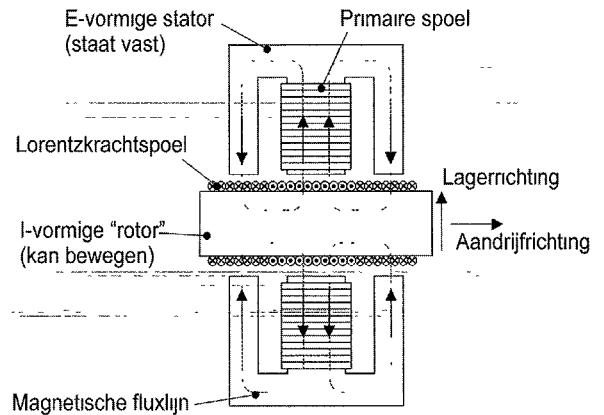
Tabel 1. Karaktereigenschappen van magnetische krachten.

De eerste en ook meest voorkomende toepassing van AMBs is de lagering van assen van systemen die heel snel draaien of die onderhoudsintensief zijn wanneer klassieke kogellagering toegepast zou worden. De maximaal gehaalde omloopnelheid met trafo-blik is 565 m/s, met amorf metaal 826 m/s. Omdat magneetlagers wrijvingsloos werken kan het kostbare systeem onderhoudskosten besparen. Later volgde de ontwikkeling van zogeheten lineaire magneetlagers, aangevoerd door dr.D. Trumper (MIT) waarbij de mogelijkheid werd benut om binnen de luchtspleet van een reluctantielager nauwkeurig te positioneren (Trumper, 1990).

het uitbreiden van kennis over lineaire magneetlagering. In enge zin geldt als doel een nieuw te ontwerpen XYF-tafel met een

- slag van 100 x 100 mm²,
- maximale versnelling in aandrijfrichting van 1 g,
- dynamische stijfheid van 100 N/mm, en
- absolute nauwkeurigheid van 1 mm.

Ten opzichte van de XYF tafel van Auer moeten hier toe vooral slag, lagerstijfheid en aandrijfkracht worden verbeterd, en zal de warmteontwikkeling moeten



Figuur 1. Schematische weergave van het werkingsprincipe van de Suspension en Propulsion Unit (SPU)

worden teruggebracht

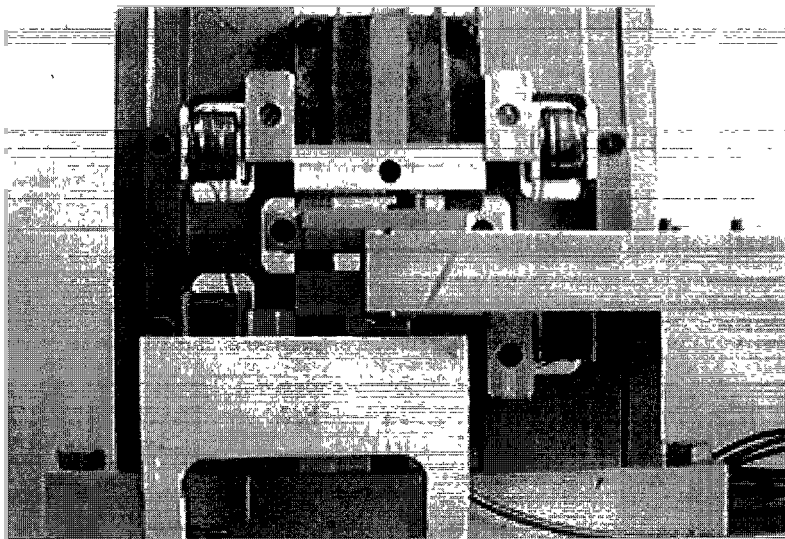
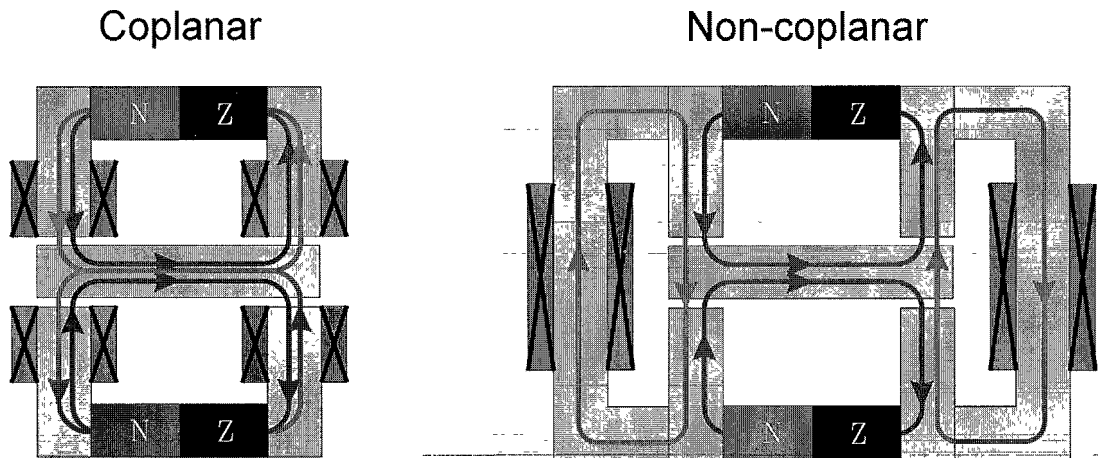
Combinatie

Voor het uitvoeren van een nuttige beweging wanneer een plateau met magneetlagers zweeft, is een aandrijving nodig die de lagering zo min mogelijk verstoort. De door Frank Auer ontwikkelde Suspension en Propulsion Unit (SPU) combineert lagering en aandrijving in één eenheid. Figuur 1 laat zien dat de SPU elektromagneten gebruikt voor lagering (suspension) middels reluctantie krachten, en dat hetzelfde veld wordt gebruikt voor aandrijving (propulsion) door Lorentzkracht middels een daarvoor op de rotor aangebrachte spoel.

Met diverse opstellingen is het werkingsprincipe van de SPU gevalideerd. Vooral de ont koppeling van de magnetische velden voor de lager- en aandrijfkracht zijn onderzocht. De invloed van de lagering op de aandrijving, door de variaties van de magnetische inductie in de luchtspleet, bleek onder normaal bedrijf slechts enkele ppm te bedragen. Zolang de rotor niet verzadigd is, is de invloed van de aandrijving op de lagering te verwaarlozen. De opstellingen toonden een stabiele werking. De lagernauwkeurigheid was gelijk aan die van de eddy-current sensor: 1 micrometer.

Drie SPU's kunnen, statisch bepaald, een platform lagere. Zo is een XYF-tafel gebouwd met een draagvermogen van 3 kilogram en een resolutie van enkele tienden micrometer. Nadelen van deze tafel zijn de beperkte slag (10x10 mm), de grote dissipatie (60 W) en de bescheiden aandrijfkracht van enkele newtons. Daarom werd een nieuwe actuator ontworpen, de NCSU.

Figuur 2 De enige twee mogelijke manieren waarop permanente magneten met elektromagneten kunnen worden gecombineerd in één circuit. co-planar en non-co-planar.



Figuur 3 De testopstelling van het lineaire non-co-planar magneetlager NCSU

Permanente magneten

Wanneer de energie die gedissipeerd wordt door de ruststroom van de elektromagneten (om het magneetlager te kunnen voorspannen) hinderlijk is bij een bepaalde toepassing, kunnen deze vervangen worden door permanente magneten. Voorbeelden zijn lagers die zuinig moeten zijn zoals van compressoren in vliegtuigen, of die in vacuüm moeten werken. Ook wanneer de aandrijfkraft volgens het SPU principe moet worden vergroot bieden permanente magneten uitkomst omdat hiermee een grotere inductie kan worden verkregen in de luchtspleet.

Er kunnen principieel slechts twee keuzes gemaakt worden: de elektromagneten (EM) in serie met de permanente magneten (PM) of ieder in een eigen circuit tot ze vlak voor de luchtspleet samenkomen. De eerste vorm heet in de literatuur voor roterende lage-

ring co-planar, de tweede non-co-planar, zie figuur 2. Vandaar dat een nieuwe lineaire lagerseenheid volgens het tweede principe de Non-Co-planar Suspension Unit (NCSU) is genoemd (Sanders, 1997).

Met behulp van analytische modellering en 2D eindige elementen simulaties is het magneetcircuit gemodelleerd. Uit de simulaties kwam een bijzondere eigenschap naar voren: de permanente magneten zijn zelf-instellend te maken voor een bepaalde rustflux door een slimme keuze van de geometrie van het circuit. De permanente magneet kan dan worden overgedimensioneerd waardoor de rotor verzadigd raakt. De inductie in de luchtspleet is dan de halve verzadigingswaarde en daarmee is het lager ideaal voorgespannen.

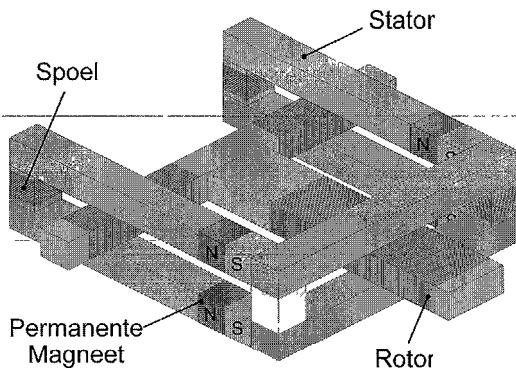
De opstelling van een enkele NCSU, zoals getoond in figuur 3, werkt naar behoren. De draagarm zorgt ervoor dat de rotor alleen nog verticaal kan bewegen. De inductie in de luchtspleet, en daarmee de aandrijfkraft, is 3 maal hoger dan in de SPU. Terwijl het totale pooloppervlak 4 keer kleiner is geworden is de draagkraft gelijk gebleven, terwijl de dissipatie ten minste 25 maal kleiner is geworden. De eerder in kader AMB getoonde dynamische stijfheidsmeting is met deze opstelling verricht. De prestatieverbeteringen worden hoofdzakelijk verklaard door de toepassing van permanente magneten, omdat eenzelfde regelsysteem is gebruikt.

Planair AMB

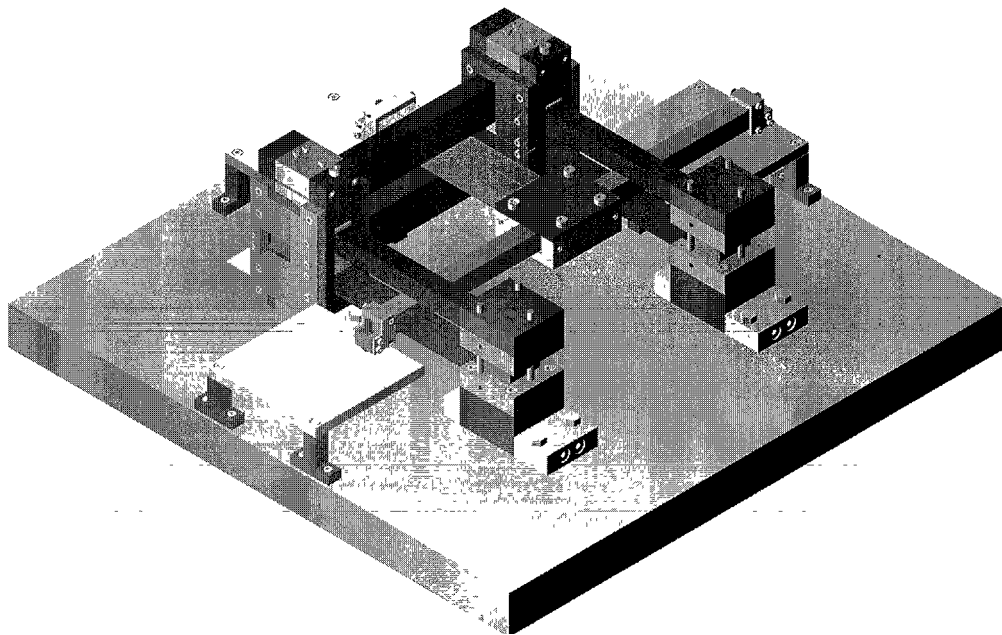
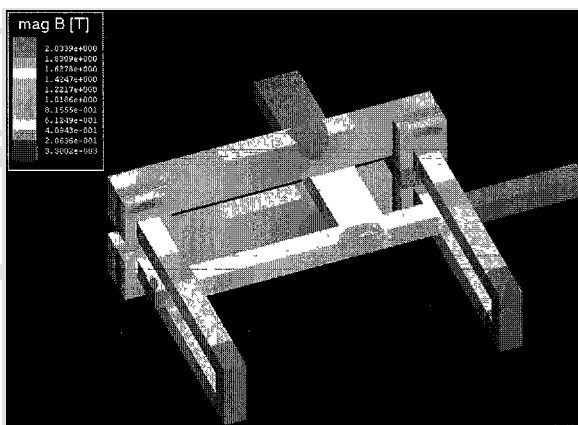
Om de slag te vergroten bij een met reluctance actuatoren gelagerde tafel zoals de SPU, moeten de 3 zwevende ijzeren rotordelen waaraan wordt getrokken alle worden vergroot. Dit leidt dan tot een zware, logge tafel. De PAMB zoals getoond in figuur 4 is

Magneetlagering

Figuur 4. Schematische voorstelling van het planaire magneetlager. PAMB, waarbij een zwevende T-vormige rotor tussen twee U-vormige statorleden wordt gelagerd en aangedreven met grote slag.



Figuur 5. Resultaat van een eindige elementen berekening van de magnetische inductie van de permanente magneten in de PAMB, die de rotor voorspannt. De inductie in de luchtspleten is net kleiner dan 1 tesla



Figuur 6 Een constructietekening van de PAMB test opstelling zoals die momenteel wordt geassembleerd

een gepatenteerde oplossing, die reluctantielagering koppelt aan de mogelijkheid van lange slag middels gekruste fluxgeleiders (Molenaar, 1997). Deze oplossing werkt alleen wanneer de rustflux wordt gegenereerd door permanente magneten, dus de voordelen van de NCSU zijn hier wederom geldig.

Aandrijving in het vlak *a la* SPU blijft mogelijk. Een van de voordelen van deze configuratie is dat de veldrichting nergens omkeert (unipolar). Hysteresis en wervelstroom-effecten die de dynamische werking van de lagering en aandrijving kunnen verstoren, blijven hierdoor tot een minimum beperkt.

Een magneetgelagerde tafel met een slag van 100 x 100 mm en de mogelijkheid van enkele graden hoekverdraaiing wordt momenteel geassembleerd door Erik Zaaijer. De eerste meetresultaten worden spoedig verwacht. Met behulp van analytische modellering en 3D eindige elementen simulaties is het magneetcircuit gemodelleerd, zie figuur 5. De verzadiging van de rotor leidt ook hier tot een perfecte rustflux in de luchtspleten ter grootte van de halve verzadigingsveldsterkte. Een optimale regelbaarheid is het gevolg, wat leidt tot een hoge belastbaarheid, zowel statisch als dynamisch. De tijdsafgeleide van de kracht is rechtevenredig met de rustflux. Een hogere rustflux is tevens gunstig voor de te halen aandrijfkraft (met de secundaire spoelen die rondom de rotor zijn gewikkeld).

In figuur 6 wordt een 3D tekening van de opstelling getoond zoals deze momenteel wordt geassembleerd. De drie vierkante plateaus zijn de doelen voor de eddycurrent sensoren die aan de

drie rotorreinden zijn bevestigd. Deze meten de hoogte en de hoeken van het vlak. Voor positie meting in het vlak wordt een optische positie-encoder gebruikt met een slag van 100 x 100 mm en maximaal drie graden hoekverdraaiing. Hiermee kan een submicrometer nauwkeurigheid worden gehaald.

De U-vormige stator en de T-vormige rotor bestaan uit een pakket verlijmd transformatorblik. De permanente magneten zijn

Neodymium magneten; verborgen in de constructie

van de grote hoekpunten aan de rug van de dubbele U. De drie spoelen van de lagering zitten aan de uiteinden van de dubbele U.

Om de rotor wordt een dubbel pakket wikkelingen aangebracht, waarmee zowel twee orthogonale lineaire versnellingen in het vlak alsook rotaties om de verticale as

kunnen worden gegenereerd door middel van Lorentz krachten (DC motor principe). De interactie tussen lagering en aandrijving is bij een goede lagering nihil gebleken in de SPU Omdat hetzelfde aandrijfprincipe bij de PAMB wordt gebruikt, is de verwachting dat de interactie ook hier verwaarloosbaar is.

Toekomst

Een aanpak waarmee de aandrijfkraft verder kan worden verhoogd is het gebruiken van zacht ferromagnetisch spoelmateriaal (ijzeren wikkelingen) voor de aandrijving (Molenaar en Van Beek, 1996). De mogelijkheid van een zelfdragende spoel als rotor wordt nog onderzocht. In ieder geval zal worden getracht om de invloed van verstoringen, hysteresis en verliezende verminderen Dit kan door verbetering van sensoren en elektronica, maar ook door een nieuwe aanpak die momenteel wordt onderzocht het regeltechnisch inbouwen van trillingsisolatie in reluctantie actuatoren Tenslotte zal worden getracht om een planaire magneetlager configuratie als de PAMB te ontwikkelen waarbij de permanente magneten in de rotor opgenomen zijn zodat er geen draden naar de rotor gaan Een eerste opzet ligt hiervoor klaar.

Noot

Dit onderzoek wordt mede mogelijk gemaakt door financiële steun van de Stichting Technische Wetenschappen (STW) en de inzet van de vele studenten die met enthousiasme hun afstudeerwerk verrichten bij de sectie Micro-techniek. Eén van hen, Erik Zaaijer, wil ik in het bijzonder bedanken voor het verzorgen van de afbeeldingen in dit artikel.

Alexander Molenaar is promovendus Lineaire Magneetlagering bij de Sectie Micro-techniek, Vakgroep Ontwerp en Productie, Faculteit Werktuigbouwkunde, Maritieme Techniek & Industrieel Ontwerpen, Technische Universiteit Delft, tel : 015-278 3142, fax 015-278 1887, e-mail a.molenaar@wbmt.tudelft.nl
Op internet <http://www-op.wbmt.tudelft.nl/mt/projects/pamb/pamb.html>,
<http://www-op.wbmt.tudelft.nl/mt/>

Literatuur

- F. Auer, 1995 Combined Electromagnetic Suspension and Propulsion for Positioning with subMicrometer Accuracy Dissertatie, Technische Universiteit Delft.
- M V Berry en A K Geim, juli 1997 On flying frogs and levitrons. Eur. J Phys , 18(1997)4, 307-313.
- H Bleuler, 1992 A Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearing Types JSME International Journal, 35(1992)3, 335-342
- S. Earnshaw, 1842 On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Trans Camb. Phil Soc , 7 (1842), 97-112
- A Molenaar, februari 1997 Aangedreven magneetlaer Octrooiaanvraag nummer 1005344. Ten name van Stichting voor de Technische Wetenschappen te Utrecht.
- F Auer, A Molenaar, en H F van Beek, augustus 1996: Application of Magnetic Bearing for Contactless Ultra High Precision Positioning. In Proceedings of the Fifth Int Symp. on Magnetic Bearings, p. 441-445, Kanazawa, Japan 5ISMB.
- A Molenaar en H F. van Beek, June 1996 Minimization of the air gap in electromagnetic systems for levitation and propulsion through the application of high m_r winding material. In Conference Proceedings Actuator 96, p 450-453, Bremen, D AXON Technology Consult GmbH
- M.J L Sanders, januari 1997 A new linear active magnetic suspension configuration, a permanent magnet biased non-coplanar circuit. Doctoraalscriptie, Technische Universiteit Delft, faculteit Werktuigbouwkunde
- D.L. Trumper, 1990. Magnetic suspension techniques for precision motion control Dissertatie, Massachusetts Institute of Technology, U.S A



INVAR / FENICO / MUMETAAL / BIMETAAL
ULTRA HOGE REKGRENSTALEN & HOGE
STERKTE SUPER ROESTVAST STAAL

Jan Asselbergsweg 3 - 5026 RP Tilburg
Tel 013-4636065 Fax 013-4635652
E mail Sales@imphybenelux.nl
website:www.imphybenelux.nl