

Onderzoek naar stijfheideigenschappen van een planaire reluctantie motor ter verbetering van de stabiliteit

Citation for published version (APA):

Houben, M. (2003). *Onderzoek naar stijfheideigenschappen van een planaire reluctantie motor ter verbetering van de stabiliteit*. (DCT rapporten; Vol. 2003.105). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2003

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Onderzoek naar stijfheideigenschappen van een
planaire reluctantie motor ter verbetering van de
stabiliteit

M. Houben
2003-105



Samenvatting

Dit verslag bevat een weergave van wat onderzocht is in een 14-weekse stage gedaan bij Philips CFT, vanuit de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Werktuigbouwkunde, groep Constructies en Mechanismen. Philips CFT heeft voor intern onderzoek twee planaire reluctantie motoren bij de firma LAT aangeschaft om te kijken in hoeverre deze toegepast kunnen worden voor “pick-and-place”-applicaties. Deze planaire reluctantie motoren (movers) bewegen magnetisch voorgespannen en luchtgelagerd over een statortafel. Hierbij werd het probleem geconstateerd dat de lagering een instabiliteit vertoonde: het zogenaamde “Pneumatic Hammering”. Uit de literatuur blijkt dat pneumatic hammering wordt veroorzaakt doordat de variaties in de filmdikte niet precies tegelijk lopen met de drukvariaties, oftewel doet er zich een vertraging van de vultijd voor, door toedoen van de compressibiliteit van de lucht. Dit kan tegen worden gegaan door de luchtlagering en de structuur zo stijf mogelijk te maken. In dit onderzoek is gekeken naar de lagerstijfheid, de magneetstijfheid en de structuurstijfheid van de mover. De magneetstijfheid wordt onderzocht omdat deze een negatieve stijfheidsbijdrage ten opzichte van de lagerstijfheid heeft. Op deze manier zou de totale stijfheid van de luchtlagering dus lager kunnen uitvallen wat invloed heeft op de stabiliteit.

Volgens de theorie kan de lagerstijfheid een waarde hebben van ongeveer $0.7\text{kN}/\mu\text{m}$ en de magneetstijfheid een waarde van ongeveer $-2\text{N}/\mu\text{m}$. Uit de theorie blijkt dus dat de magneetstijfheid te verwaarlozen is tegenover de lagerstijfheid. Uit een eindige elementen model blijkt dat de structuur een interne vrijheidsgraad heeft, waarbij de mover over zijn diagonaal kan vouwen (een torsiemode). Deze slapte blijkt ervoor te zorgen dat de mover erg gemakkelijk vervormt. In een alternatief ontwerp is een torsiestijve koker aan de mover toegevoegd waaruit blijkt dat de torsiestijfheid van de mover ruim twee keer zo hoog wordt.

Uit vlakheidmetingen blijkt dat de mover inderdaad een vervormd lageroppervlak heeft dat wordt veroorzaakt door de dekplaat. Tevens wordt tijdens metingen vastgesteld dat de mover vervormt bij het aanbrenen van een belasting. Dit is geconstateerd door de verticale verplaatsing van de vier hoekpunten te meten. De gemeten stijfheid van de luchtlagering bedroeg slechts een kleine 20% van het theoretisch haalbare. De mover vertoont geen vervorming, wanneer deze zonder dekplaat of externe belasting aan de stator hangt. De belasting van de lagering en de magnetische voorspanning leggen dus geen vervorming op, omdat zij egaal verdeeld zijn over het oppervlak. Wanneer de mover vervormt, verandert het volume in de luchtfilm en neemt de stijfheid van het lager af, wat tot instabiliteit leidt.

Voorwoord

Dit verslag is een weergave van wat ik heb gedaan in mijn 14-weekse stage bij Philips CFT te Eindhoven. Ik heb deze stage gedaan vanuit de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), faculteit Werktuigbouwkunde, groep Constructies en Mechanismen. Tijdens deze stage heb ik te maken gehad met een opdracht waarin nauwkeurigheden in de orde van micrometers ($\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$, oftewel een duizendste millimeter) een grote rol spelen. Dit betekende voor mij een grote omschakeling, maar ik heb er zeker veel van geleerd, met name de ervaring die ik heb opgedaan met het verrichten van metingen waarin naar micrometers gekeken wordt is erg waardevol. Dit geheel heeft mij een stuk inzicht bijgebracht welke factoren tellen in micrometer-sfeer.

Ik heb mijn stageperiode als uitdagend en zeer leerzaam ervaren, maar zeker ook als erg aangenaam. Ik zou in dit voorwoord dan ook graag een dankwoord willen uiten aan mijn begeleiders vanuit de TU/e en Philips CFT, voor hun intensieve begeleiding en de verfrissende adviezen tijdens mijn stageperiode. Daarnaast wil ik ook graag de medewerkers van Philips CFT danken die mij steeds verder hebben geholpen wanneer ik vast zat en steeds klaarstonden om advies te geven.

Eindhoven, Juli 2003

Martijn Houben

Inhoudsopgave

Samenvatting	i
Voorwoord	ii
Inhoudsopgave	iii
Symbolenlijst	1
1 Inleiding	2
2 Planaire Reluctantie Motor van LAT	3
2.1 De werking van de planaire reluctantie motor	3
2.2 De toepassing van de movers.....	4
2.3 Pneumatic Hammering in movers.....	5
3 Theoretische stijfheden	6
3.1 Lagerstijfheid	6
3.2 Magneetstijfheid	7
3.3 Gecombineerde stijfheid	9
3.4 Structuurstijfheid.....	9
4 Meetresultaten	12
4.1 Vlakheidmetingen	12
4.2 Statische stijfheidmetingen	14
4.2.1 Metingen van de lagerkarakteristiek zonder magneetwerking.....	14
4.2.2 Metingen van de magneetkarakteristiek op de stator.....	17
4.2.3 Magneetkarakteristiek uit lagerkarakteristieken.....	20
4.2.4 De gecombineerde stijfheid van het lager met de magneet.....	22
4.3 Dynamische metingen.....	25
Conclusies	27
Aanbevelingen	28
Literatuurlijst	29
Bijlagen	30
Bijlage 1 Afbeeldingen van de Planar mover PF 211 HS-3	30
Bijlage 2 Reluctantie-aandrijving	34
Bijlage 3 Lagerstijfheid.....	35
Bijlage 4 Magnetische stijfheid	36
Bijlage 5 Structuurstijfheid	38
Bijlage 6 Vlakheidmetingen	45
Bijlage 7 Gebruikte meetapparatuur	52
Bijlage 8 Meetresultaten op glas.....	53
Bijlage 8.1 Statische metingen op glas met de belasting als variabele	53
Bijlage 8.2 Statische metingen op glas met de druk als variabele	56
Bijlage 9 Meetresultaten met vervorming bij metingen op stator.....	59
Bijlage 10 Metingen op de stator bij variërende druk.....	60

Symbolenlijst

Symbol	Omschrijving	Eenheid
A	Oppervlakte	mm ²
A ₀	Opp. toevoergat	mm ²
A ₁	Opp. luchtkolom	mm ²
A ₂	Opp. kameruitgang	mm ²
b	Breedte	mm
B	Fluxdichtheid	T
C _s	Statorverplaatsing op hoekpunt C	µm
d	Diameter	mm
D	Diameter kamer	mm
dC	Filmdikteverandering op hoekpunt C	µm
dz	z-Verplaatsing	µm
E	Elasticiteitsmodulus	GPa
F	Kracht	N
h	Filmdikte	µm
h _k	Kamerhoogte	mm
H _c	Magnetische veldsterkte	A/m
H _s	Overdracht structuur	ms/rad
K _f	Luchtfilmstijfheid	N/m
L, l	Lengte	mm
m	Massa	kg
n	aantal	-
p	Overdruk = p _s - p _a	bar
p _a	Omgevingsdruk 1bar	bar
p _s	Toevoerdruk	bar
R	Weerstand	A/Tm ²
R _{ms}	Magneetweerstand	A/Tm ²
R _{Fe}	Weerstand door ijzer	A/Tm ²
R _g	Weerstand door lucht	A/Tm ²
R _{Fe stat}	Weerstand door stator	A/Tm ²
S	Stijfheid	N/µm
S _{Li}	Stijfheid van een inherent langwerpige basiselement	N/µm
T	Koppel	Nm
U	Magneto Motive Force, (spanning)	J/Wb
U _{m0}	Interne spanning van de magneet	J/Wb
W _{Li}	Draagkracht van een inherent langwerpige basiselement	N

Symbol	Omschrijving	Eenheid
µ ₀	Permeabiliteit van het vacuüm	mT/A
µ _r	Relatieve permeabiliteit	-
ρ	dichtheid	kg/m ³
Φ	Flux	Wb
ω	frequentie	rad/s
ω _c	“cross-over” frequentie	rad/s

1 Inleiding

Philips CFT heeft bij de firma LAT twee planaire reluctantie motoren aangeschaft om de mogelijkheden van deze motoren in een “pick-and-place”-toepassing te onderzoeken. Deze planaire motoren (movers) zijn luchtgelagerd en magnetisch voorgespannen en kunnen zowel in x- als y-richting over een bijgeleverde stator bewegen op basis van reluctantiekrachten. Het gebruik van deze planaire motoren ten opzichte van de vaak toegepaste gestapelde brugconstructie levert een enorme massareductie van de bewegende delen op.

In een voorgaande afstudeeropdracht is gewerkt aan een ontwerp van een testopstelling, waarbij er twee movers over een stator tegelijk opereren en een ontwerp van een φ -z-module gemaakt bevestigd op de movers om componenten op PCB's (Printed Circuit Boards) te plaatsen [Luijs, 2003]. Hierbij bleek dat de lagers op den duur een instabiliteit vertoonden, reeds bij een geringe aangebrachte massa. Deze instabiliteit is het zogenaamde “pneumatic hammering” van het luchtlager, wat betekent dat er een tijdsverschil zit tussen het vullen van het volume in de luchtlaag en het opbouwen van de druk in de luchtlaag. Dit leidt tot ernstige trillingen die het nauwkeurig positioneren onmogelijk maken.

Een belangrijke parameter voor de stabiliteit van het lager is de stijfheid van de luchtlaag. In dit onderzoek is in kaart gebracht wat de stijfheid van het lager theoretisch kan zijn en daarnaast is gemeten wat de stijfheid daadwerkelijk is. Tevens is gekeken naar andere stijfheden van de mover zoals de magneetstijfheid en de structuurstijfheid en hun rol in de stabiliteit. Door de meetresultaten te interpreteren en te vergelijken met de theorie kunnen conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan.

In hoofdstuk twee zal naar de motor worden gekeken en dieper worden ingegaan op het fenomeen “pneumatic hammering”. In hoofdstuk drie zal de theorie van het luchtlager worden bekeken en de theoretische waarde van de verschillende stijfheden. Vervolgens zal in hoofdstuk vier de uitgevoerde metingen worden besproken, die zich met name richten op het in kaart brengen van de stijfheid van het luchtlager afhankelijk van de luchtspleet. Deze stijfheid is op te splitsen in een deel lagerstijfheid en een deel negatieve magneetstijfheid. Vervolgens zullen hierna de conclusies worden getrokken en de aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedaan.

2 Planaire Reluctantie Motor van LAT

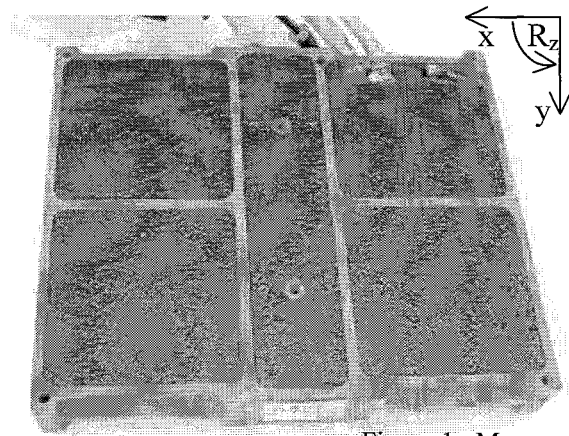
2.1 De werking van de planaire reluctance motor

Zoals in de inleiding vermeld staat zijn de planaire reluctance motoren aangeschaft bij de firma LAT met als doel deze toe te passen in een “pick-and-place”-operatie. Bij deze motoren (movers) is een tafel geleverd, de stator, waarop de movers bewegen. In figuur 1 is een foto van een mover te zien (type PF211 HS-3). Voor gedetailleerde figuren wordt naar bijlage 1 verwezen. Tijdens zijn afstuderen heeft Ir. R.M.T. Luijs onder andere een proefopstelling ontworpen waarbij de stator (Type PI-23) ondersteboven hangt en de movers eronder hangen, zie figuur 2 [Luijs, 2003]. Op deze opstelling wordt verder gegaan.

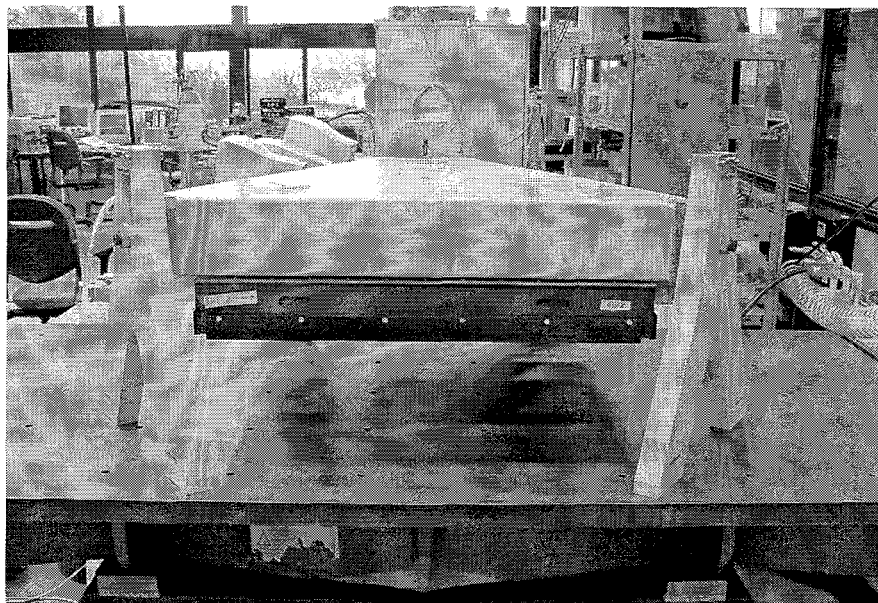
De movers zijn luchtgelagerd en magnetisch voorgespannen. Dit magnetisch voorspannen gebeurt door de permanentmagneten van de reluctance-aandrijving. De luchtlagering wordt tot stand gebracht door tien nozzles die aangesloten staan op een externe drukbron. De onderkant van de mover staat afgebeeld in figuur 3. Te zien is dat de mover is opgebouwd uit twee sets aandrijfeenheden (forcers), twee voor de x-richting en twee voor de y-richting.

Verder zijn er drie Hall sensoren aanwezig die samen x- en y-verplaatsing en rotatie rond de z-as kunnen waarnemen. In elke forcer zitten twee nozzles geïntegreerd en verder bevinden zich nog twee nozzles tussen de sensoren. Om meer inzicht te krijgen in de werking van de mover is de doorsnede van een van de forcers weergegeven in figuur 4. Met deze figuur is te verklaren hoe de forcer een stap zet door het versterken en/of verzwakken van het magnetische veld door bepaalde tanden, wat beweging van de forcer mogelijk maakt. Deze manier van aandrijven heet een reluctance aandrijving.

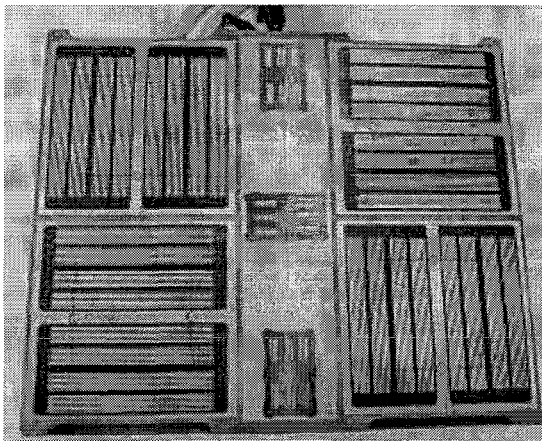
De vertanding van de stator is in twee richtingen, waardoor de mover zowel in x- als in y-richting kan bewegen. In bijlage 2 staat een verduidelijking van het reluctance-aandrijfsprincipe van de movers.



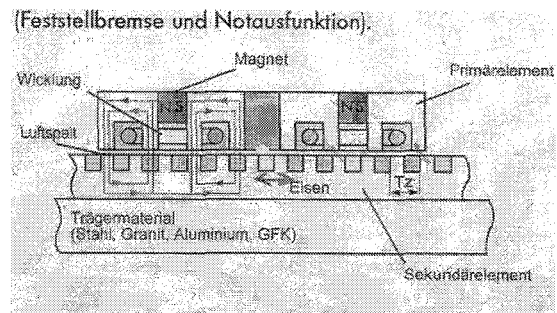
Figuur 1: Mover



Figuur 2: Meetopstelling



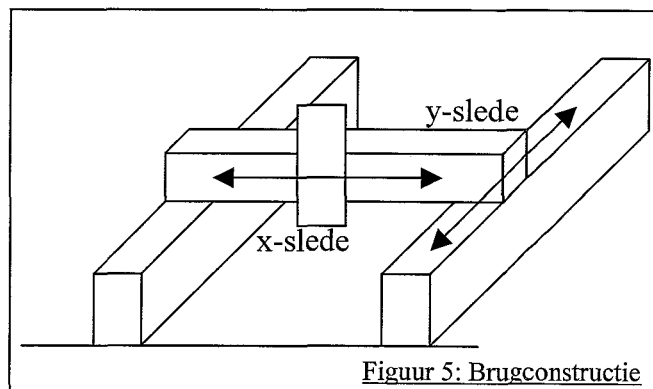
Figuur 3: Onderkant van de mover



Figuur 4: Doorsnede van een forcer

2.2 De toepassing van de movers

Een mogelijk gebruik van de planaire motoren is het gebruik voor “pick-and-place”-machines voor het plaatsen van componenten op PCB's. Hierbij kunnen meerdere movers tegelijk op één stator werken. Ze zullen in operatie bij een laadstation componenten ophalen om deze vervolgens na oriëntatie te plaatsen op een PCB. Veel toegepaste machines voor deze operaties zijn gebaseerd op het principe van een gestapelde x- en y-slede, waardoor een brug constructie ontstaat zoals in figuur 5. Te zien is dat voor een verplaatsing in y-richting de gehele brug moet worden verplaatst en aangezien de massa van deze brug groot is (een typische massa van 30kg), leidt dit tot enorme versnellingskrachten, waardoor de plaatsnauwkeurigheid negatief wordt beïnvloed. Wanneer het mogelijk blijkt dit met de movers te doen (een typische massa van 4kg), zou dit een enorme massareductie op kunnen leveren waardoor veel hogere nauwkeurigeden behaald kunnen worden. Op de movers komen ieder vier ϕ -z-modules die onderdelen kunnen vastpakken en plaatsen.



Figuur 5: Brugconstructie

2.3 Pneumatic Hammering in movers

Zoals vermeld in de inleiding vertonen de luchtlagers een instabiliteit, bij aerostatische lagers wordt instabiliteit “pneumatic hammering” genoemd. Deze instabiliteit wordt veroorzaakt door tijdsverschillen tussen filmdiktevariaties en drukvariaties, oftewel vultijdvertragingen, door de compressibiliteit van de lucht. Een definitie van pneumatic hammering is een zelfexciterende trilling die in stand wordt gehouden door een energiestroming geleverd door de luchttoevoer [Vermeulen, 1999]. Als criterium voor de instabiliteit wordt het criterium van Plessers gebruikt. Hier beschouwt men een mechanisch systeem dat gelagerd wordt door verschillende luchtlagers met uitwendige drukbron als een teruggekoppeld systeem waarbij de stabiliteitslimieten worden gegeven door het Nyquist criterium. Dit zegt dat pneumatic hammering zal optreden wanneer de locus van het product van de frequentie-responsie-functie van de structuur $H_s(\omega)$ en de luchtfilm $K_f(\omega)$, in het complexe vlak, het punt $(-1,0)$ omcirkelt. Wanneer het imaginaire deel van de lagerstijfheid $K_f(\omega)$ altijd positief is, betekent dit dat er altijd positieve demping optreedt en pneumatic hammering nooit zal optreden. Over het algemeen wordt het imaginaire deel van de stijfheid onder een bepaalde frequentie negatief, de zogenaamde “cross-over” frequentie ω_c , deze frequentie is lagerafhankelijk. Wanneer de structuur van de luchtgelagerde mover wordt beschouwd als een massa-veer-systeem met equivalente waarden voor de massa en de veer, zal pneumatic hammering niet optreden wanneer de bijbehorende laagste eigenfrequentie hoger is dan de “cross-over” frequentie. Is dit niet zo, dan zal er voor moeten gezorgd worden dat het reële deel van de lagerstijfheid hoog genoeg is zodat het punt $(-1,0)$ niet wordt omcirkeld.

Hieruit volgen een aantal parameters die gevarieerd kunnen worden om pneumatic hammering te vermijden. Deze parameters kunnen worden opgesplitst in lagerparameters en structuurparameters. De lagerparameters kunnen zo worden aangepast dat de frequentie waarbij het imaginaire deel van de stijfheid negatief wordt, daalt of zelfs nul wordt. Dit kan bij inherent gecompenseerde, convergente luchtfilms worden gedaan door [Plessers,1988]:

- Afname van de toevoerdruk
- De luchtfilm minder conisch maken
- Vergroten van de diameter van het toevoergaatje
- Vergroten van het lageroppervlak

Om pneumatic hammering tegen te gaan door aanpassing van de structuur moeten de volgende parameters van de structuur als volgt worden aangepast:

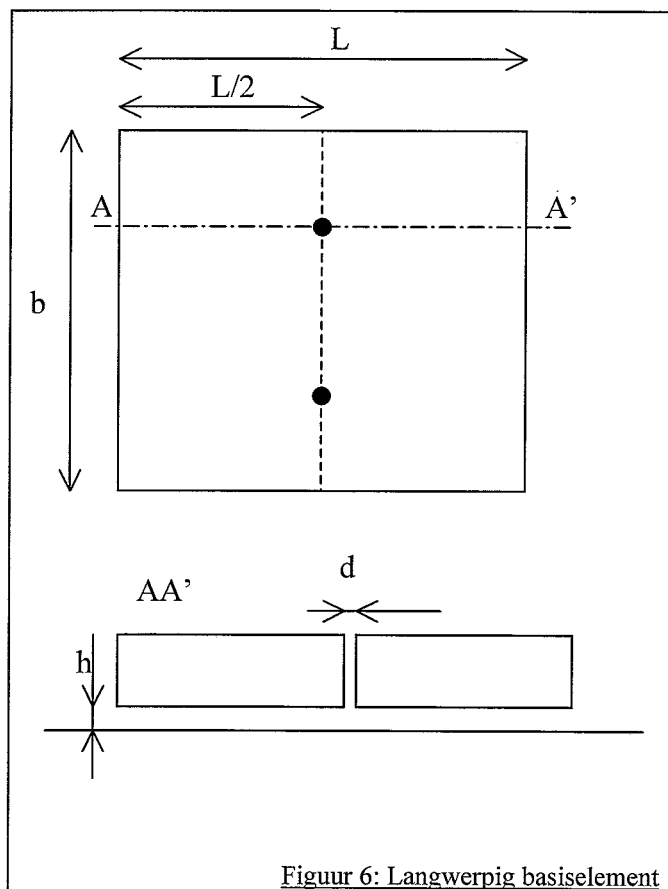
- Hogere stijfheid
- Toevoeging van demping
- Afname van de massa

3 Theoretische stijfheden

In het vorige hoofdstuk is gebleken dat de stijfheden van het luchtlager en de structuur een grote rol spelen in de stabiliteit van het lager. Daarom wordt in dit hoofdstuk gekeken naar de theoretische mogelijkheden om de bestaande luchtlagering te verbeteren. In dit hoofdstuk zal daarom een theoretische schatting worden gedaan van de lagerstijfheid en de magneetstijfheid, door middel van betreffende literatuur. Vervolgens wordt via een eindige elementen pakket gekeken naar de stijfheden van de structuur.

3.1 Lagerstijfheid

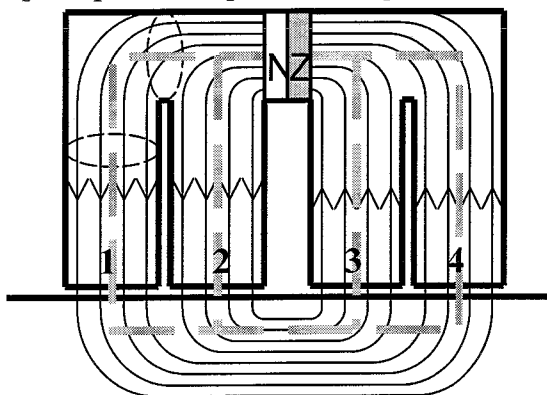
In de stroming in een luchtlager zijn een groot aantal parameters bepalend voor de drukverdeling en daarmee de draagkracht en de stijfheid van het luchtlager. Hierdoor wordt gebruik gemaakt van benaderingsformules [Holster, 1967]. Voor een tweetal basiselementen geeft Holster een afleiding van de stijfheid, dit zijn het langwerpige basiselement en het cirkelvormig basiselement. Van zo'n basiselement kunnen de afmetingen en het aantal toevoergaatjes als parameter worden ingegeven. In het geval van de mover, kan een forcer worden vergeleken met een langwerpig basiselement met dezelfde afmetingen, twee toevoergaatjes en zonder kamers, zie figuur 6. Er wordt uitgegaan van een situatie zonder kamers, omdat de kamers in de luchtlagers zodanig klein en ondiep zijn, dat ze nauwelijks invloed hebben. De lagers van de mover zijn inherent gecompenseerd en bedragen theoretisch een stijfheid van $1.5 \cdot 10^8 \text{Nm}^{-1}$. Voor de totale mover wordt de theoretisch maximaal haalbare stijfheid dan ongeveer $7.3 \cdot 10^8 \text{Nm}^{-1}$ berekend bij een filmdikte van $9.4 \mu\text{m}$. Dit is gebaseerd op een berekening met vier basiselementen voor de forcers en een basiselement voor de luchtlagering rond de Hall-sensoren. Zie voor de berekeningen en een duidelijkere motivatie bijlage 3.



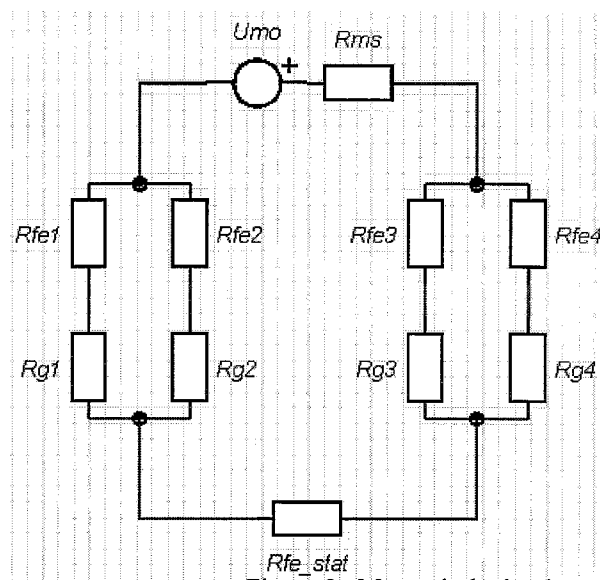
Figuur 6: Langwerpig basiselement

3.2 Magneetstijfheid

De mover is magnetisch voorgespannen door de permanent magneet van de reluctance-aandrijving. Deze magnetische voorspanning is afhankelijk van de filmdikte, waar bij een kleinere filmdikte een grotere kracht zal optreden. De grootte van de magnetische voorspankracht hangt in hoge mate af van de weg die de flux aflegt. Deze weg wordt weergegeven in figuur 7. Deze figuur kan schematisch worden weergegeven, waarbij de magneet een spanningsbron is met een interne magnetische weerstand en de delen van de weg door ijzer en door lucht worden beschouwd als magnetische weerstanden [Compter, 2001], zoals in figuur 8.

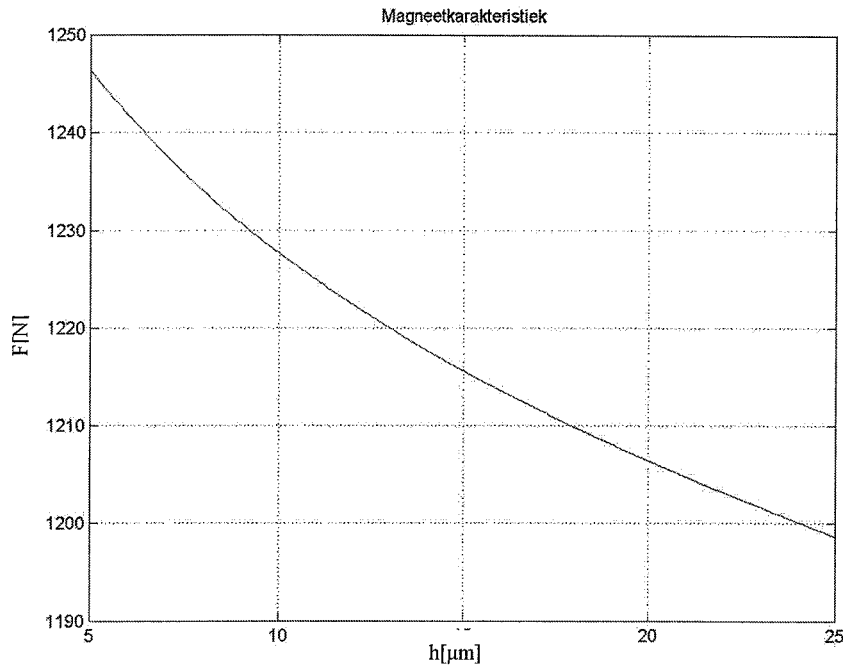


Figuur 7: Flux door het systeem



Figuur 8: Magnetisch circuit

Aan deze bron en weerstanden zijn vervolgens waarden toe te kennen, waarmee de magneetkracht kan worden berekend. Hierbij is de waarde van de weerstanden van de flux door lucht, afhankelijk van de filmdikte en kan dus zo de kracht afhankelijk van de filmdikte worden berekend. Dit is gedaan in bijlage 4. Hier wordt een verloop van de kracht gevonden zoals in figuur 9. Voor luchtspalten tussen 0 en 25µm wordt een redelijk constante magneetstijfheid gevonden van gemiddeld -2.4N/µm. De lostrekkraft bedraagt ongeveer 1246N (bij h=0µm).



Figuur 9: Theoretische magneetkarakteristiek

Er moet echter rekening gehouden worden met het feit dat een groot deel van de parameters onzeker zijn. Gebruikte afmetingen zijn gedeeltelijk geschat en vooral de waarde voor μ_r van ijzer is onzeker (deze kan variëren tussen 100 en 2000 [Compter, 2001]). Verder is het niet zeker wat voor een magneten in de forcers zijn verwerkt, waardoor de magneetsterkte mogelijk anders kan zijn. Dit laatste varieert ook nog bij het in regeling zetten van de mover, waarbij de activering van de spoel een plaatselijke versterking of verzwakking van het veld veroorzaakt die weer kwadratisch voorkomt in de kracht, zie bijlage 2 voor het gebruik van de spoelen ten bate van de reluctance aandrijving. Toch is hiermee een globaal inzicht verkregen in wat de magneet doet en welke parameters daarbij een rol spelen. In paragraaf 4.2.3 zal gebruik worden gemaakt van deze theoretische benadering van de magneetstijfheid bij de verwerking van de metingen, om zo de werkelijke magneetkarakteristiek af te leiden.

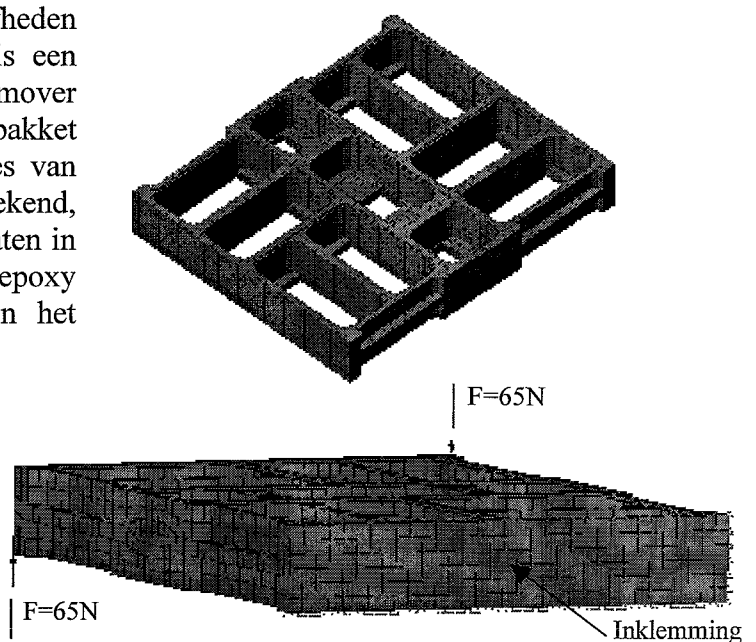
3.3 Gecombineerde stijfheid

De stijfheid van een luchtlager kan beschouwd worden als een veer. Vanwege de aantrekkingskracht die de magneet levert, heeft de magneet een negatieve stijfheidsbijdrage. In principe kan deze situatie worden beschouwd als twee parallelle veren waarvan er een negatief is. De stijfheden mogen dus bij elkaar worden opgeteld om zo een totale stijfheid te vinden voor de luchtlagering met magnetische voorspanning. Het is te zien dat de lagerstijfheid volgens de theorie wordt verwacht veel groter te zijn dan de magneetstijfheid (ongeveer een factor 300). Tevens is de stijfheid van de magneet veel constanter over het bereik van de mover ($h=5-25\mu\text{m}$). De kracht-weg-diagrammen van de magneet en het luchtlager kunnen in één grafiek worden getekend, wanneer vervolgens de magneetkarakteristiek wordt gespiegeld om de x-as zal een snijpunt ontstaan bij de filmdikte van de mover zonder externe belasting. Bij externe belasting zal de magneetkarakteristiek al naar gelang het een positieve of negatieve belasting betreft naar boven of naar beneden moeten verschuiven, zodat het nieuwe snijpunt de filmdikte bij deze belasting aangeeft. Voor luchtlagers is de magneetkarakteristiek te beschouwen als een permanente externe belasting. De magneetkarakteristiek mag daarom van het kracht-weg-diagram van het luchtlager worden afgetrokken, om zo een karakteristiek te verkrijgen die de verplaatsingen weergeeft al naar gelang de extra externe belasting.

Hieruit kan vervolgens een stijfheid worden ontleed door deze karakteristiek te differentiëren, wat feitelijk het verschil in stijfheid van de lager- en de magneetkarakteristiek is. Gezien de verhouding van de stijfheden volgens de theorie, zal de magneetstijfheid waarschijnlijk een verwaarloosbare invloed hebben. In paragraaf 4.2.3 zal dit worden uitgewerkt aan de hand van de meetresultaten.

3.4 Structuurstijfheid

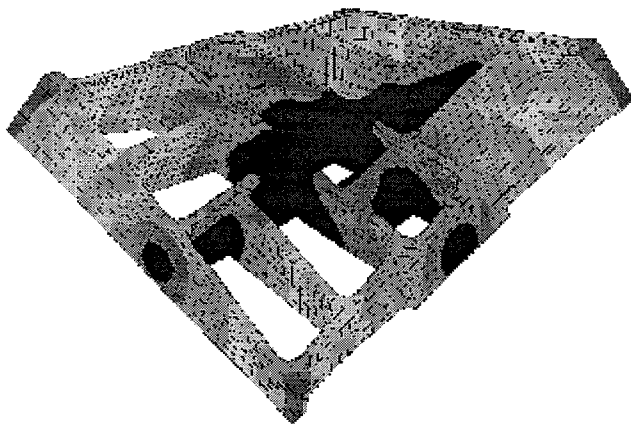
De vakken in de structuur van de mover zijn te vergelijken met open dozen, met opgevulde gaten in de bodems. Dit maakt de mover in zijn geheel ook te vergelijken met een open doos. Deze doos heeft een interne vrijheidsgraad, namelijk het vouwen over de diagonaal, wat inhoudt dat de bodemplaat tordeert [Rosielle, 2000]. Om de stijfheden van de mover in kaart te brengen is een Eindige Elementen Model van de mover gemaakt met behulp van het FEM-pakket Algor. Hierin zijn de eigenfrequenties van de mover en de torsiestijfheid berekend, daarbij is gelet op het effect van de gaten in de bodem waarin de magneten met epoxy zijn vastgelijmd. Deze gaten zijn in het model opgevuld met een materiaal met een vervangende waarde voor de dichtheid (2500kg/m^3) en de elasticiteitsmodulus (2.8GPa) voor de ijzer-epoxy samenstelling. De modale analyses zijn gedaan zonder toevoeging van rand-



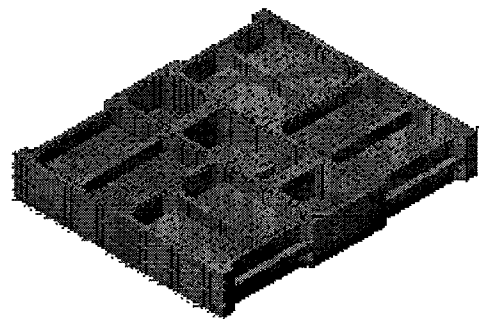
Figuur 10: FEM-model mover en torsieopstelling

voorwaarden, de eerste zes gevonden eigenfrequenties zijn dan ook bewegingen als star lichaam. Bij de berekening van de torsiestijfheid is de mover aan één korte zijde ingeklemd en is op de twee tegenoverliggende hoekpunten van de andere korte zijde een puntkracht aangebracht van 65N in positieve en negatieve z-richting, waardoor er een koppel van $0.154 \cdot 65 = 10\text{Nm}$ ontstaat, zie figuur 10. Hierbij is de z-verplaatsing berekend, zodat ook de hoekverdraaiing berekend kan worden en daarmee de torsiestijfheid. In bijlage 5 is een gedetailleerd overzicht te zien van de berekeningen en de resultaten, daarin zijn ook alle figuren opgenomen. Het model is opgebouwd uit massieve onderdelen (met uitzondering van de torsiekoker). In werkelijkheid lopen door sommige wanden nog toevoerkanaaltjes voor de lucht en zijn in sommige wanden gaten in gemaakt voor de bedrading (zie ook bijlage 1).

In het eerste model is alleen de aluminium basisstructuur gemodelleerd, hier werd een eerste interne eigenfrequentie gevonden van 881Hz. Zoals te zien is in figuur 11, is de torsie van de structuur de eerste mode. Wanneer de gaten in de bodem worden opgevuld met het vervangende materiaal voor de ijzer-epoxy samenstelling, zoals weergegeven in figuur 12, blijkt de eigenfrequentie te dalen naar 750Hz. Dit is aannemelijk aangezien er meer massa wordt toegevoegd dan stijfheid. De torsiestijfheid vertoont een licht verbetering. De basisstructuur toont een maximaal verplaatsingsverschil van $186\mu\text{m}$, wat overeenkomt met een stijfheid van ongeveer 8.3Nm/mrad , terwijl de structuur met toevoeging van het vervangende materiaal voor de ijzer-epoxy samenstelling, een maximaal verplaatsingsverschil heeft van $158\mu\text{m}$, wat 9.8Nm/mrad inhoudt. Deze stijfheid komt overeen met de stijfheid van een plaat aluminium van dezelfde afmetingen van 11mm dik.



Figuur 11: Eerste eigen mode van de mover

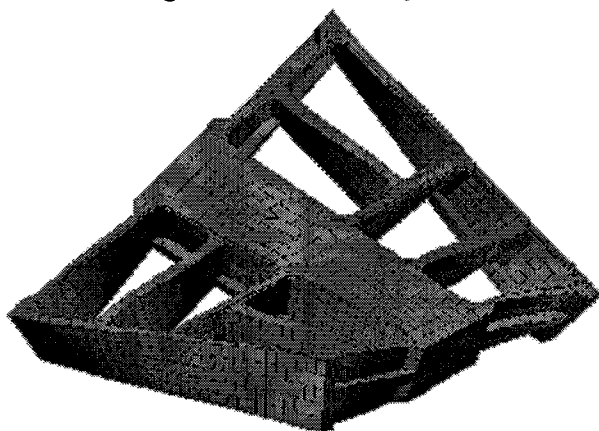


Figuur 12: Gevulde mover

Ter verbetering van de constructie moet torsiestijfheid worden toegevoegd. Als alternatief zou een (dichte) torsiestijve koker opgenomen kunnen worden op de plek van de Hall-sensoren. De structuur ziet er dan ongeveer uit zoals in figuur 13. De eerste eigenfrequentie ligt nu bij 1623Hz, wat bijna een verdubbeling is. Verrassend is dat bij de eerste mode het lichaam nog steeds tordeert. Door een optimale keuze van de torsiekoker, kan nog meer stijfheid worden toegevoegd zonder enorm veel massa toe te voegen, waardoor deze eigenfrequentie stijgt totdat de torsiemode niet meer de eerste is. Wanneer het lichaam weer wordt gevuld met het vervangende materiaal voor de ijzer-epoxy samenstelling daalt de eerste eigenfrequentie naar 1607Hz, wat een ruime verdubbeling is van de gevulde structuur zonder torsiekoker.

Bij de berekening van de torsiestijfheid worden de volgende waarden gevonden. Voor de lege structuur met torsiekoker bedraagt het verplaatsingsverschil een maximale waarde van $82\mu\text{m}$ en daarmee de stijfheid van 18.8Nm/mrad . Voor de gevulde structuur bedraagt het maximaal verplaatsingsverschil $75\mu\text{m}$ en daarmee een stijfheid van 20.6Nm/mrad . Door de toevoeging van de torsiekoker zijn de waarden van de torsiestijfheid van zowel de lege als de gevulde structuur dus verdubbeld.

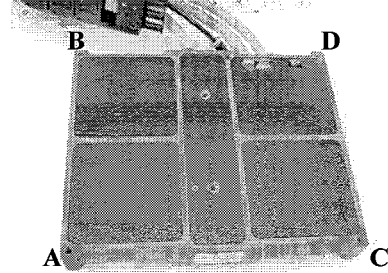
Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat het zeer waardevol is een aanpassing te doen aan de constructie van de mover. Naast het genoemde verbeteringsvoorstel tot verstijving van de basisstructuur zou gekeken kunnen worden naar een ontwerp waarbij de vier forcers, los van elkaar, met een zekere flexibiliteit bevestigd zijn waardoor ieder lager afzonderlijk de kromming in het statoroppervlak veel beter kan volgen. De samenstelling van de vier losse forcers zou moeten worden voorzien van bij voorkeur drie stijve bevestigingspunten voor het monteren van een belasting. Op deze manier is het probleem dat de mover zich gedraagt als een tafel met vier poten ook opgelost, terwijl in het bestaande ontwerp een verplaatsing van één van de vier hoeken van de stator af, automatisch een tegengestelde verplaatsing van een ander hoekpunt opdringt. Hierdoor komt de mover in vervormde toestand en spelen volumeveranderingen van de luchtfilm een grote rol wat tot stijfheidsverlies en zelfs instabiliteit van het lager leidt.



Figuur 13: Eerste mode van de mover met torsiekoker

4 Meetresultaten

Tijdens het onderzoek zijn alle metingen uitgevoerd aan één mover, namelijk mover 1 (serienummer P0584). In dit hoofdstuk zal het wanneer het over de mover gaat dus mover 1 betreffen. De betreffende hoekpunten van de mover worden aangeduid volgens figuur 14 met de letters A t/m D. Tenslotte is voor alle metingen (zowel op de stator als op glas) een nulpunt gedefinieerd, gebaseerd op de aanname dat de mover zonder luchttoevoer, over het volledige oppervlak aanligt. Op dit moment zijn de verplaatsingsmeters op nul ingesteld. Alle metingen zijn gedaan zonder dat de regeling was ingeschakeld.



Figuur 14: Benaming van de hoekpunten

4.1 Vlakheidmetingen

Na aanschaffing van de movers en de stator zijn experimenten uitgevoerd met deze movers. Hierbij werd opgemerkt dat bij een relatieve toevoerdruk van 4bar de mover op een bepaald moment begon aan te lopen, terwijl deze druk voorgeschreven staat. Vanaf dat moment is de toegepaste relatieve toevoerdruk 6bar geweest. Aansluitend is de vlakheid van het lageroppervlak van de movers opgemeten met een Zeiss 3D coördinaten meetmachine (Philips CFT). Het bleek dat mover 1 een onvlakheid had van $32\mu\text{m}$ (zie figuur 1 in bijlage 6) hoewel in de specificatie $10\mu\text{m}$ staat vermeld. In bijlage 6 zijn alle uitgevoerde vlakheidmetingen aan mover 1 in chronologische volgorde weergegeven. Deze mover is vervolgens opgestuurd naar LAT waar deze is nabewerkt en teruggestuurd met een meetrapport waarin een onvlakheid van $8.5\mu\text{m}$ werd geclaimd, figuur 2 in bijlage 6. Direct bij aankomst werd bij Philips CFT de mover nogmaals nagemeten en werd een onvlakheid geconstateerd van $23\mu\text{m}$ die zich uitte als een torsie vervorming waarbij hoekpunten A en D pieken en B en C dalen vertoonden (figuur 3 in bijlage 6). LAT had hiervoor aanvankelijk geen verklaring en toen het lager enige tijd later pneumatische hamering ging vertonen, was dit de aanleiding voor Philips CFT om hier verder onderzoek aan te verrichten via een stageopdracht. Later volgde een verklaring waarin LAT aangaf dat het materiaal van de mover “leeft” en daarom krom kan trekken, wanneer de mover op een onvoldoende stabiele ondergrond wordt opgeslagen. Een tweede reden die gegeven werd is dat door het aanbrengen van constructies op de mover, deze krom kan trekken. Het wordt door hen aanbevolen dit door technici van LAT te laten doen. Verder werd vermeld dat er ook thermische effecten een rol kunnen spelen [Koch, 2003].

In dit onderzoek is ook aan de vlakheid van de mover gemeten. Bij de eerste meting (figuur 4 in bijlage 6) is dezelfde onvlakheid terug te zien als in de meting gedaan net na ontvangst (figuur 3 in bijlage 6), namelijk de torsie vervorming van het lagervlak. Vervolgens zijn de drie bouten waarmee de dekplaat vast zat aan de mover los gedraaid, waarna opnieuw gemeten werd. Dit gaf als resultaat een onvlakheid onder de $10\mu\text{m}$ zonder duidelijke vervorming, zoals te zien is in figuur 5 in bijlage 6. In de figuur staat echter een grote piek in de buurt van hoekpunt A, deze piek wordt verondersteld als veroorzaakt door een vervuiling van het oppervlak. Dit is nagegaan door op deze plek een aantal meetpunten te herhalen, waarbij de piek niet terug te vinden was. Nadat de dekplaat opnieuw op de mover bevestigd is resulteert de vorm weergegeven in figuur 6 in bijlage 6. Hierin is te zien dat de mover wederom een torsie vervorming vertoont, maar deze keer andersom. Dat wil zeggen dat de pieken ditmaal liggen bij de

hoekpunten B en C en de dalen bij hoekpunten A en D. Het is blijkbaar mogelijk om met de dekplaat het voorvlak van het lager significant te vervormen, afhankelijk van de montagevolgorde en het aandraaimoment in de boutjes, ontstaat een niet reproduceerbare lagergeometrie. De bouten waarmee de dekplaat vastzit op de mover bevinden zich op de hoekpunten B en D en een derde ligt in het midden tussen de hoekpunten A en C op ongeveer 36mm van het geometrisch middelpunt af. Door de bout op hoekpunt D meer aan te draaien, is de torsie vervorming van het lageroppervlak (tijdelijk) verdwenen, zoals te zien is in figuur 7 in bijlage 6.

Hieruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken. De mover zonder dekplaat is vlak binnen $10\mu\text{m}$, maar in combinatie met de dekplaat kan de onvlakheid niet reproduceerbaar oplopen tot $30\mu\text{m}$. Als gevolg van hysteresis in de bevestiging tussen de dekplaat en de mover in combinatie met thermal snapping, is de dekplaat die op de uiterste vezels van de mover is bevestigd, in staat de geometrie van de mover voor te schrijven. Dit verklaart ook waarom de vlakheidmetingen aan de nabewerkte mover direct voor (bij LAT) en direct na transport (bij Philips CFT) zulke enorme verschillen vertonen. Door de “coldshock” tijdens transport werd de onvlakheid vergroot van $8.5\mu\text{m}$ (figuur 2 in bijlage 6) naar $23\mu\text{m}$ (figuur 3 in bijlage 6)

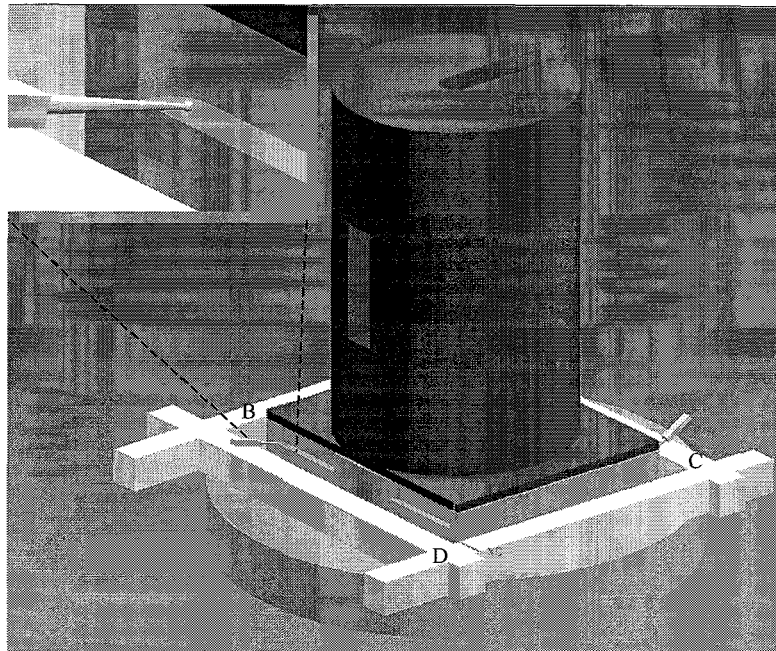
Het blijkt dus dat het lager bij externe belasting significant en niet reproduceerbaar zal vervormen, zowel door de gestapelde gewichten als door het verschil in uitzetting met de dekplaat. Dit impliceert een variatie het volume lucht onder het lageroppervlak wat de oorzaak is van de instabiliteit (pneumatic hammering, zie paragraaf 2.3).

4.2 Statische stijfheidmetingen

Bij de statische stijfheidmetingen zullen altijd de druk en/of de kracht worden ingesteld en de verplaatsingen gemeten, omdat het gebruikelijk is in de literatuur lagerkarakteristieken weer te geven met de verplaatsing op de x-as uitgezet, is deze representatie hier gevolgd. Verder is de massa van de mover verwaarloosbaar verondersteld in het krachterevenwicht.

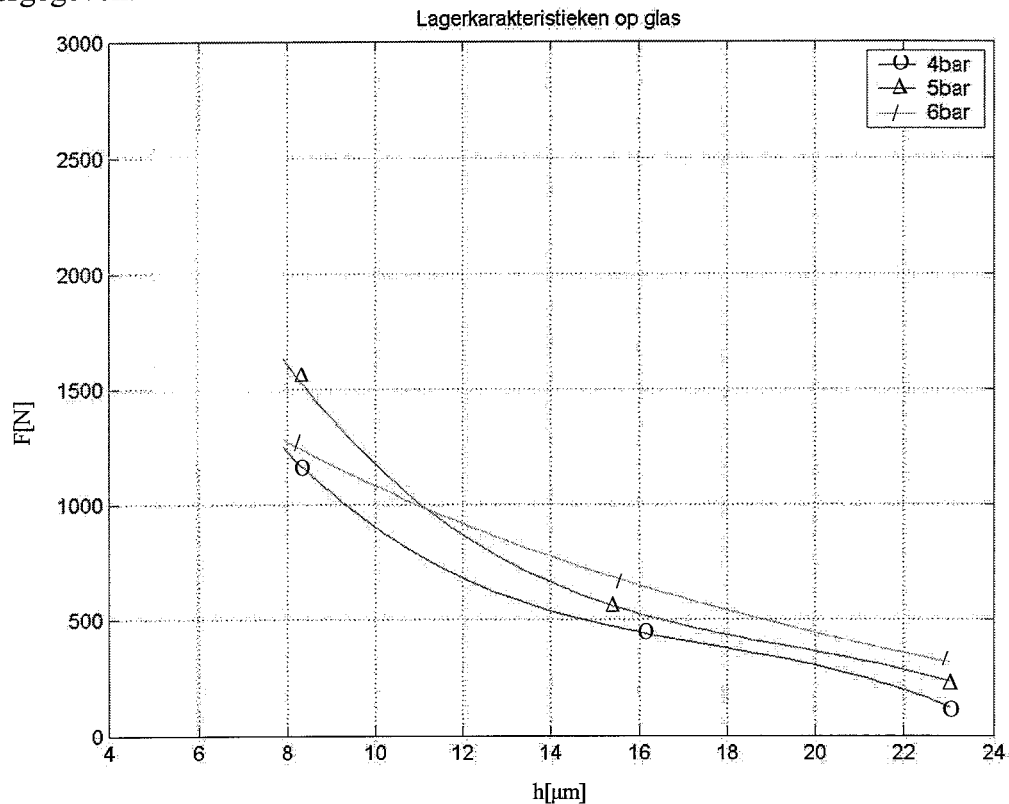
4.2.1 Metingen van de lagerkarakteristiek zonder magneetwerking

Zoals vermeld in hoofdstuk 3 heeft de negatieve stijfheid van de magneetkarakteristiek in dit geval een verwaarloosbaar effect op de positieve stijfheid van het luchtlager (stijfheidverhouding 300:1). Omdat echter (afhankelijk van de belasting) de geometrie van het lagervlak significant afwijkt van de theoretische vlakheid, is het waarschijnlijk dat de gemeten stijfheid lager uitvalt dan de gemeten lagerstijfheid. Derhalve wordt experimenteel nagegaan wat het verschil is tussen de karakteristieken met magneet en de karakteristieken zonder magneet. Hiervoor is de mover van de stator verwijderd en op een “planglas” geplaatst. Dit planglas heeft een dikte van ongeveer 30mm. Op dit glas zijn verschillende metingen gedaan om de karakteristieken van de luchtlagering zonder magneetwerking in kaart te brengen. Belastingen zijn aangebracht door het stapelen van massa's van 10kg op de mover. Bij elke meting is de verplaatsing gemeten door TESA zwenktasters op twee schuin tegenoverstaande hoekpunten (A-D, B-C) en vervolgens is de meting herhaald waarbij de andere hoekpunten werden gemeten, zie figuur 15. In bijlage 7 zijn de gebruikte sensoren en versterkers weergegeven. De verplaatsingsmeters staan via een magnetisch statief vast op de meettafel. De tasters raken de mover op de ribben aan de zijkant van de mover (zie detail figuur 15). Tijdens de metingen op glas zijn de bewegingen van de mover in het vlak geborgd met behulp van tape. De dekplaat lag hierbij los op de mover. Bij verschillende drukken, te weten 6, 5 en 4bar is de externe belasting gevarieerd. Bij 6bar bleek de verplaatsing van de hoekpunten A en D systematisch veel grotere uitwijkingen te vertonen dan B en C (tot $7\mu\text{m}$), terwijl bij 5 en 4bar deze verschillen binnen de $2\mu\text{m}$ lagen, zie bijlage 8. Grote verschillen in verplaatsing werden eveneens geconstateerd bij het variëren van de lagerdruk bij gelijke belasting, gemeten bij 60, 90 en 110kg. Bij een belasting van 60kg bleek de verplaatsing significant groter voor de hoekpunten A en D ($5\mu\text{m}$). Bij 90 en 110kg bedroeg het verschil minder dan $3\mu\text{m}$ waarbij hoekpunten B en C echter meer verplaatsten.



Figuur 15: Meetopstelling op glas

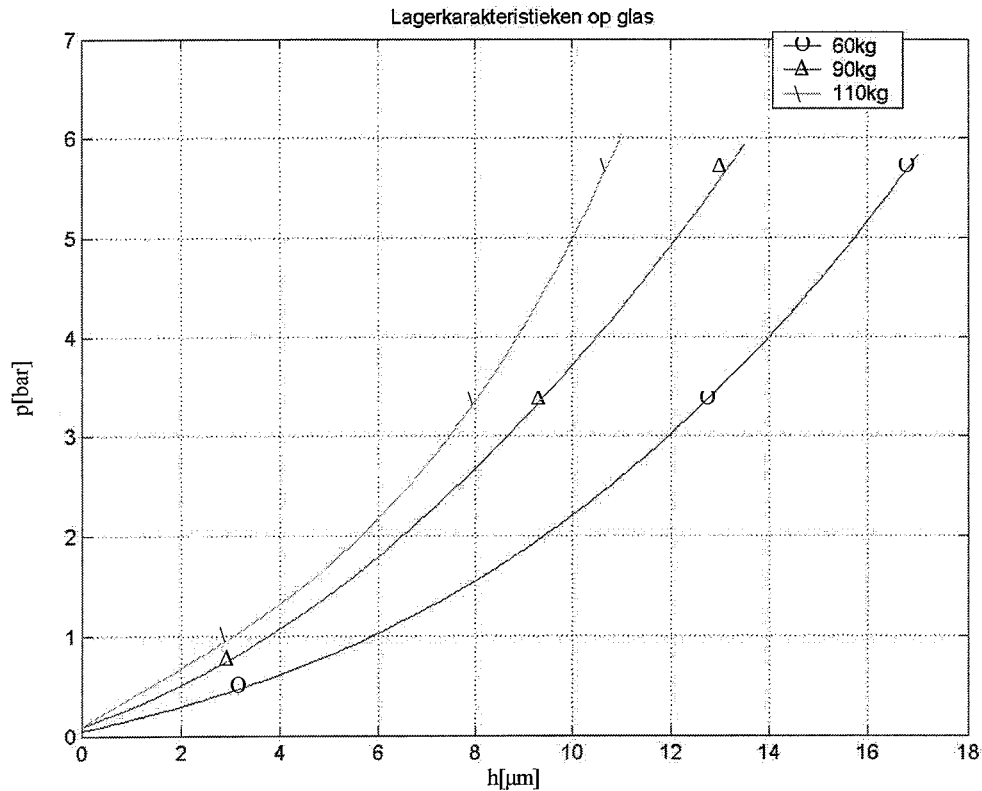
Om een gemiddelde filmdikte te kunnen bepalen zijn polynomen door de meetpunten per hoekpunt gefit. Vervolgens zijn van deze polynomen de gemiddelden genomen als gemiddelde filmdikte van de mover. Op deze manier hebben toevallige uitschieters en meet onnauwkeurigheden in verplaatsing als het gevolg van het bijplaatsen van massa's zo min mogelijk effect op de metingen. Zowel voor de meting waarbij de externe belasting is gevarieerd als voor de meting waarin de druk is gevarieerd zijn uit de gefitte polynomen per hoekpunt de gemiddelden bepaald, weergegeven in figuur 16 en 17 respectievelijk. Deze gemiddelde geeft in feite de karakteristiek van de luchtfilm weer, zonder de interne vervormingen van de mover. In bijlagen 8.1 en 8.2 zijn de meetwaarden en grafieken betreffende de verplaatsing van de afzonderlijke hoekpunten weergegeven.



Figuur 16: Kracht-weg-diagram voor verschillende druken.

De polynomen zijn verder doorgetrokken dan het bereik van de meetwaarden (10-23μm), met andere woorden: er is een extrapolatie toegepast. Dit is gedaan omdat deze data later nog van belang zijn.

Voor de grotere filmdiktes is te zien dat bij een hogere druk dezelfde kracht al bij een grotere filmdikte gedragen kan worden, overeenkomstig de theorie. Voor kleinere filmdiktes wijkt de karakteristiek van 6bar duidelijk af van de theoretische verwachting. Deze vlakt af en heeft snijpunten met de karakteristiek van 4 en 5bar, wat aantoont dat deze meting niet geheel betrouwbaar is.



Figuur 17: Filmdikte afhankelijk van de druk, bij verschillende belastingen

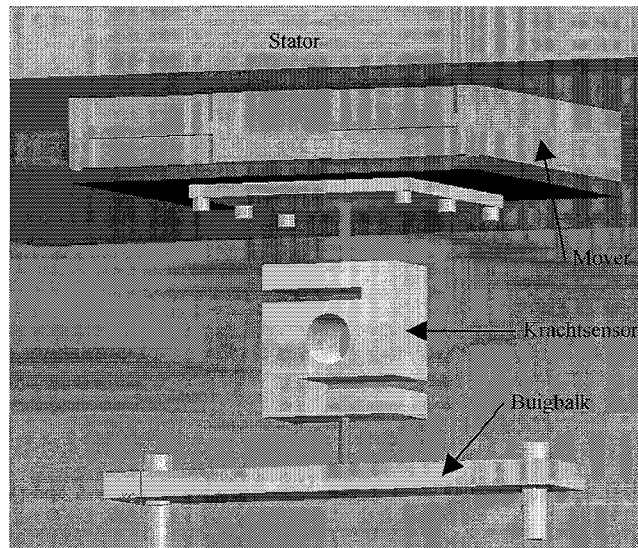
Het verloop van figuur 17 is eigenlijk heel logisch: bij dezelfde druk is een kleinere filmdikte nodig om een grotere belasting te dragen en om dezelfde filmdikte te bereiken bij een grotere belasting is een hogere druk nodig. Deze grafiek is later nog van belang om punten van de magneetkarakteristiek te bepalen. Om te controleren in hoeverre de meetwaarden van beide experimenten (figuur 16 en 17) met elkaar overeenstemmen zijn de filmdiktes bij 4, 5 en 6bar, bij een belasting van 60 en 90kg uit beide figuren naast elkaar gezet. Tevens is het verschil opgenomen, dit verschil bedraagt maximaal $0.8\mu\text{m}$ wat betekent dat de metingen goed met elkaar in overeenstemming zijn.

Instelling	Filmdikte volgens figuur 16	Filmdikte volgens figuur 17	Vershil
4bar 60kg	13.2	14.0	0.8
4bar 90kg	10.2	10.5	0.3
5bar 60kg	15.0	15.7	0.7
5bar 90kg	11.9	12.1	0.2
6bar 60kg	17.1	17.2	0.1
6bar 90kg	12.5	13.6	1.1

4.2.2 Metingen van de magneetkarakteristiek op de stator

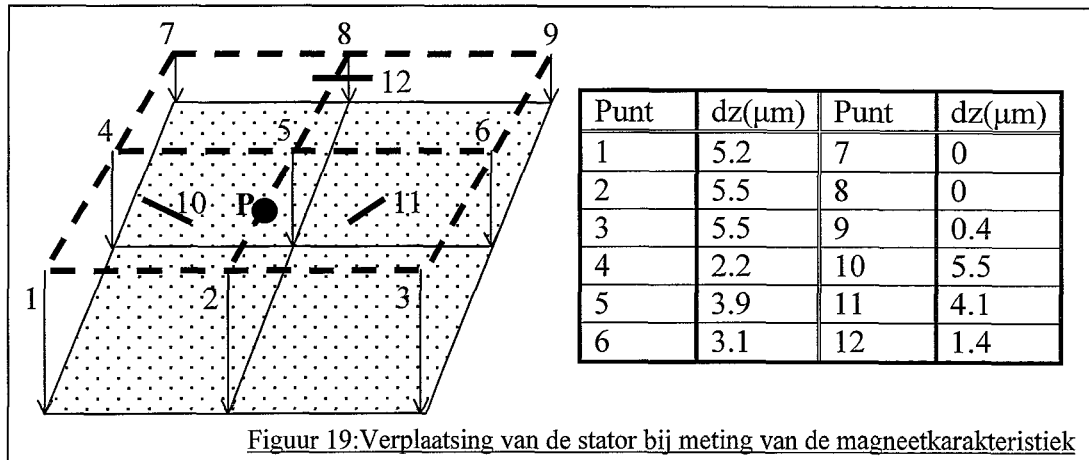
Nu de lagerkarakteristiek bekend is, is het zaak om de magneetkarakteristiek in kaart te brengen. Zoals in hoofdstuk 3 is uiteengezet, is de kracht geleverd door de magneet afhankelijk van een aantal factoren, zoals de magneetsterkte en afmetingen, de lengte door ijzer, het oppervlak en de permeabiliteit van het ijzer en de dikte van de luchtspleet. Een aantal parameters hierin, waaronder de permeabiliteit, is erg onzeker. Om de magneetkarakteristiek te laten sluiten bij de gevonden meetpunten wordt de relatieve permeabiliteit van het ijzer (μ_r) gekozen als variabele, waarvoor moet gelden dat $100 < \mu_r < 2000$.

De magneetkarakteristiek heeft een zekere (negatieve) stijfheid en dit betekent dat hoe dichter de mover bij de stator is, hoe groter de aantrekkingskracht is van de magneet. Dit wil zeggen dat wanneer er een kracht wordt aangebracht op de mover die van de stator is afgericht waarbij geen luchttoevoer aanwezig is ($h=0$), de mover geen verplaatsing zal vertonen. Slechts wanneer deze kracht het niveau bereikt van de magneetkracht, zal de mover instantaan van de stator afvallen. Het lijkt dus beter een zeer geleidelijke verplaatsing op te leggen en daarbij de kracht te meten. Dit wordt in eerste instantie getracht volgens de opstelling die schematisch is weergegeven in figuur 18. Door de bouten in de meettafel (niet weergegeven) aan te draaien was het de bedoeling om de mover van de stator af te trekken en hierbij naar het krachtverloop te kijken. Het probleem daarbij is alleen dat de mover eerst aan een kant loslaat en daarna pas in zijn geheel. Hierbij is het dus niet mogelijk iets zinnigs te zeggen over de lostrekkkracht.



Figuur 18: Meetopstelling op de stator

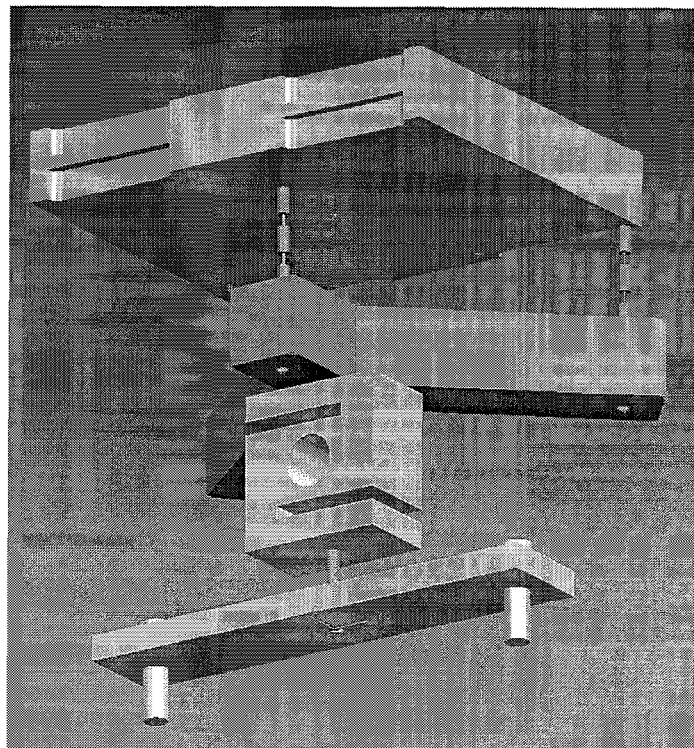
In plaats van het meten van de magneetkarakteristiek uitgaande van een mover die aanligt op de stator werd in een tweede meting de externe belasting gevarieerd rond een bepaalde lagerspleet, dus met constante luchtdruk op het lager. Via een krachterevenwicht geleverd door de luchtdruk, de magneetkracht en de meetopstelling (krachtsensor bevestigd aan de buigbalk), waarvan de eerste inmiddels gemeten was op glas (zie paragraaf 4.2.1) en de laatste aangegeven wordt door de sensor, is de momentane magneetkracht te berekenen. De filmdikte wordt wederom gemeten door de zwenkarmpjes die met hun statief op de meettafel staan bevestigd. Door de eindige stijfheid van de ophanging van de stator, bleek echter dat bij het aanbrengen van de kracht ook een significante zakking en kanteling optraden. Om deze effecten te kwalificeren is de mover zonder luchttoevoer aangebracht op de stator, zoals schematisch weergegeven in figuur 19 en wel tussen twee ophangpunten (10 en 11) van de stator (punt P). Vervolgens is een kracht van 600N op de mover aangebracht en zijn de verplaatsingen van de stator ten opzichte van de meettafel gemeten op de punten 1t/m12. De punten 10, 11 en 12 zijn de punten van de ophanging van de stator. Aan de verplaatsing is te zien dat de stator een gecombineerde translatie en rotatie uitvoert.



Figuur 19: Verplaatsing van de stator bij meting van de magneetkarakteristiek

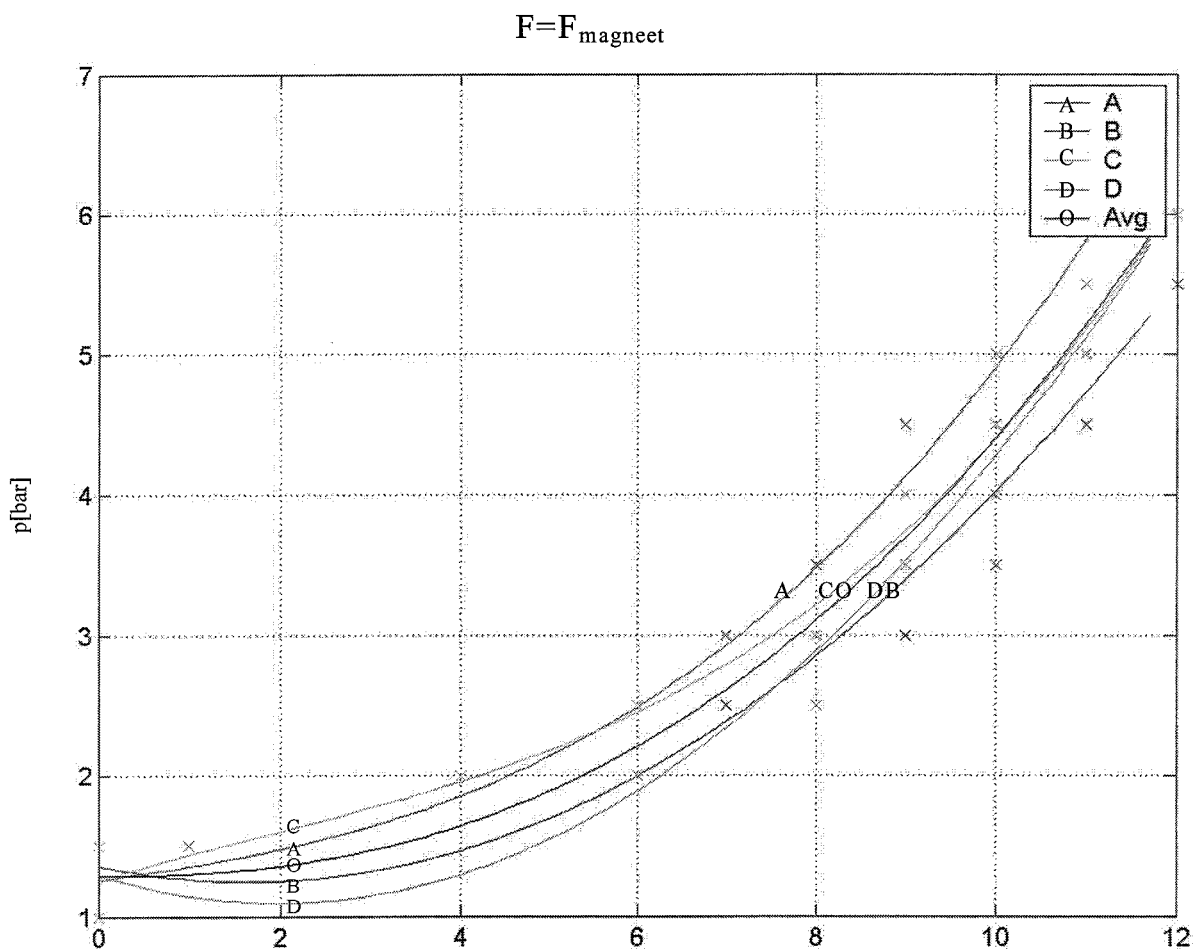
Omdat niet geheel duidelijk te zien is of de stator uitbuigt of dat uitsluitend de ophanging vervormt, is bij het meten van de werkelijke verplaatsing van de mover ten opzichte van de stator, niet vanaf de stator gemeten maar vanaf de meettafel zowel naar de mover als ook naar een punt op de stator vlak naast de mover. Het verschil in verplaatsing geeft de verplaatsing van de mover ten opzichte van de stator (dat wil zeggen de verplaatsing in de luchtfilm) weer.

Voor het aanbrengen van de externe belasting op de mover werd gebruik gemaakt van de 3 interfacepunten ter bevestiging van de dekplaat en een tussenlichaam. De meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 20 (de stator en de meettafel zijn ter verduidelijking niet getekend). Tussen het stervormig tussenlichaam, wat bevestigd is aan de krachtcel (die zich onder het geometrisch middelpunt van de mover bevindt) en de mover is gebruik gemaakt van sprietten om extra buigende momenten in de mover te voorkomen. Door de interne slapte van de mover bleek echter dat bij het opvoeren van de belasting de mover opnieuw vervormde, waarbij wederom twee tegenoverstaande hoekpunten (B-C) in dezelfde richting verplaatsten. De andere twee hoekpunten bleven tot een bepaald krachtniveau ($\pm 1000\text{N}$) aanliggen op de stator (de hoekpunten B en C hadden toen al een minimale verplaatsing van $10\mu\text{m}$). Bij andere lagerdrukken is geen verbetering van dit gedrag geconstateerd. Om te controleren of de vervorming afhankelijk is van de manier van belasten, werd het tussenlichaam omgedraaid, waaruit bleek dat nu alleen hoekpunt D bleef aanliggen. In bijlage 9 zijn resultaten weergegeven van het gedrag van de mover tijdens de bovengenoemde experimenten.



Figuur 20: Meetopstelling op de stator met tussenlichaam

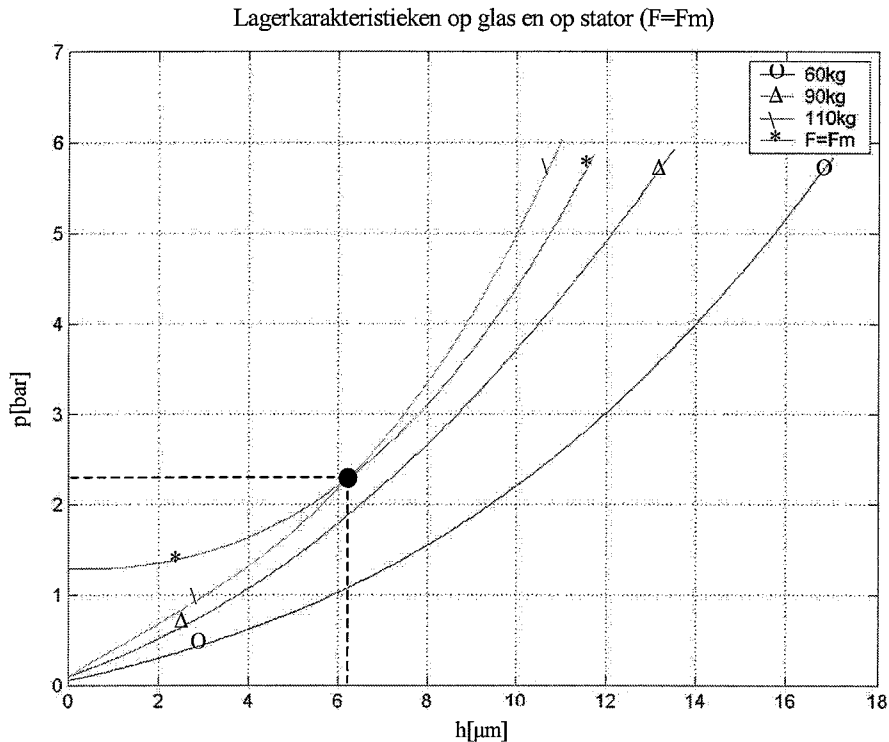
Als gevolg van de interne vrijheidsgraad van de moverstructuur bleek het wederom een groot probleem de mover zodanig te belasten dat deze ten opzichte van de stator verplaatst. Zoals in paragraaf 4.1 geconcludeerd werd moet voor onvervormde verplaatsing van de mover de belasting gelijkmatig verdeeld zijn over het oppervlak, zoals de magneet- en lagerkracht bijvoorbeeld. Op de stator wordt de voorspankracht door de magneet verzorgd en wel gelijkmatig verdeeld over het gehele oppervlak. Analoog aan de meting beschreven in paragraaf 4.2.1 waarbij de druk bij constante belasting is gevarieerd, is op de stator bij nagenoeg constante magneetvoorspanning (variatie is theoretisch circa 4% zie figuur 9) de luchtdruk van de mover (zonder dekplaat) gevarieerd. De meetwaarden zijn weergegeven in bijlage 10. Hierbij zijn wederom de verplaatsingen van de hoekpunten van de mover gemeten. Derhalve wordt de filmdikte van de onbelaste mover op de stator bepaald bij variërende druk. Deze resultaten kunnen vergeleken worden met de gemeten punten op glas, eveneens bij variatie van de luchtdruk. Een meetpunt op glas met dezelfde filmdikte en bij dezelfde druk geeft de belasting van de mover die gelijk moet zijn aan de kracht van de magneet. De resultaten van de meting zijn te zien in figuur 21. De middeling (Avg) heeft slechts een maximaal verschil van $2\mu\text{m}$ ten opzichte van de curve fits van de verplaatsingen van de hoekpunten. Onder invloed van de magneetkracht wordt de mover dus niet significant vervormd.



$h[\mu\text{m}]$ Figuur 21: Filmdikte op stator bij drukvariatie

4.2.3 Magneetkarakteristiek uit lagerkarakteristieken

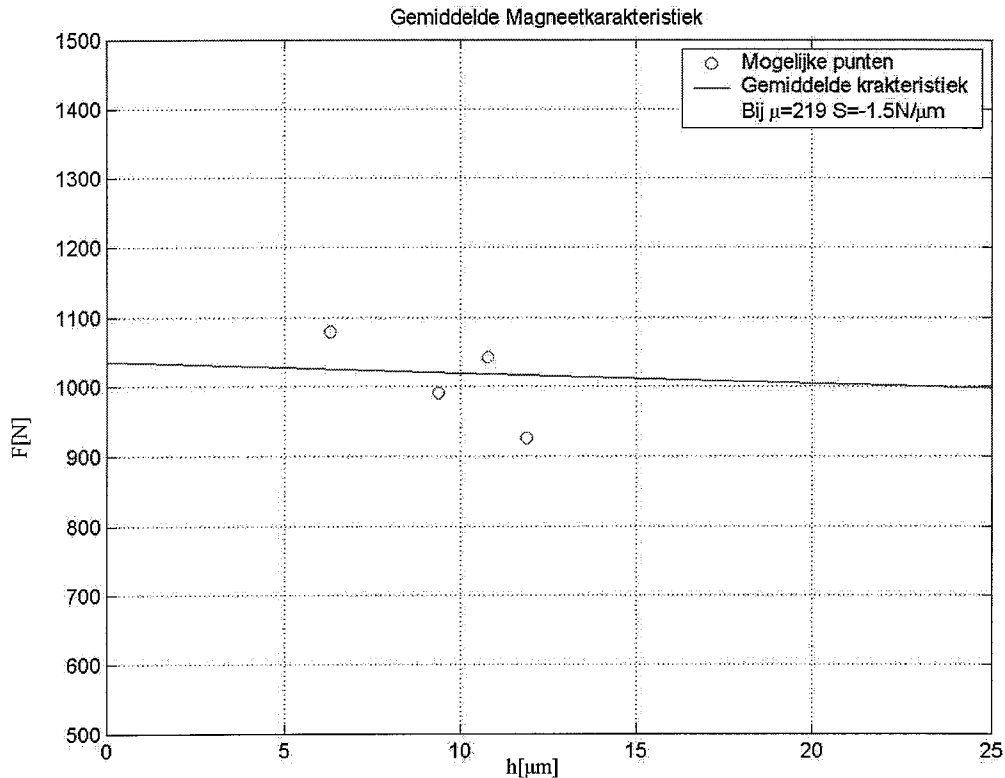
In deze subparagraaf zullen de meetresultaten van de mover op glas en op de stator met elkaar in vergelijking worden gebracht om daaruit de magneetkarakteristiek te bepalen. Het eerste waar naar gekeken wordt is de filmdikte van de mover zonder externe belasting op de stator bij variërende druk ($F=F_m$, zie figuur 21) in vergelijking met de metingen gedaan op glas bij constante belasting en variërende druk (figuur 17). In figuur 22 zijn deze metingen in één figuur weergegeven. Het gevonden snijpunt met een lijn van constante belasting op glas (110kg) geeft de magneetkracht bij die filmdikte en lagerdruk.



Figuur 22: Vergelijking metingen op glas en op stator

Dit snijpunt ligt bij $6.3\mu\text{m}$ en de gevonden magneetkracht bij die lagerspleet bedraagt $110\text{kg}(=1079\text{N})$. Ook is te zien dat er in dit gebied geen snijlijn is met de karakteristiek bij 90kg , waaruit blijkt dat de magneetkracht in dit gebied waarschijnlijk niet onder de 883N zal komen, wat logisch is gezien de berekende stijfheid van de magneet, zie paragraaf 3.2. Verder is in deze figuur af te lezen dat de filmdikte van de mover op de stator bij 4, 5 en 6bar respectievelijk 9.5 , 10.8 en $11.8\mu\text{m}$ is (zie ook bijlage 10). In de lagerkarakteristieken gemeten op glas kunnen de (externe) belastingen bij deze (geëxtrapolerde) filmdikte en lagerdruk worden afgelezen, zie bijlage 8.2. Hierdoor kunnen de volgende punten worden toegevoegd aan de magneetkarakteristiek: bij $9.5\mu\text{m}$ en 4bar een kracht van 990N , bij $10.8\mu\text{m}$ en 5bar een kracht van 1042N en bij $11.8\mu\text{m}$ en 6bar een kracht van 926N , deze punten zijn weergegeven in figuur 23.

Bij de gevonden meetpunten wordt een bijpassende magneetkarakteristiek gefit met μ_r als parameter. Hieruit volgt een μ_r van 219 en een bijbehorende stijfheid van $-1.5\text{N}/\mu\text{m}$.



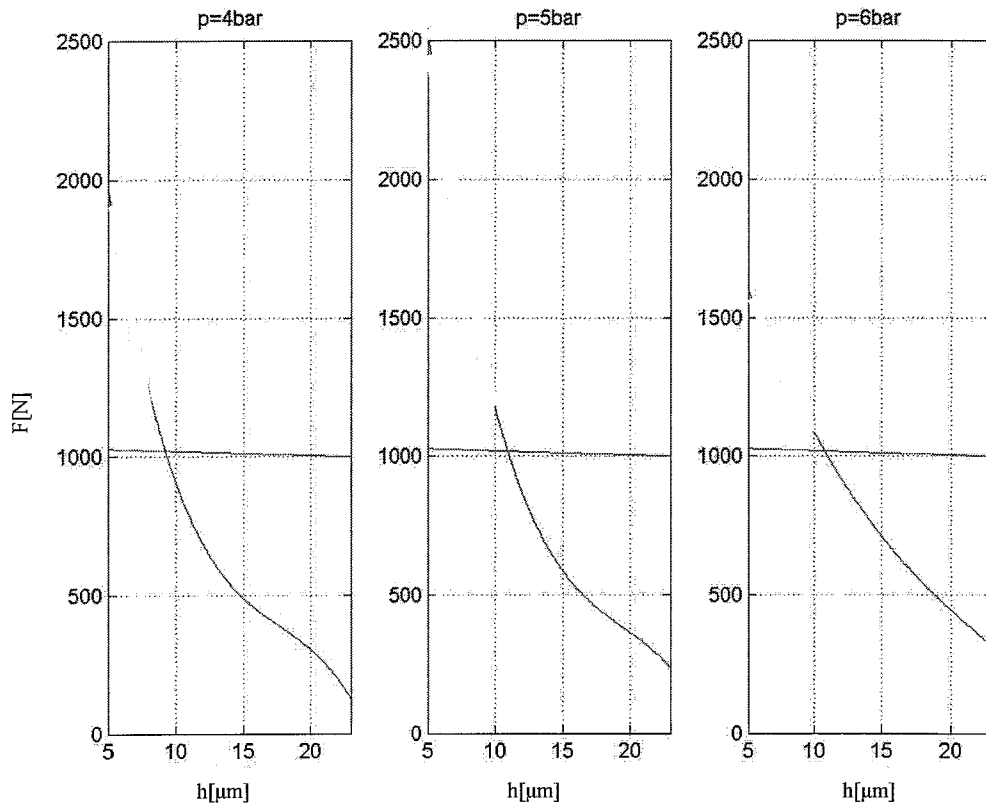
Figuur 23: Gemiddelde magneetkarakteristiek

De gevonden waarde van μ_r is relatief laag, wat betekent dat de fluxdichtheid in het ijzer ook relatief laag zal zijn. Hoewel de stijfheid van de magneet als de lostrekkraft lager uitvallen dan de theoretische waarden van respectievelijk $S=-2.4\text{N}/\mu\text{m}$ en $F_0=1.25\text{kN}$ is de orde grootte volgens verwachting.

Afwijkingen zijn te verklaren door de interne vervormingen van de mover als gevolg van de externe belastingen op de mover tijdens de metingen op glas. Waarschijnlijk zal hierdoor de gemiddelde filmdikte lager uitvallen, omdat de drukopbouw door het extra volume in de vervormde spleet moeilijker verloopt en daarom moet de filmdikte kleiner zijn om het gelijke gewicht te dragen. Was de mover onvervormd geweest, dan waren waarschijnlijk hogere krachten nodig geweest om deze filmdiktes te bereiken. Omdat de verschillen procentueel gezien beperkt zijn wordt in het navolgende uitgegaan van de gemeten karakteristiek.

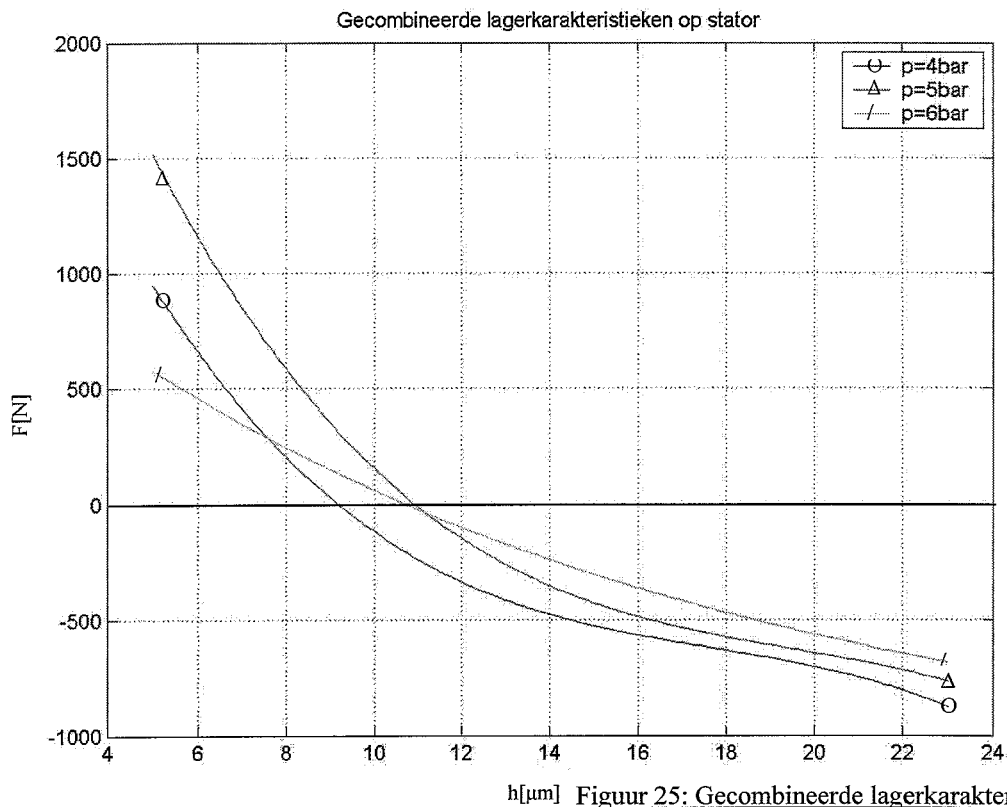
4.2.4 De gecombineerde stijfheid van het lager met de magneet

Nu de aparte karakteristieken van de luchtfilm en de magneet bekend zijn kunnen deze worden gecombineerd tot karakteristieken die de externe belasting weergeven als functie van spleethoogte. Wanneer de magneetkarakteristiek in de plaatjes van de lagerkarakteristieken wordt geplot, ontstaat een snijpunt wat de filmdikte op de stator aangeeft in (extern) onbelaste situatie. In figuur 24 zijn de lagerkarakteristieken op glas bij 4, 5 en 6bar (figuur 16) gecombineerd met de magneetkarakteristiek (figuur 23) te zien.



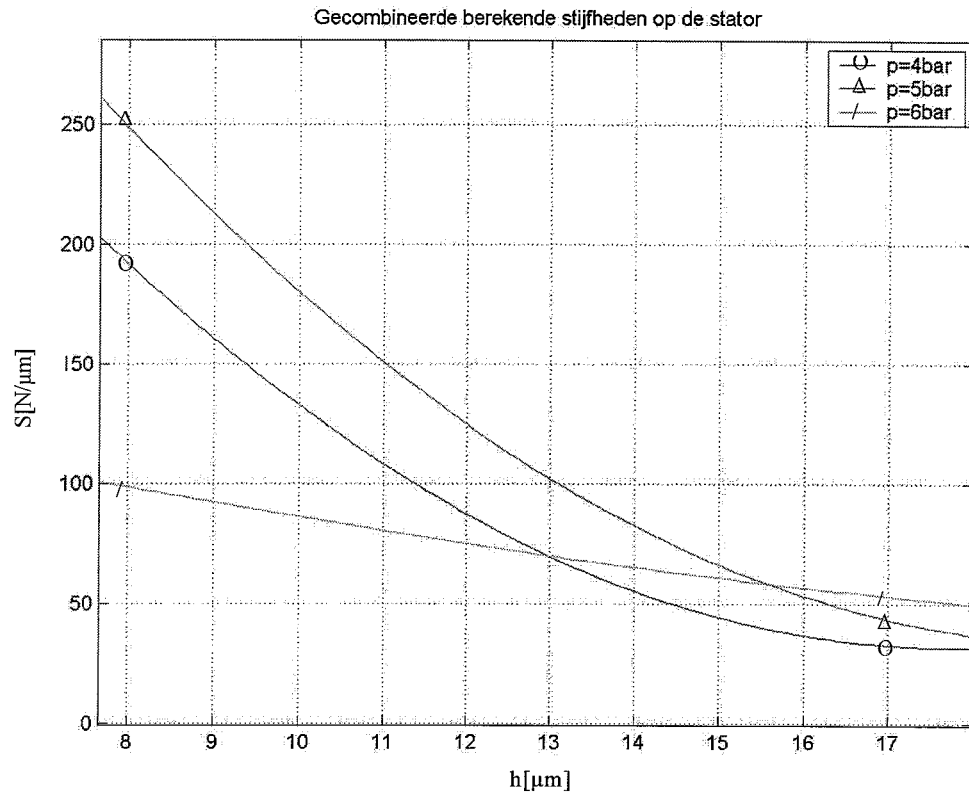
Figuur 24: Snijpunten magneet- en lagerkarakteristiek

In deze figuur is goed te zien dat de stijfheid van de magneet in het niet valt bij de stijfheid van het lager zoals is verwacht. Wanneer nu de magneetkarakteristiek van de lagerkarakteristiek afgetrokken wordt, zal een figuur te zien zijn die aangeeft wat de filmdikte van het lager op de stator is als functie van de belasting, zowel positief als negatief. In figuur 25 is dit gedaan voor de karakteristieken bij 4, 5 en 6bar.



Verder is te zien dat de karakteristieken van 4, 5 en 6bar de x-as snijden bij filmdiktes van respectievelijk $9.2\mu\text{m}$, $11.0\mu\text{m}$ en $10.8\mu\text{m}$. Dit zijn de filmdiktes op de stator zonder externe belasting. Volgens de metingen die gedaan zijn op de stator bij variërende druk, zijn deze filmdiktes in werkelijkheid $9.4\mu\text{m}$, $10.8\mu\text{m}$ en $11.9\mu\text{m}$. Dit verschil is niet erg groot, wat logisch is aangezien de magneetkarakteristiek gebaseerd is op deze punten. De karakteristiek van 6bar vertoont hierin de grootste afwijking, dit kan gekoppeld worden aan het feit dat de karakteristiek van 6bar überhaupt een geheel ander verloop heeft dan de andere karakteristieken, waarschijnlijk opnieuw als gevolg van de interne vervormingen in het lager.

Uit de karakteristieken voor de draagkracht van het lager kunnen ten slotte de stijfheden bij 4, 5 en 6bar worden bepaald. Hiervoor worden de karakteristieken gedifferentieerd, weergegeven in figuur 26. In alle gevallen bedraagt de orde grootte van de totale stijfheid van het magnetisch voorgespannen lager 10^8N/m . De magneetstijfheid van 10^6N/m heeft hier een verwaarloosbare invloed op. Verder ligt de stijfheid van de karakteristiek van 6 bar grotendeels onder de karakteristieken van 4 en 5bar, wat voor een goed werkend lager niet reëel is. Waarschijnlijk is dit veroorzaakt doordat bij 6 bar een grotere variatie in de verplaatsingen van de hoekpunten is geweest, wat betekent de mover hier meer vervormd was en dus meer stijfheid heeft verloren. Tenslotte wordt volgens de theorie van vlakke lagers verwacht dat de stijfheid een optimum heeft en onder een bepaalde waarde van de filmdikte weer zal afnemen. Het feit dat dit hier niet gebeurt, is mogelijk opnieuw te verklaren door de vervormde geometrie waardoor het lager zich enigszins als een conisch lager gaat gedragen en tevens instabiel wordt.

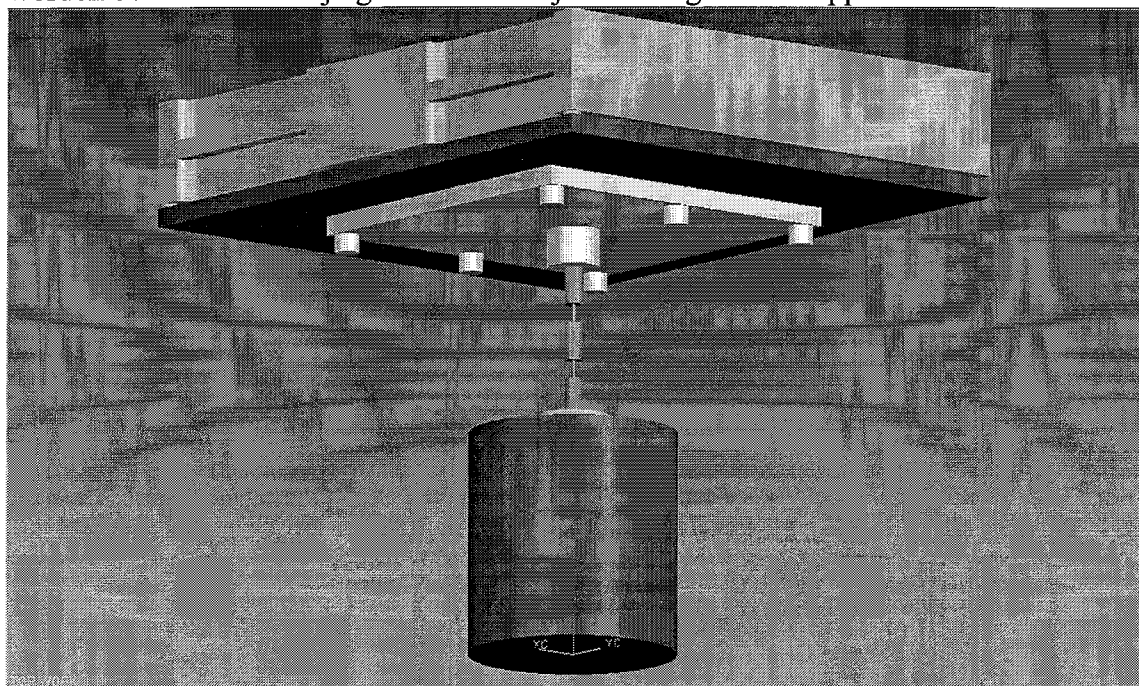


Figuur 26: Stijfheden van de mover

De stijfheden rond $10\mu\text{m}$ bedragen voor 4, 5 en 6bar respectievelijk 130, 180 en $80\text{N}/\mu\text{m}$ wat nog steeds significant (factor 5) lager is dan de voor vlakke lagere berekende $730\text{N}/\mu\text{m}$.

4.3 Dynamische metingen

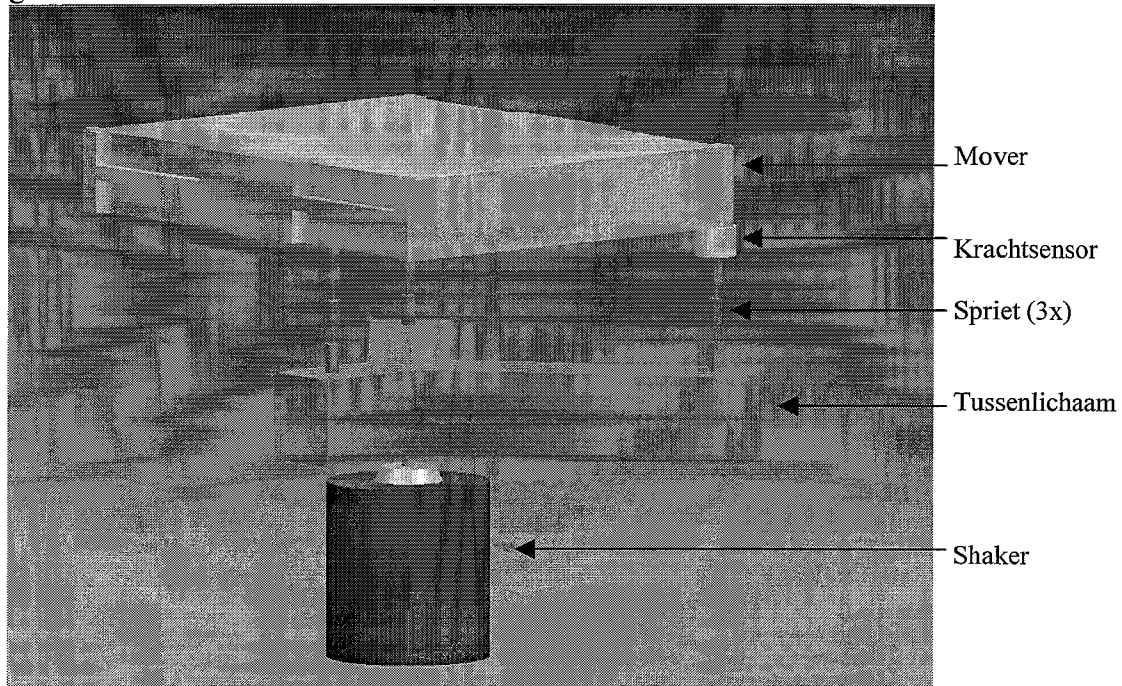
Zoals in paragraaf 2.3 reeds is beschreven, is het punt waarop het imaginaire deel van de dynamische stijfheid van het luchtlager negatief wordt (negatieve demping), te zien als een criterium voor mogelijke instabiliteit. Er is getracht dit imaginaire deel van de stijfheid in kaart te brengen door middel van een dynamische meting. Hierbij wordt een shaker aan de mover bevestigd die trillingen tot 2000Hz genereert, zie figuur 27. De bijbehorende versnellingen van de mover worden gemeten met versnellingsopnemers. Door een krachtcel tussen shaker en mover te plaatsen kan gemeten worden met welke kracht de shaker de mover belast. Via een Siglab-analyser kan vervolgens een overdracht tussen kracht en gemeten versnellingen worden berekend. Deze overdracht kan worden omgezet naar een stijfheid en vervolgens kan daarvan het imaginaire deel worden berekend. Zie bijlage 7 voor een lijst met de gebruikte apparatuur.



Figuur 27: Eerste meetopstelling dynamische metingen

De bovenbeschreven meting bleek echter niet geheel triviaal, waardoor, ook mede gezien de lange tijd die besteed is aan statische metingen, dit onderzoek naar een dynamische lagerstijfheid binnen het beschikbare tijdsbestek, niet afgerond is. Zo bleek er geen goede coherentie te zijn tussen het signaal van de krachtsensor en de versnellingsopnemers over een groot deel van het frequentiegebied. Ondanks de relatief lage lagerstijfheid bleek de stijfheid van de ophanging van de stator van dezelfde orde, waardoor het trillingsniveau van dezelfde orde bleek als dat van de movers. Tevens bleek dat de toegepaste shaker niet genoeg vermogen had om de mover voldoende te versnellen. De gemeten versnellingen bleken in dezelfde orde grootte als de ruis in het lager gemeten wanneer de shaker niet aan stond.

Omdat werd aangenomen dat de slapte van de dekplaat de oorzaak hiervan was en zo een groot deel van de energie van de shaker werd gebruikt voor vervormingen van de dekplaat, is nog getracht de meetresultaten te verbeteren door gebruik van een tussenlichaam. Dit heeft een stijfheid in de orde grootte van de lagerstijfheid en laat via de bevestigingspunten van de dekplaat trillingen aangrijpen in het massamiddelpunt. Door gebruik van sprietten wordt de mover met uitsluitend krachten belast door de shaker. In figuur 28 is een schematische weergave van de opstelling te zien. In de figuur is bij de rechterspriet de krachtsensor te zien, die uitgewisseld kan worden tussen de bevestigingspunten. Echter met deze meetopstelling werden ook geen goede resultaten gevonden.



Figuur 28: Tweede dynamische opstelling

Kortom, uitgebreidere dynamische metingen zijn nodig om het dynamisch gedrag van de mover ten opzichte van de stator in kaart te brengen. Voorgesteld wordt een grotere shaker te gebruiken en een laser-vibro-meter om de versnellingen van zowel de stator als de mover te meten en optisch een verschilsignaal te genereren.

Conclusies

Uit het onderzoek naar de stijfheden van de magnetisch voorgespannen, luchtgelagerde mover zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Uit vlakheidmetingen aan het lagervlak is gebleken dat door een niet reproduceerbare bevestiging van de dekplaat (bijgeleverd als universele interface voor pay-load) op de mover, thermal snapping optreedt tussen de mover en de dekplaat als gevolg van thermische expansie. De dekplaat (bevestigd op de uiterste vezels van de mover) is hierdoor in staat om significante vervormingen in het lagervlak te introduceren.
2. Doordat de mover een interne vrijheidsgraad heeft, te weten de torsieslape, zal de mover onder een niet egaal verdeelde belasting vervormen. De vervorming van het lageroppervlak en de verandering in het volume van de luchtfilm, veroorzaken een afname van de stijfheid, zowel statisch als dynamisch.
3. Een luchtlagering met een vervormd lageroppervlak stelt (over het stijve deel van het lager) een kleinere filmdikte in om dezelfde externe belasting te dragen.
4. De stijfheid van de magneet is verwaarloosbaar ten opzichte van de stijfheid van de luchtlagering en levert dus geen significant stijfheidverlies.
5. Simulaties hebben aangetoond dat door toevoeging van een torsiestijve koker de stijfheid van de mover aanzienlijk kan worden verbeterd.

Aanbevelingen

De aanbevelingen worden opgesplitst in twee delen, namelijk in aanbevolen verbeteringen aan de mover en aanbevelingen voor nader onderzoek.

Aanbevelingen ter verbetering van de mover

- De structuur van de mover kan worden aangepast zodat deze beter bestand is tegen externe belastingen. Een mogelijkheid hiervoor is het toepassen van een torsiestijve koker.
- Aangezien de mover vier forcers bevat voor de reluctantieaandrijving, gedraagt hij zich als een tafel op vier poten. Een manier om de bijbehorende overbepaaldheid tegen te gaan is door de forcers op een andere manier met elkaar te verbinden, waardoor ze ieder onafhankelijk de optimale lagerspleet kunnen instellen zonder elkaar direct te beïnvloeden. Er zullen vervolgens drie stijve constructiepunten moeten worden gegenereerd voor bevestiging van een pay-load.
- Omdat de kamertjes, zoals toegepast in de lagers van de mover, geen extra draagkracht leveren, maar wel een bijdrage leveren aan het optreden van pneumatic hammering, wordt aanbevolen deze kamertjes weg te laten.

Aanbevelingen voor nader onderzoek

- Met behulp van eindige elementen pakketten zou in detail gekeken kunnen worden naar het luchtlager en naar het magneetcircuit om een duidelijker beeld te krijgen in het theoretische verloop van de karakteristieken.
- De magneetkarakteristiek zou in een meetopstelling nader in beeld kunnen worden gebracht, door een afstand op te leggen met behulp van folies van gedefinieerde diktes en vervolgens de lostrekkraft te meten.
- Een onderzoek naar de koppels die optreden tijdens de aandrijving, zou kunnen laten zien of deze nog extra vervormingen aan de mover opleggen, waardoor instabiliteit versnelt.
- Om de dynamische stijfheid van de luchtlagering experimenteel vast te stellen wordt het gebruik van een grotere shaker en een laser-vibro-meter aanbevolen. Hiermee kunnen versnellingen van de stator en de mover gelijktijdig worden gemeten en kan uit het verschil in de versnellingen direct de overdracht worden bepaald.
- Om de lagerkarakteristiek van de huidige mover beter in kaart te kunnen brengen, is een meetopstelling nodig die geen vervormingen aan de mover oplegt. Voor het huidige ontwerp impliceert dit een gelijkmatige belasting van de mover. Het blijft evenwel niet triviaal om de lagerstijfheid van een torsieslap lichaam (experimenteel) vast te stellen. En aangezien ook een eventuele pay-load voor discrete belasting zal zorgen is een herontwerp op de eerste plaats aanbevelingswaardig.

Literatuurlijst

[Compter, 2001]

Compter, J.C., 2001, Textbook Mini Electro-Mechanics, Permanent Magnets, Eindhoven University of Technology

[Holster, 1967]

Holster, P.L., 1967, Gaslagers met uitwendige drukbron, P.T. Werktuigbouw, Vol. 22, No.9, pp. 363-370, No.10, pp. 415-425, No. 26, p.1105

[Koch, 2003]

Koch, M., 2003, LAT Suhl AG, Suhl, privé communicatie via e-mail

[Luijs,2003]

Luijs, R.M.T., 2003, Planar Reluctance Motors in SMD Placement Machines, Design of a Test Tool and Compact Placement Head, Eindhoven University of Technology

[Plessers, 1988]

Plessers, P., Snoeys R., 1988, Dynamic Stability of Mechanical Structures Containing Externally Pressurized Gas-Lubricated Thrust Bearings, Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol.110, pp. 263-278

[Rosielle, 2000]

Rosielle, P.C.N., Reker, E.A.G., 2001, Constructieprincipes 1 Bedoeld voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, Eindhoven University of Technology

[Vermeulen, 1999]

Vermeulen, J.P.M.B., 1999, Ceramical Optical Diamond Turning Machine, Design and Development, Eindhoven University of Technology

Bijlagen

Bijlage 1 Afbeeldingen van de Planar mover PF 211 HS-3

Foto 1: Bovenkant van de mover, waarvan de dekplaat is verwijderd

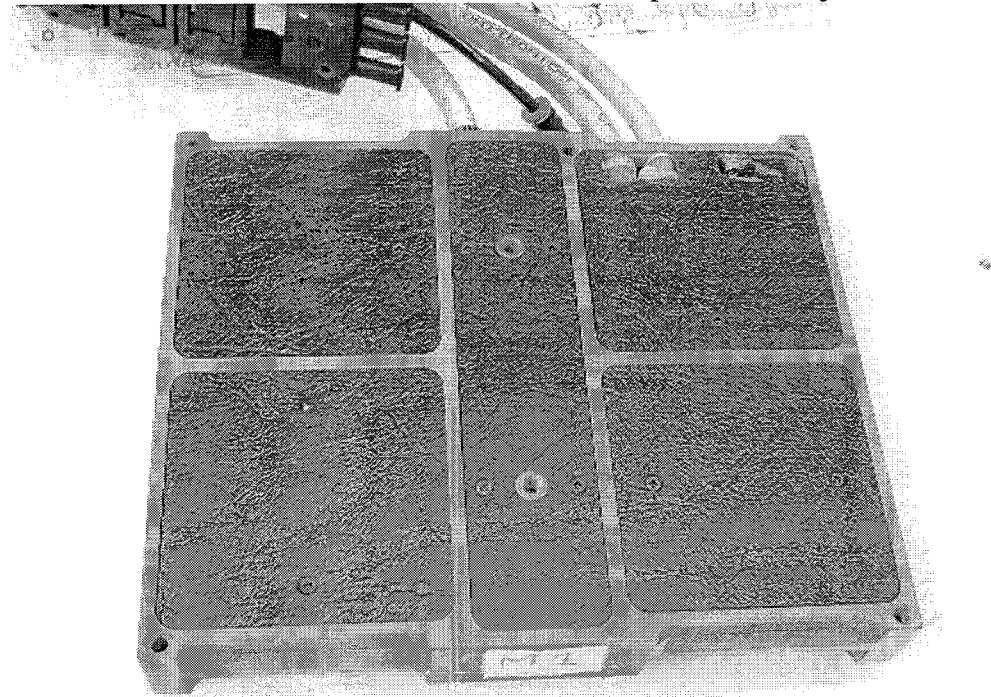


Foto 2: Opengewerkte bovenkant van de mover

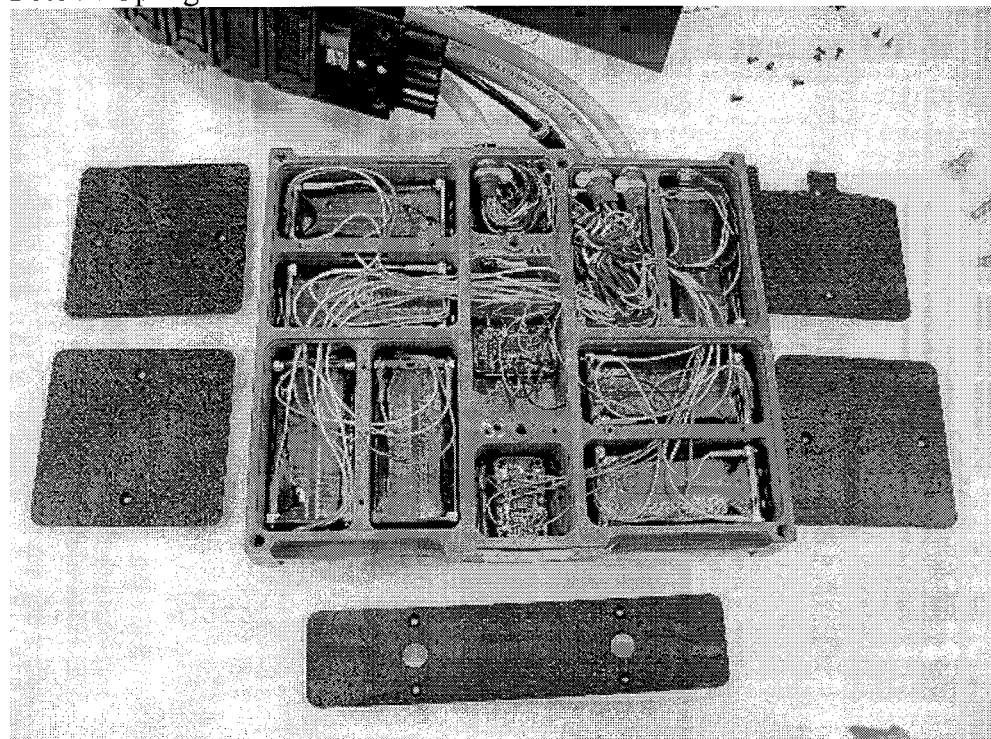


Foto 3: Detail van de opengewerkte bovenkant van de mover

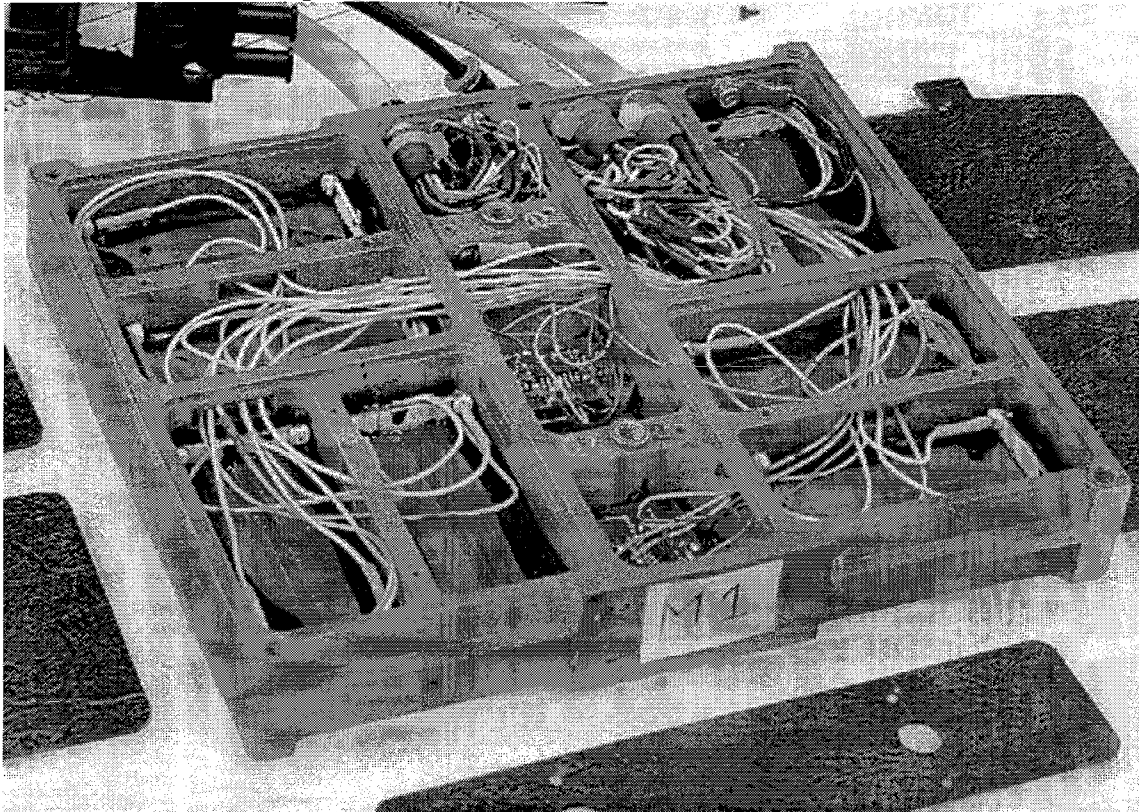


Foto 4: Detail van een opengewerkte forcer, de permanent magneten zijn duidelijk te zien.

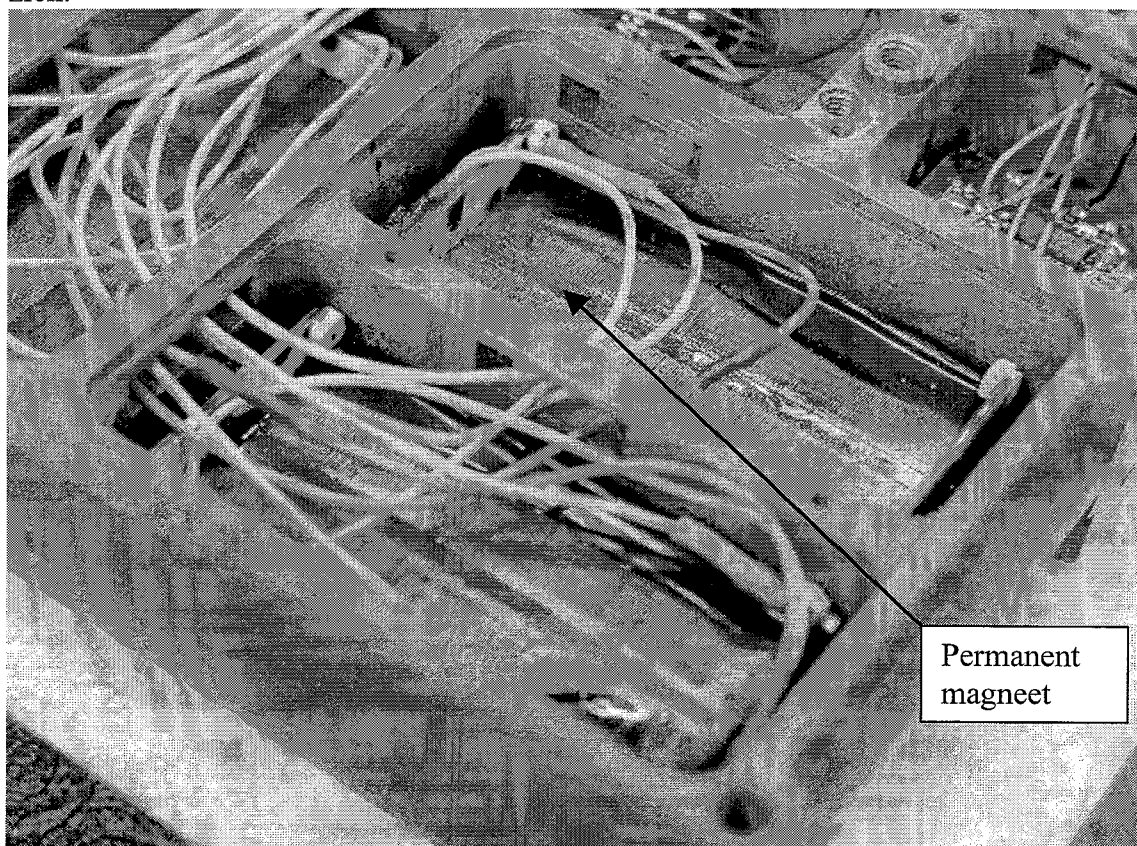


Foto 5: Detail van een Hall-sensor. Hier is goed te zien dat de mover grotendeels leeg is.

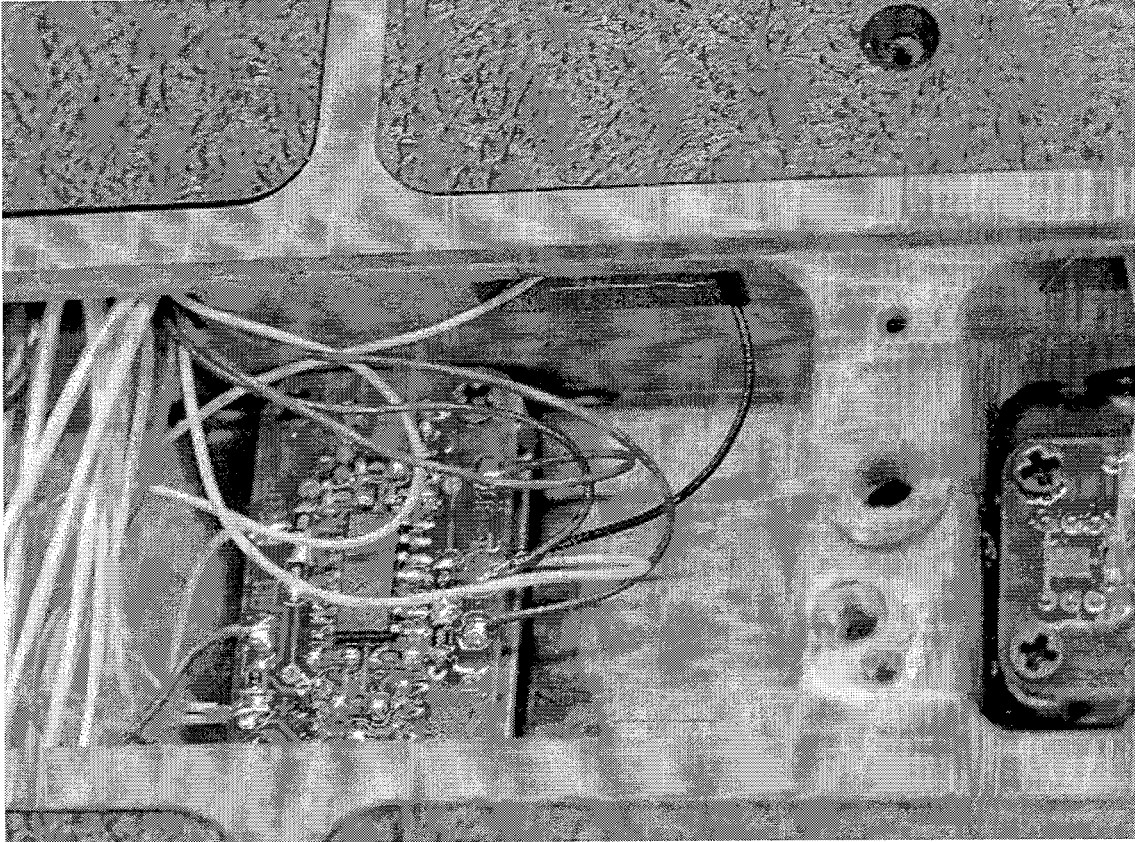
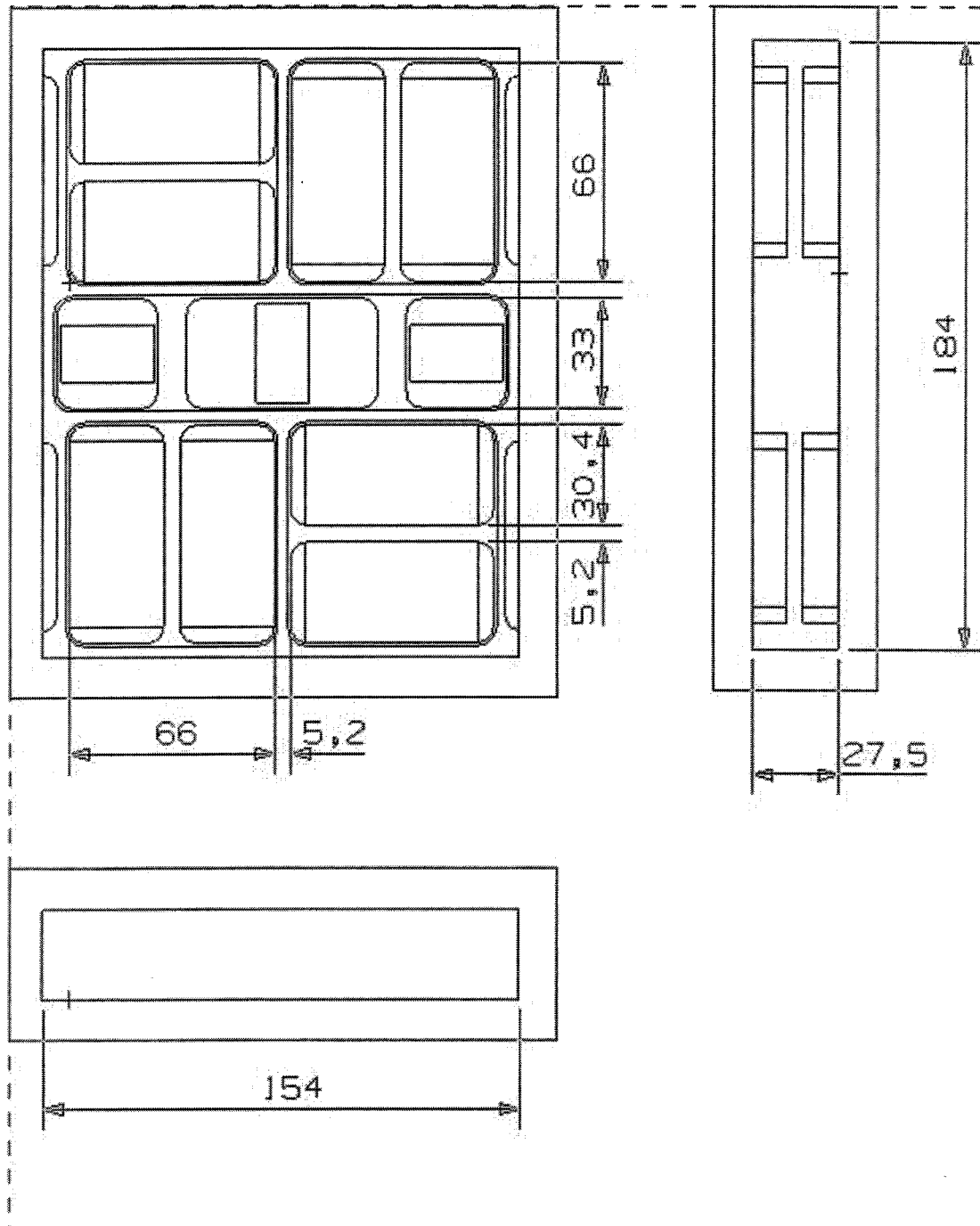


Foto 6: Onderkant van de mover. Duidelijk te herkennen zijn de vier forcers, de drie Hall-sensoren en de tien nozzles.

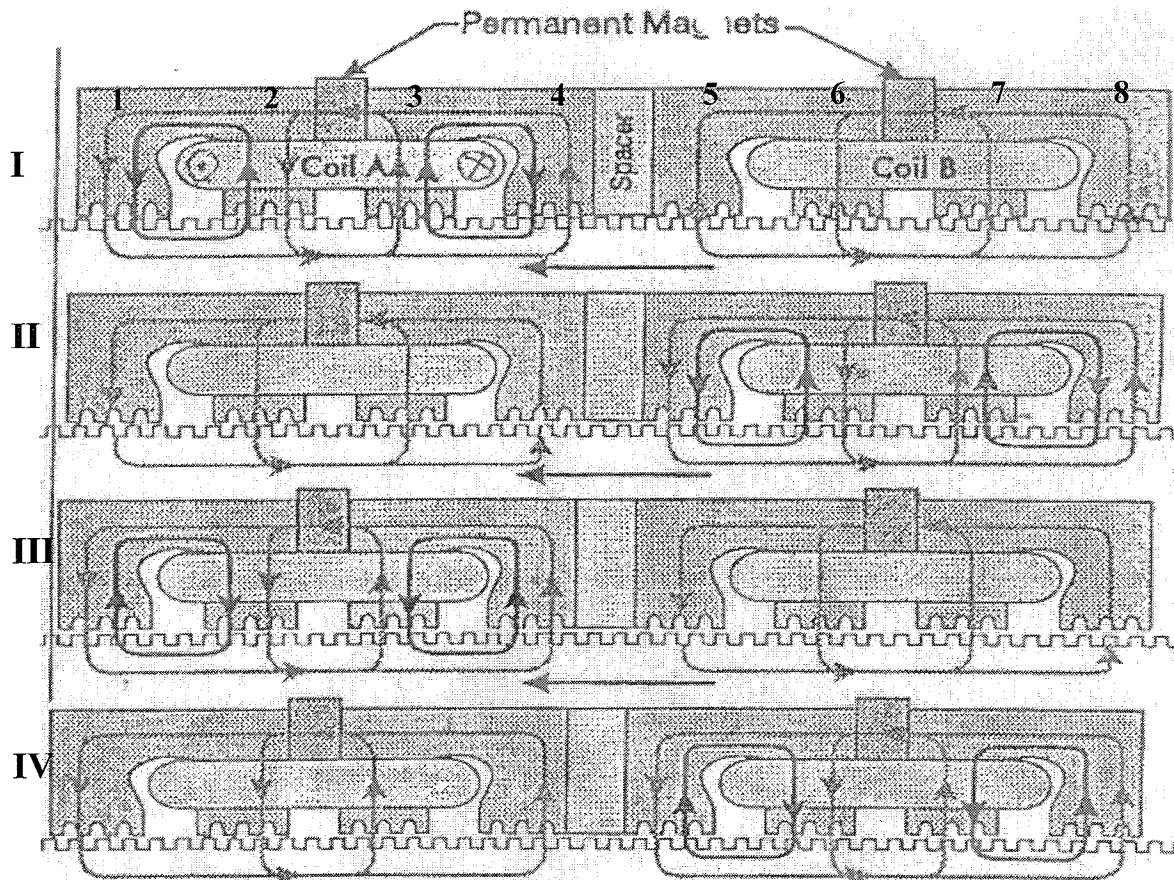




Dit zijn de afmetingen gebruikt in het model. Deze zijn niet allemaal nagemeten.

Bijlage 2 Reluctantie-aandrijving

De werking van de planaire reluctantie motor is te vergelijken met die van een stappenmotor. De motor bestaat uit een planaire mover (de rotor) en een stator. Doordat beide een vertanding hebben, zullen de veldlijnen van de mover die per forcer afwisselend te schakelen zijn (door combinatie van permanent magneten en electromagneten) voor een uitlijning van betreffende forcertanden boven die van de stator zorgen. Dit principe wordt in viervoud gebruikt om de mover aan te drijven. Ter verduidelijking wordt het aan de hand van de onderstaande figuur kort toegelicht.



Figuur	Fasehoek	Stroom Spoel A	Stroom Spoel B
I	0	+ max	0
II	90	0	+ max
III	180	- max	0
IV	270	0	- max

In deze figuur is een forcer te zien die een volledige stap maakt. De sets tanden zijn van links naar rechts genummerd van 1 t/m 8. In figuur I is duidelijk te zien dat de positieve bekrachtiging van spoel A, de flux door de tanden van 2 en 4 verzwakt en bij 1 en 3 versterkt. Het is daardoor dat de tanden bij 1 en 3 de neiging hebben zich uit te lijnen met de stator tanden. Door vervolgens spoel B positief te bekrachtigen, zullen op analoge wijze de tanden bij 5 en 7 (die een kwart van de tandensteek verschoven zijn ten opzichte van de tanden van 1 en 3) recht boven de statortanden neigen en zal de mover een stapgrootte van een kwart van de tandensteek naar links verplaatsen. Vervolgens wordt gezorgd voor uitlijning van de tanden 2 en 4 en daarna 6 en 8 door negatieve bekrachtiging van respectievelijk spoel A en B. Door toepassing van microstepping kan de mover tot op de micrometer nauwkeurig worden verplaatst.

Bijlage 3 Lagerstijfheid

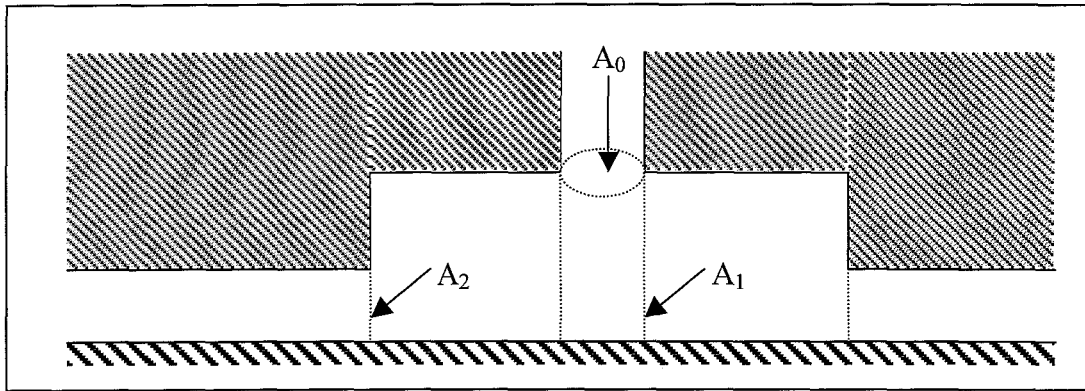
Volgens de theorie [Holster, 1967] kan de draagkracht en de stijfheid van een langwerpige basiselement worden beschouwd volgens de volgende berekeningen. De luchtdoorgangen worden berekend zodat gezien kan worden welke de bepalende doorgang is. Met $n=2$, $d=0.45\text{mm}$, $h=10\mu\text{m}$, $h_k=0.5\text{mm}$ en $D=3.3\text{mm}$:

$$A_0 = 0.25n\pi d^2 = 0.32\text{mm}^2 \text{ (oppervlakte van het toevoergaatje)}$$

$$A_1 = n\pi d(h+h_k) = 1.44\text{mm}^2 \text{ (mantel van de luchtkolom stromende uit het toevoergaatje)}$$

$$A_2 = n\pi Dh = 0.21\text{mm}^2 \text{ (mantel van de luchtkolom onder de kamer waaruit de kamer leegstroomt in de spleet)}$$

Ter verduidelijking is dit in de onderstaande figuur schematisch weergegeven in een doorsnede van een luchtlager.



Afhankelijk van de lagerspleet h is de bepalende doorgang A_0 of A_2 . In het eerste geval is het lager orifice gecompenseerd in het tweede geval is het inherent gecompenseerd. In het algemeen wordt gezegd dat een lager met kamer orifice gecompenseerd is op voorwaarde dat $h_k > 0.83d$ en $A_2 > 3.3A_0$. Aangezien de tweede voorwaarde niet klopt wordt uitgegaan van een inherent gecompenseerd lager en tevens de kamer in de berekeningen weggelaten.

Hierbij wordt verondersteld dat $d = d_{\min}$ (de minimaal realiseerbare gaatjesdiameter) waardoor met bovengenoemde numerieke waarden de optimale filmdikte kan berekend worden volgens:

$$h^2 = 6.83 \cdot 10^{-2} \frac{L nd}{b p_s} \Leftrightarrow h = 9.4 \mu\text{m}$$

Hierbij geldt voor één forceroppervlak van de mover $L=b=72\text{mm}$ en $p_s=7\text{bar}$.

Tevens kan een draagkracht worden berekend volgens de volgende formule:

$$\bar{W}_{Li} = 0.44(p_s - p_a)bL = 1.4 \cdot 10^3 \text{ N}$$

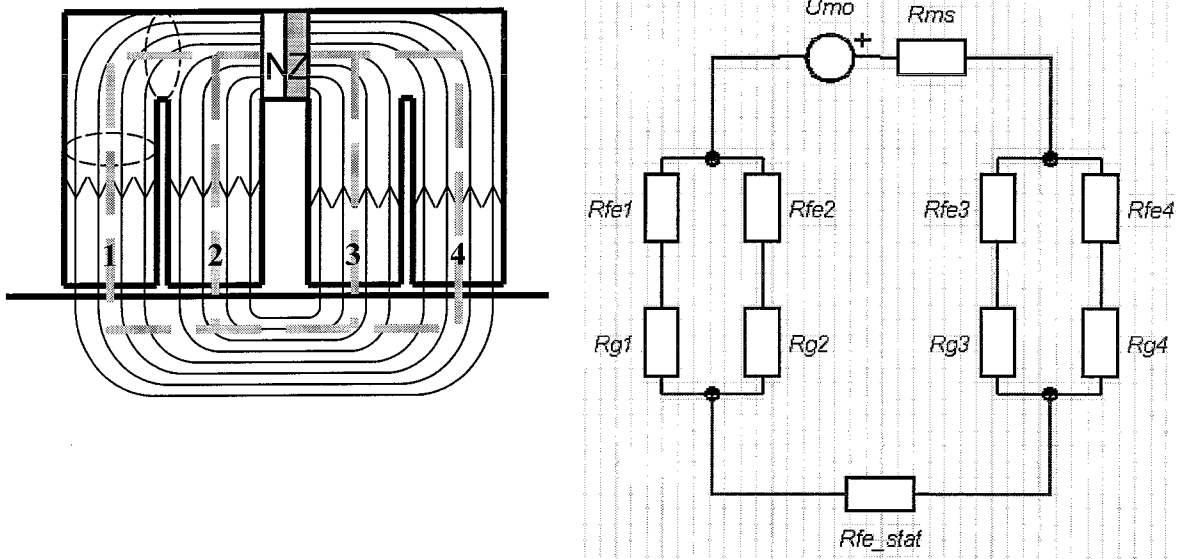
De stijfheid bij de berekende filmdikte wordt dan:

$$\bar{S}_{Li} = 0.96 \frac{\bar{W}_{Li}}{h} = 1.5 \cdot 10^8 \text{ Nm}^{-1}$$

Deze stijfheid is een schatting voor een lager met het oppervlak van een forcer met twee toevoergaatjes. De mover heeft vier van deze eenheden en heeft ook nog twee toevoergaatjes tussen de Hall-sensoren. De stijfheid van de mover zou dus theoretisch een waarde van ongeveer vijf keer de berekende hebben, dus ongeveer $7.3 \cdot 10^8 \text{ Nm}^{-1}$. Aangezien deze berekening uitgaat van een optimale filmdikte is dit de maximale stijfheid, voor grotere of kleinere filmdiktes zal de stijfheid dus lager zijn.

Bijlage 4 Magnetische stijfheid

Bij de berekening van de totale magnetische stijfheid wordt eerst uitgegaan van een van de acht permanentmagneten in de mover. Volgens [Compter, 2001] kan een magnetisch circuit worden vergeleken met een elektrisch systeem met de permanentmagneet als spanningsbron en met magnetische weerstanden van de flux door ijzer en lucht beschouwd als elektrische weerstanden. Hierdoor is de eerste figuur te vervangen in de tweede, hierbij wordt lekkage van flux verwaarloosd.



Van dit elektrische systeem kunnen de spanning en de weerstanden worden berekend. De weerstand door medium "x" kan worden berekend volgens de volgende formule:

$$R_x = \frac{l_x}{\mu_0 \mu_{r,x} A_x} \text{ Waarbij } l_x \text{ de lengte door het betreffende medium is, } \mu_{r,x} \text{ de relatieve}$$

permeabiliteit, A_x de oppervlakte en μ_0 de permeabiliteit van het vacuüm ($=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ mT/A}$). Het materiaal van de magneet wordt verondersteld NdFeB te zijn, juk en stator van ijzer (Fe) en de afmetingen zijn deels geschat en deels gemeten. De waarden zijn weergegeven in onderstaande tabel:

$l_{ms}=3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,ms}=1.05$	$A_{ms}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{ms}=9.1 \cdot 10^6$
$l_{Fe1}=40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,Fe1}=2.0 \cdot 10^{-3}$	$A_{Fe1}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{Fe1}=6.4 \cdot 10^4$
$l_{Fe2}=25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,Fe2}=2.0 \cdot 10^{-3}$	$A_{Fe2}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{Fe2}=4.0 \cdot 10^4$
$l_{Fe3}=25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,Fe3}=2.0 \cdot 10^{-3}$	$A_{Fe3}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{Fe3}=4.0 \cdot 10^4$
$l_{Fe4}=40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,Fe4}=2.0 \cdot 10^{-3}$	$A_{Fe4}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{Fe4}=6.4 \cdot 10^4$
$l_{g,x}=10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\mu_{r,g,x}=1$	$A_{g,x}=192 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	$R_{g,x}=4.1 \cdot 10^4$
$l_{Fe \text{ stat}}=50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\mu_{r,Fe \text{ stat}}=2.0 \cdot 10^{-3}$	$A_{Fe \text{ stat}}=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$R_{Fe \text{ stat}}=8.0 \cdot 10^3$

Het blijkt dat $R_{Fe1}=R_{Fe4}$ en hetzelfde voor R_{Fe2} en R_{Fe3} geldt. Tevens zijn alle filmdiktes gelijk verondersteld, hierbij is een oppervlakte berekend die gebaseerd is op de lengte en de breedte van vier sets van elk 6 tanden ($A=4 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0.64 \cdot 10^{-3}=7.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$), met een breedte van 0.64mm. Verder is deze oppervlakte gecorrigeerd voor het feit dat de stator in twee richtingen tanden heeft en dus maar de helft van het oppervlak van de tanden van de mover wordt gebruikt en dat de mover ten bate van de reluctantie aandrijving slechts de helft van zijn tanden recht boven tanden van de stator heeft staan (of twee sets geheel en twee sets niet, of alle vier de sets half, zie bijlage 2).

De enige onbekende die dan nog overblijft om het schema door te rekenen is de elektrische bronspanning van de magneet. Deze wordt gegeven door de volgende formule:

$$U_{m0} = H_c l_{pm} = \frac{B_r l_{pm}}{\mu_o \mu_r} = 2.50 \cdot 10^3 \frac{J}{Wb}$$

Hierbij is voor de magneetsterkte verondersteld (NdFeB): $B_r=1.1T$. Voor het berekenen van de flux moet een vervangende totaal weerstand worden berekend volgens de regel dat weerstanden in serie vervangen mogen worden door een weerstand ter waarde van de som van de te vervangen weerstanden en weerstanden in parallel mogen vervangen worden door een weerstand ter waarde van het product gedeeld door de som van de te vervangen weerstanden. Voor deelcircuits 1 en 2 wordt de vervangweerstand dus:

$$R_v = \frac{(R_{Fe1} + R_g) \cdot (R_{Fe2} + R_g)}{R_{Fe1} + R_{Fe2} + 2R_g} = 4.58 \cdot 10^4 \frac{A}{Tm^2}$$

De vervanging van deel circuits 3 en 4 is gelijk hieraan. De totale weerstand in het circuit is dus: $R_t=R_{ms}+R_{Fe,stat}+2 \cdot R_v=9.27 \cdot 10^6 A/Tm^2$.

De totale flux die hierbij door het circuit loopt is $\Phi=U/R=2.70 \cdot 10^{-4} Wb$. Omdat naar de kracht in de luchtfilm moet worden gekeken is het van belang de spanning en de flux daar te kennen. Dit kan gedaan worden door eerst de spanning over bijvoorbeeld het deelcircuit 1 en 2 te berekenen volgens $U_{12}=\Phi \cdot R_v=12.4 J/Wb$. De flux verdeelt zich vervolgens over de circuits 1 en 2 volgens $\Phi_1=U_{12}/(R_{Fe1}+R_g)=1.18 \cdot 10^{-4} Wb$ en $\Phi_2=U_{12}/(R_{Fe2}+R_g)=1.52 \cdot 10^{-4} Wb$. Verder geldt natuurlijk dat $\Phi_1=\Phi_4$ en $\Phi_2=\Phi_3$.

Ter berekening van de kracht kan volgens de formule van Maxwell-stress het volgende worden gebruikt [Compter, 2001]:

$$F_1 = \frac{\Phi_1^2}{2\mu_o A} = 28.7 N = F_4 \text{ tevens geldt } F_2=F_3=48.0 N. \text{ De totale kracht geleverd door}$$

deze magneet is dus $F_t=F_1+F_2+F_3+F_4=153 N$. Aangezien er 8 magneten in de mover zitten is de totale aantrekkingskracht door de magneet volgens de theorie bij een luchtspleet van $10\mu m$ $F_{tot}=1,23 \cdot 10^3 N$.

Wanneer de filmdikte gevarieerd wordt zijn de vervangingsweerstand R_v en daarmee de flux en de kracht in de luchtspleet, een functie van deze filmdikte. De magneetkracht als functie van de luchtspleet is weergegeven in figuur 9. Voor lagerspleten tussen 5 en $25\mu m$ bedraagt de gemiddelde magneetstijfheid $-2.4 N/\mu m$.

Ter controle van de berekeningen kan de fluxdichtheid van het ijzer worden berekend. Verwacht wordt dat voor het ijzer geldt: $1T < B_{Fe} < 2T$. Het blijkt dat deze waarde in de mover bij de berekening te laag is, namelijk tussen 0.5T en 0.6T. In de stator is deze waarde goed, namelijk 1.1T.

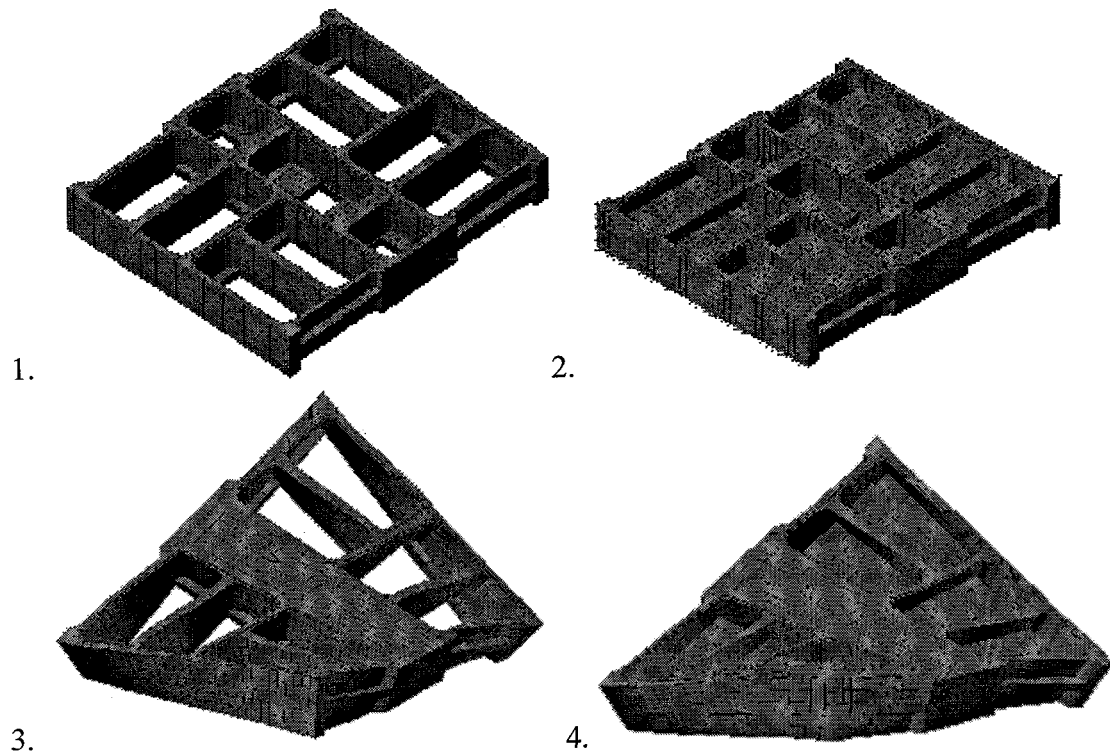
Dit is te verklaren doordat de gebruikte afmetingen benaderd zijn, terwijl deze een grote invloed hebben, en tevens is de relatieve permeabiliteit van het ijzer ook erg onzeker, deze kan variëren tussen 100 en 2000. Verder is het onzeker wat voor een magneten in de forcers zijn verwerkt, waardoor de magneetsterkte onbekend is. De magneetsterkte varieert ook nog bij het in regeling zetten van de mover, waarbij de activering van de spoel een plaatselijke versterking en verzwakking van het veld veroorzaakt die kwadratisch voorkomt in de kracht. In ieder geval is zo in kaart gebracht welke factoren van invloed zijn en wat de orde grootte van de stijfheid is.

Bijlage 5 Structuurstijfheid

In deze bijlage worden een aantal figuren weergegeven die een indicatie van de structuurstijfheid geven. Er zijn vier modellen gemaakt:

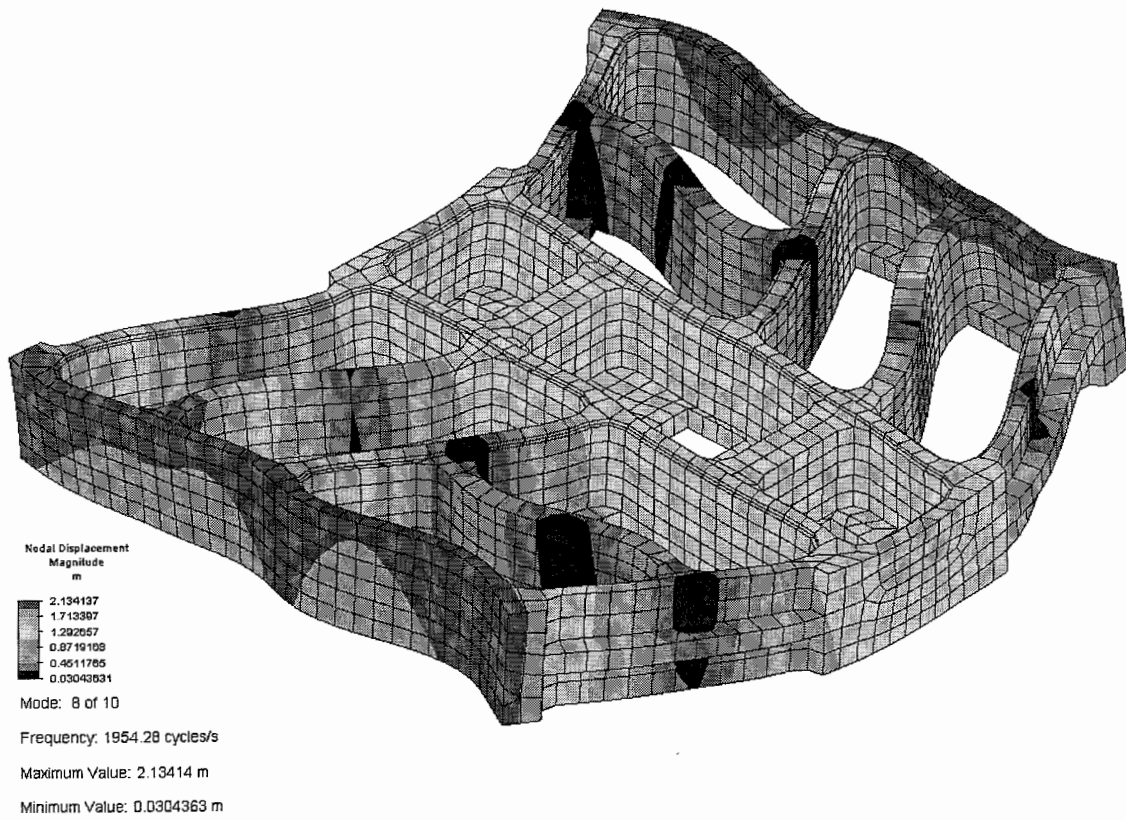
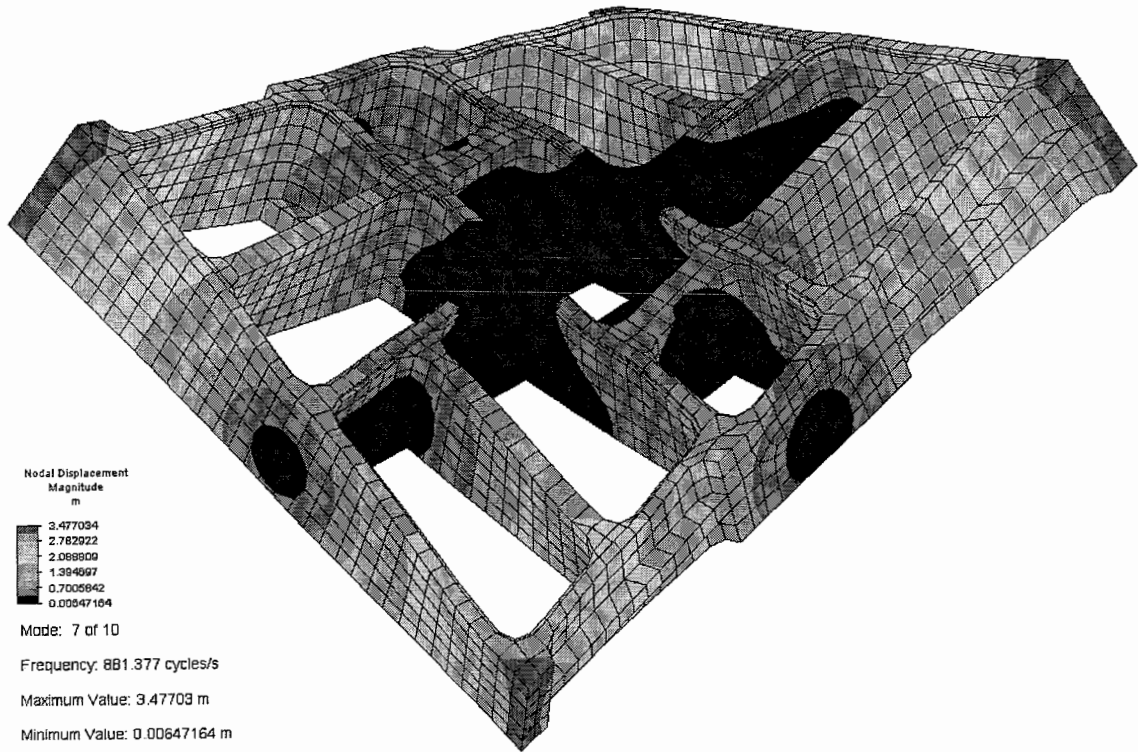
1. Aluminium basisstructuur van de mover
2. Aluminium basisstructuur van de mover met toevoeging van een tweede materiaal dat staat voor het ijzer en de epoxy in de forcers
3. Aluminium basisstructuur van de mover versterkt met torsiestijve koker
4. Aluminium basisstructuur van de mover met koker en met toevoeging van een tweede materiaal dat staat voor het ijzer en de epoxy in de forcers

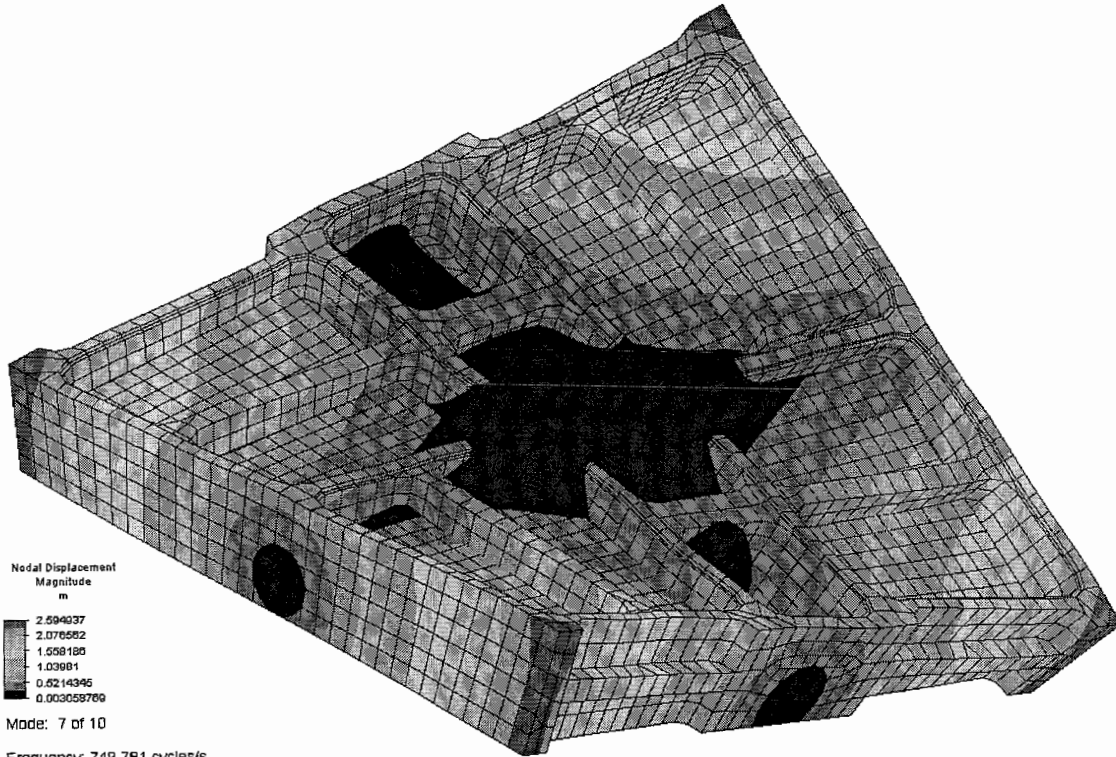
Ze staan weergegeven in de volgende figuren:



Materiaal	E-modulus	Dichtheid (kg/m^3)
Aluminium	70 GPa	2700 kg/m^3
Vervanger voor ijzer en epoxy	2.8 GPa	2500 kg/m^3

De volgende figuren geven van modellen 1t/m4 respectievelijk de eerste twee interne modes weer, waarna de modellering van de torsiestijfheid van alle vier volgt.

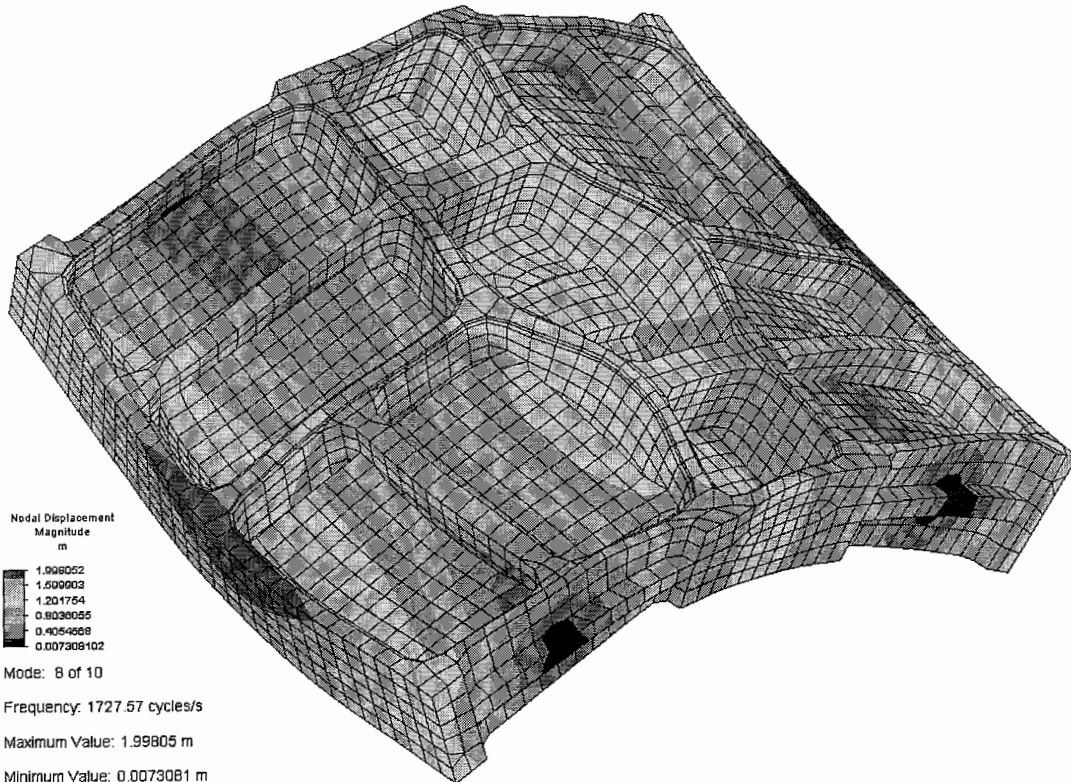




Frequency: 749.781 cycles/s

Maximum Value: 2.59494 m

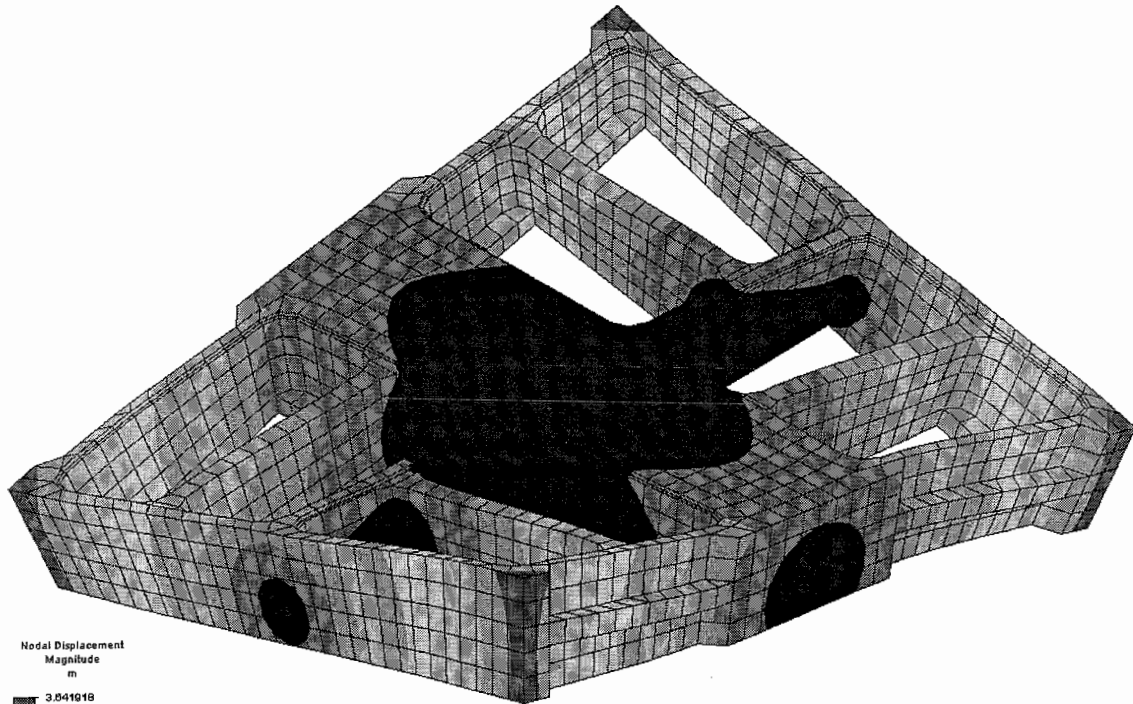
Minimum Value: 0.00305877 m



Frequency: 1727.57 cycles/s

Maximum Value: 1.99805 m

Minimum Value: 0.0073081 m



Nodal Displacement
Magnitude
m

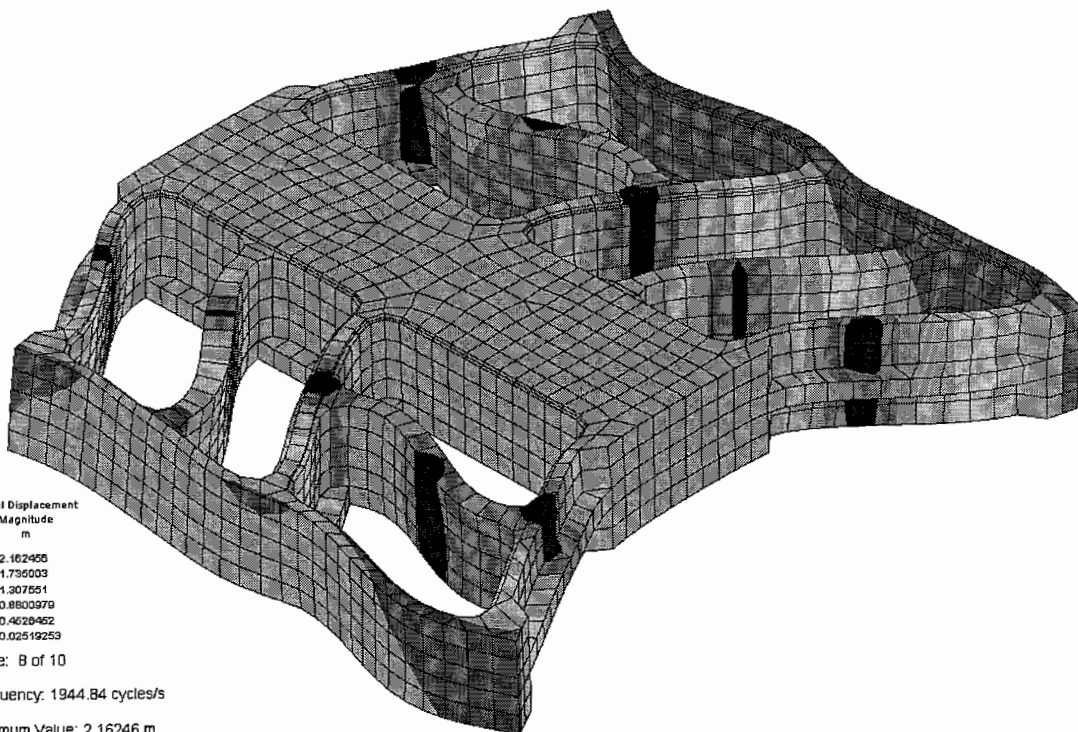
3.641918
2.915727
2.189536
1.463346
0.7371841
0.01006317

Mode: 7 of 10

Frequency: 1622.63 cycles/s

Maximum Value: 3.64192 m

Minimum Value: 0.0109632 m



Nodal Displacement
Magnitude
m

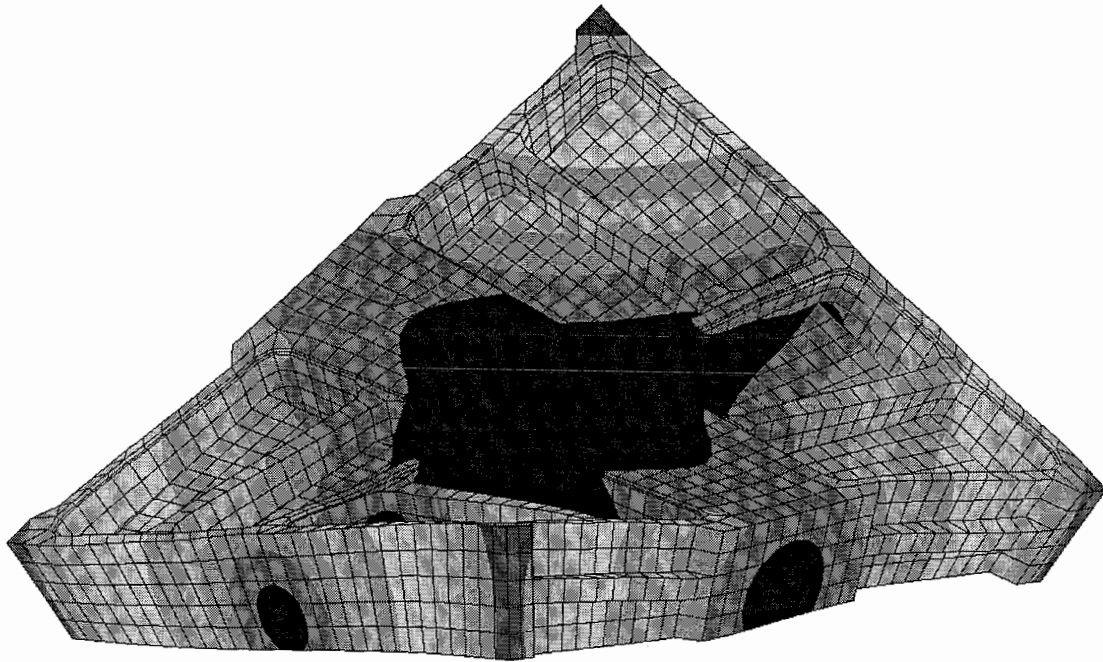
2.162456
1.736003
1.307551
0.880379
0.4628462
0.02519253

Mode: 8 of 10

Frequency: 1944.84 cycles/s

Maximum Value: 2.16246 m

Minimum Value: 0.0251925 m



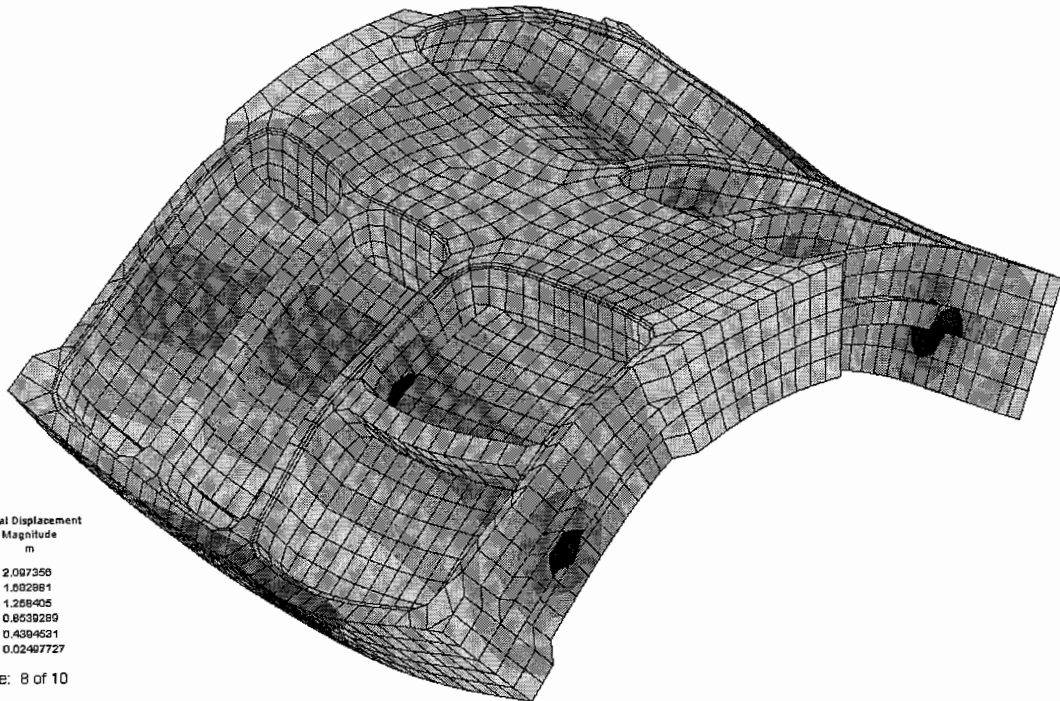
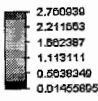
Mode: 7 of 10

Frequency: 1607.26 cycles/s

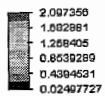
Maximum Value: 2.76094 m

Minimum Value: 0.0145589 m

Nodal Displacement
Magnitude
m



Nodal Displacement
Magnitude
m

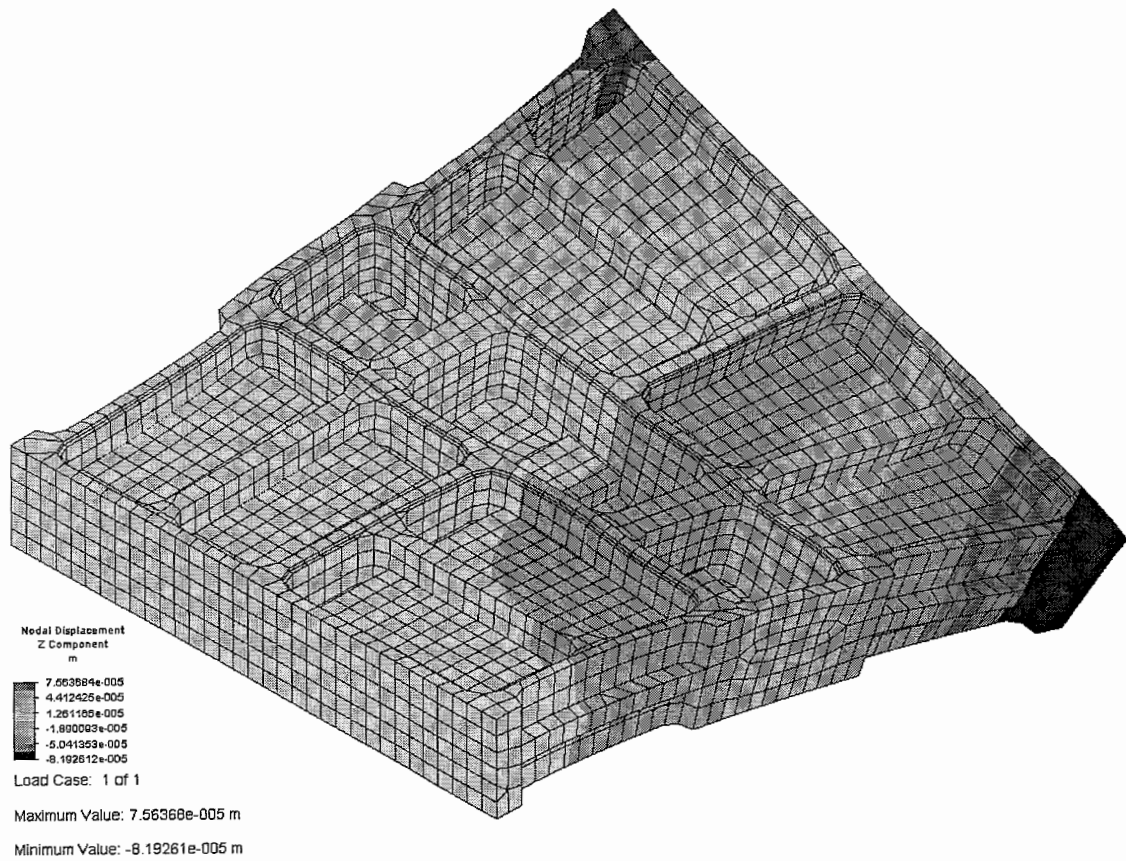
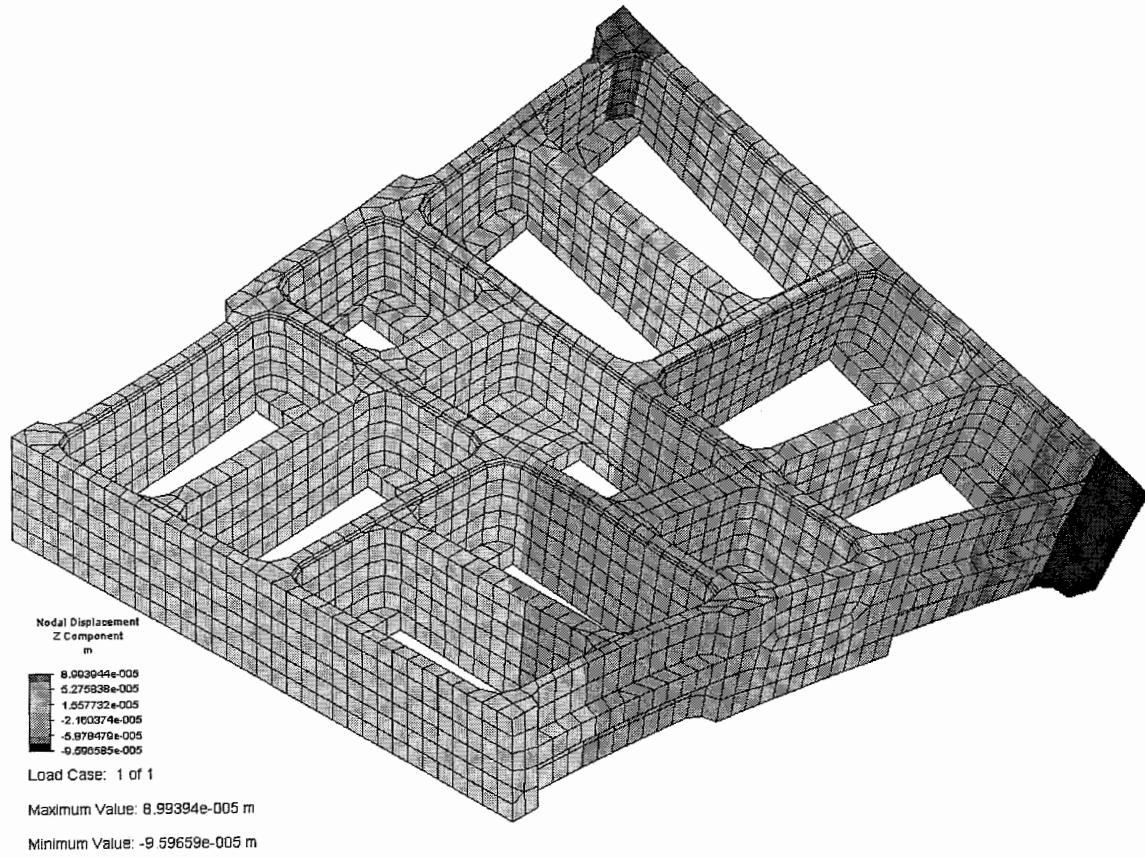


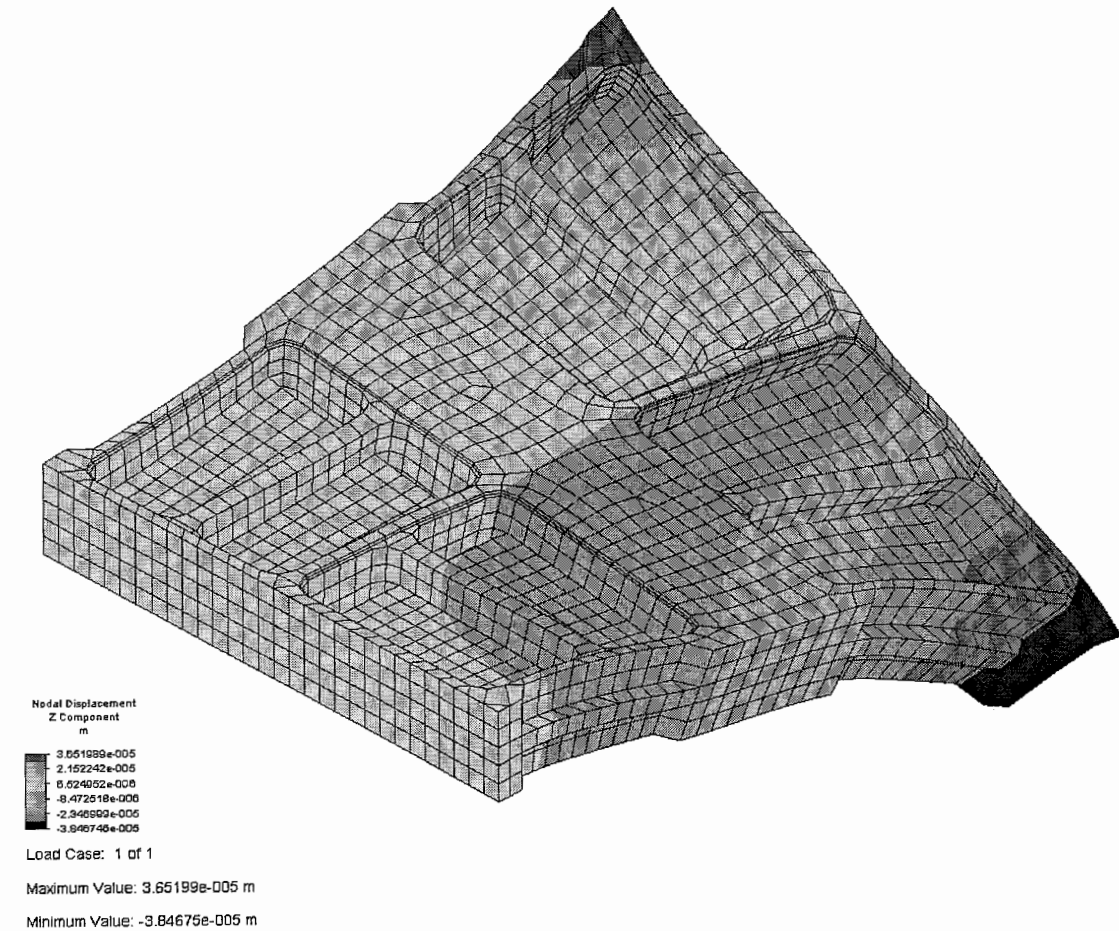
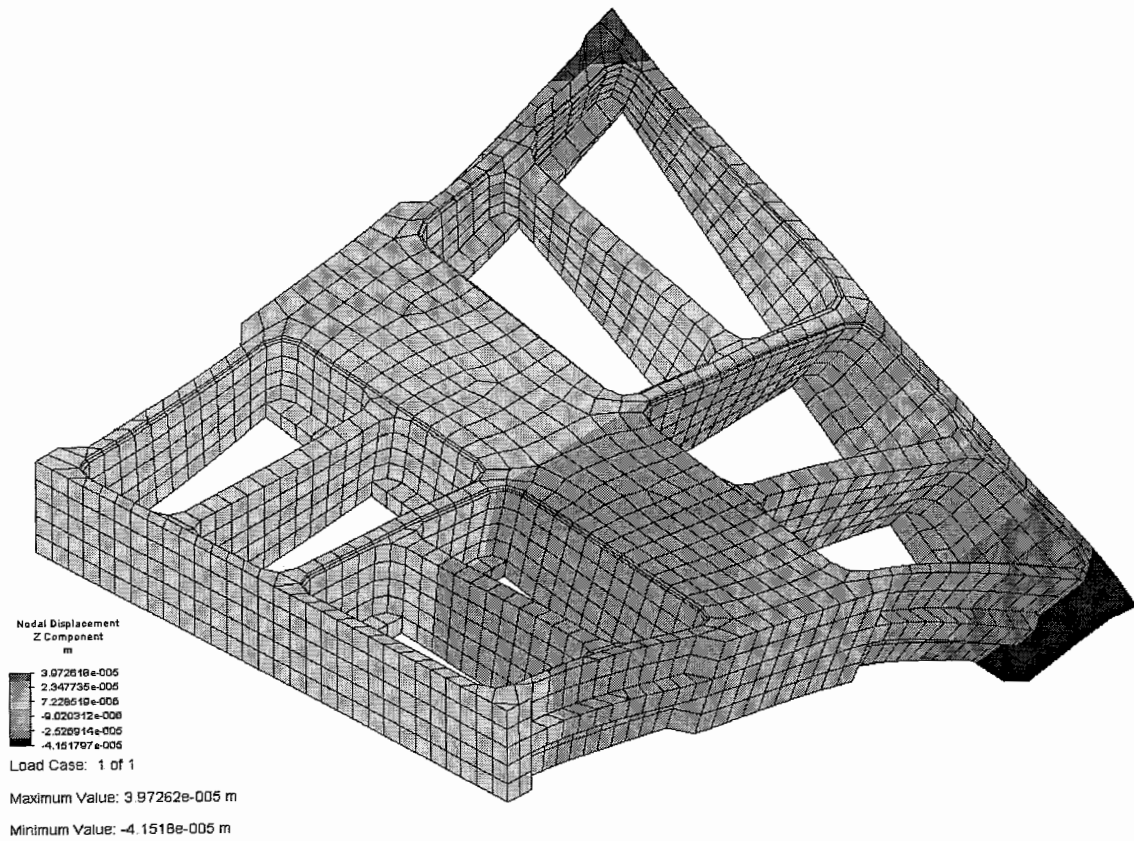
Mode: 8 of 10

Frequency: 2729.83 cycles/s

Maximum Value: 2.09736 m

Minimum Value: 0.0249773 m





Bijlage 6 Vlakheidmetingen

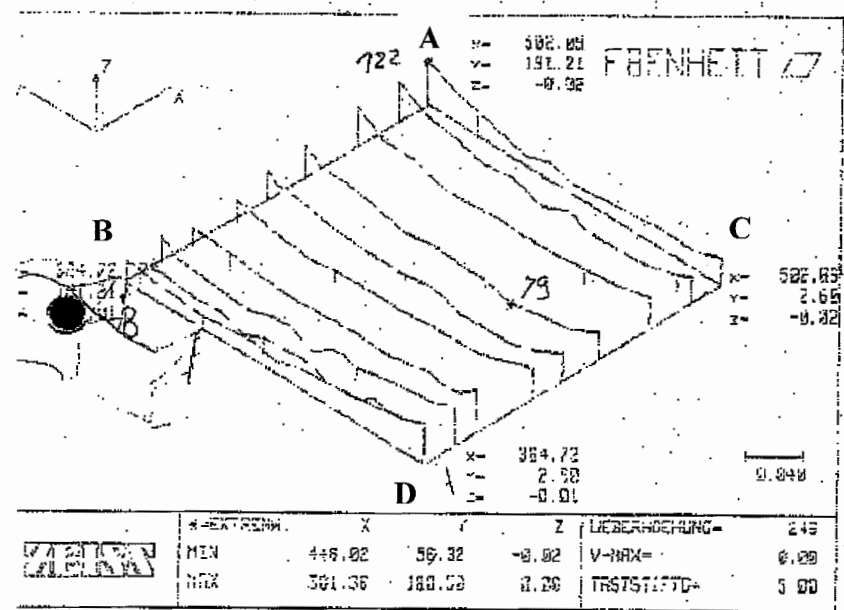
In deze bijlage zijn de vlakheidmetingen weergegeven die in paragraaf 4.1 worden besproken:

Figuur 1: Eerste vlakheidmeting, is enkele tijd na aanschaf gedaan (dec. 2002), een onvlakheid van 32µm met lichte torsievorming.

12	FLÄCHE	Z	-109.208			
	X/Z	W1	0.325			
	Y/Z	W2	-0.047			
	4P S/MIN/MAX		0.000	(4)	-0.000	(3)
1	FLÄCHE	Z	-327.118			
	X/Z	W1	-0.556			
	Y/Z	W2	-0.296			
	4P S/MIN/MAX		0.011	(4)	-0.005	(3)
2	DREHEN RAUM	W	0.6242			
3	NULL-P	Z	-327.098			
4	PUNKT	X	358.236			
5	PUNKT	Y	358.226			
6	DREHEN EBENE	W	-0.0146		UM RAUM-ACHSE 2	
7	PUNKT	Y	-425.147			
8	NULL-P	Y	-425.147			
9	FLÄCHE	Z	0.007			
	X/Z	W1	0.003			
	Y/Z	W2	-0.000			
	122P S/MIN/MAX		0.006	(122)	-0.012	(122)

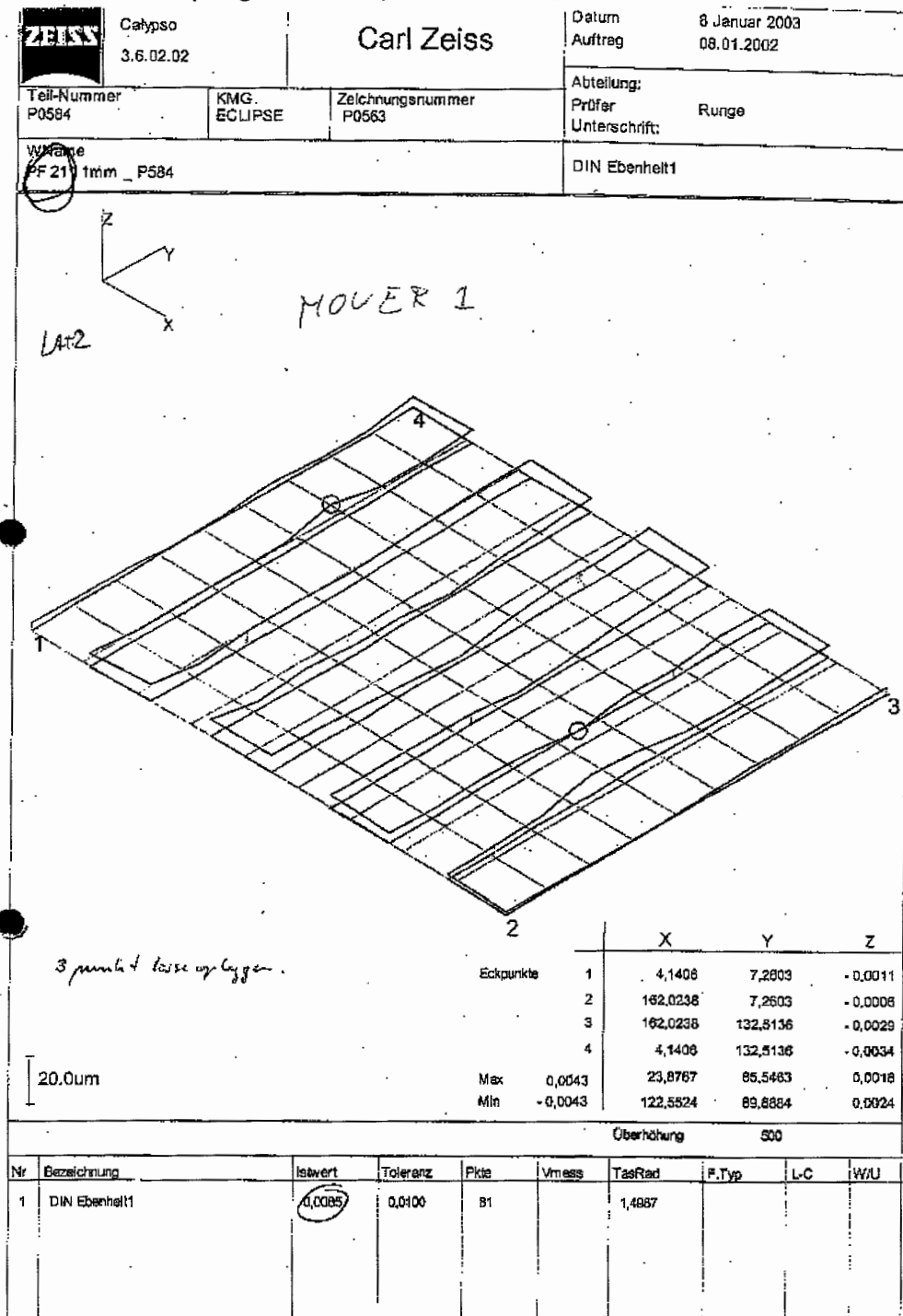
MOVER 1
P0584 CPTL

FORM- UND LAGEPRÜFUNG ISO 1101

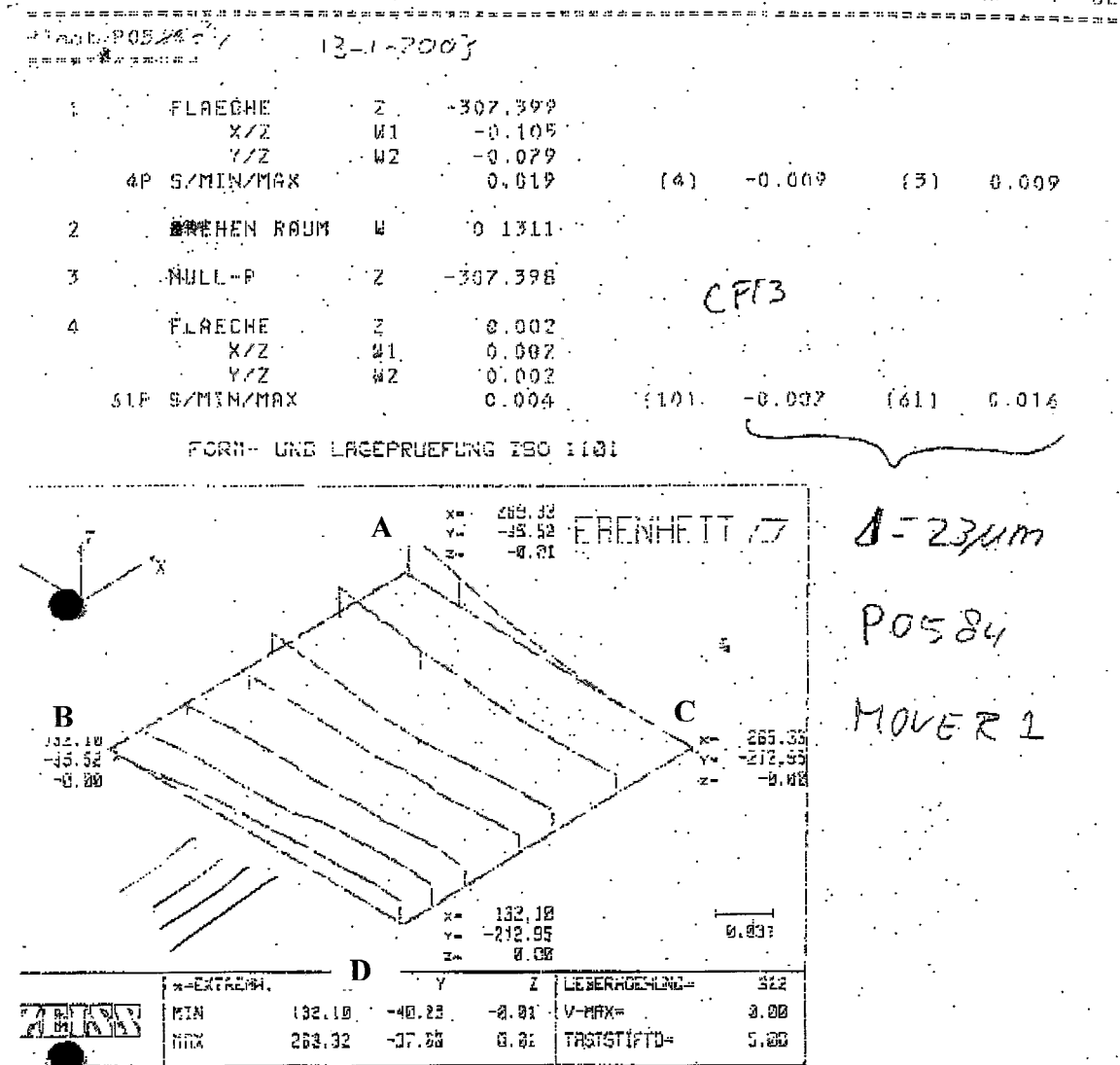


hoofteverschil
32µm

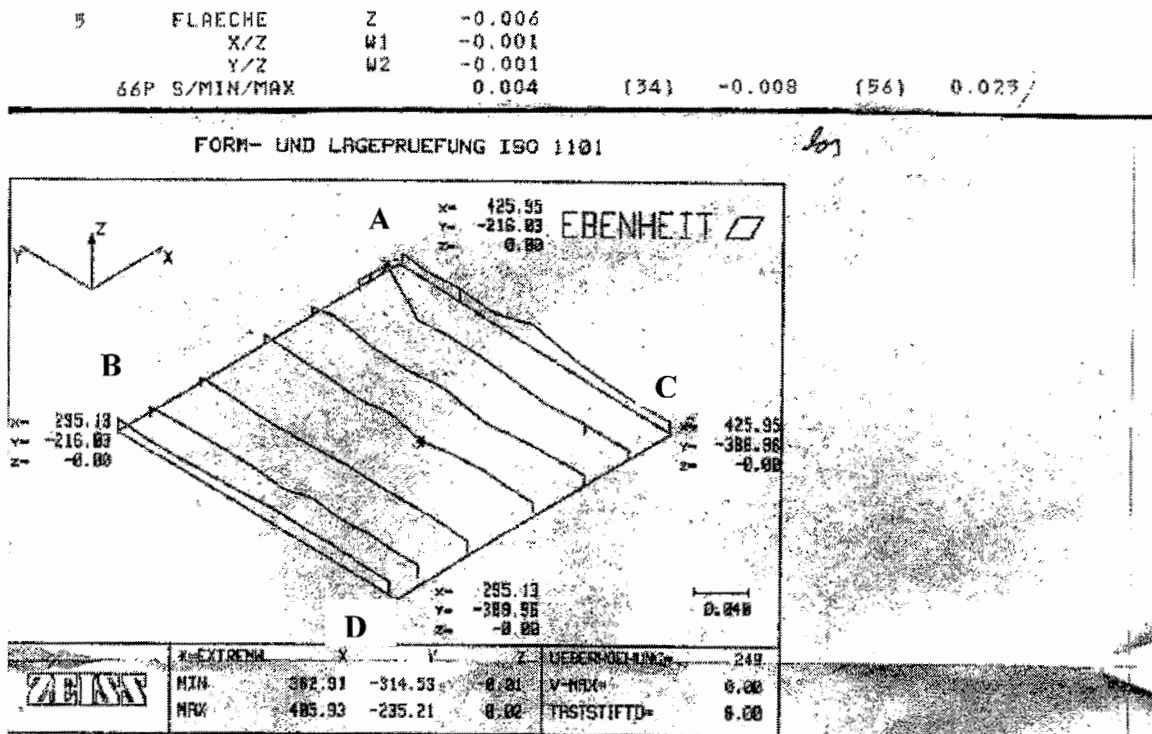
Figuur 2: Meting gedaan door LAT na bewerking van de mover (dd 2003-01-08), onvlakheid van $8.5\mu\text{m}$ geen duidelijke vervorming



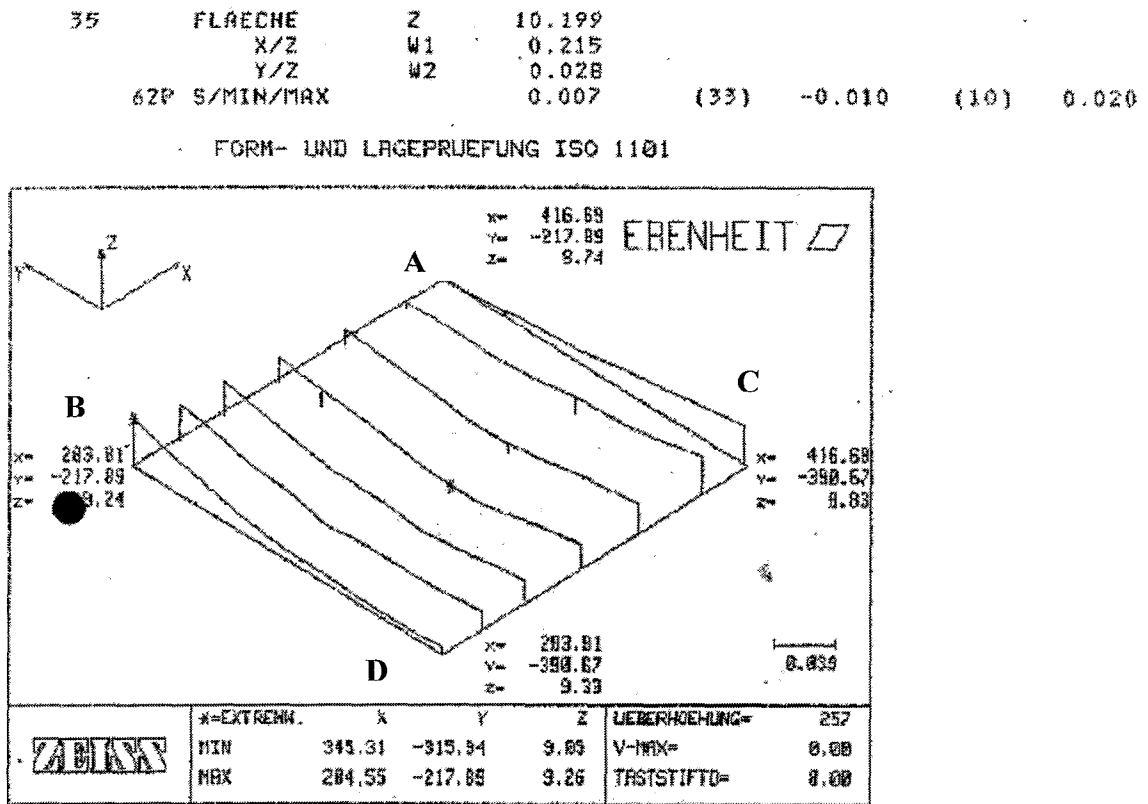
Figuur 3: Meting gedaan door Philips CFT direct na nabewerking bij LAT (dd 2003-01-13), onvlakheid van 23µm en een duidelijke torsie vervorming met pieken op A en D



Figuur 5: Meting gedaan direct na meting 4 maar na verwijdering van de dekplaat (april 2003), onvlakheid kleiner dan 10µm, geen duidelijke vervorming, de grote piek is waarschijnlijk ontstaan door vuil, dit is nagegaan en werd inderdaad niet teruggevonden.

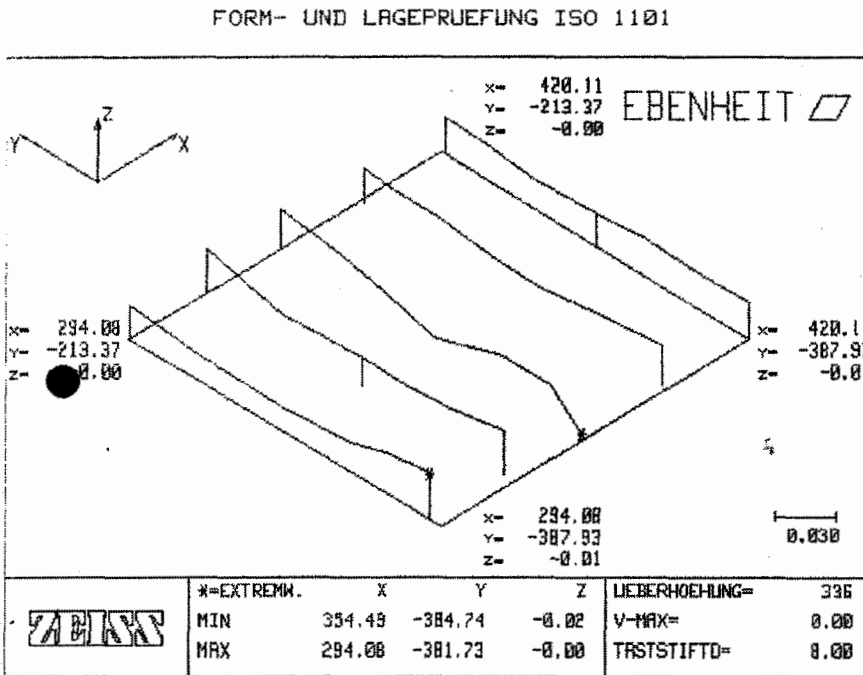


Figuur 6: Meting gedaan direct na meting 5, na opnieuw aanbrenging van de dekplaat (april 2003), onvlakheid van 30μ met duidelijke torsie vervorming met pieken bij B en C.



Figuur 7: Meting gedaan direct na meting 6, na aandraaien van de bout op hoekpunt D (april, 2003), onvlakheid circa 10µm (de meting is niet geverifieerd) in ieder geval geen duidelijke globale vervorming.

59	FLAECH	Z	0.004			
	X/Z	W1	0.000			
	Y/Z	W2	-0.002			
33P	S/MIN/MAX		0.005	(19)	-0.015	(6) 0.008



Bijlage 7 Gebruikte meetapparatuur

Tijdens de metingen is gebruik gemaakt van de volgende apparatuur (Philips CFT):

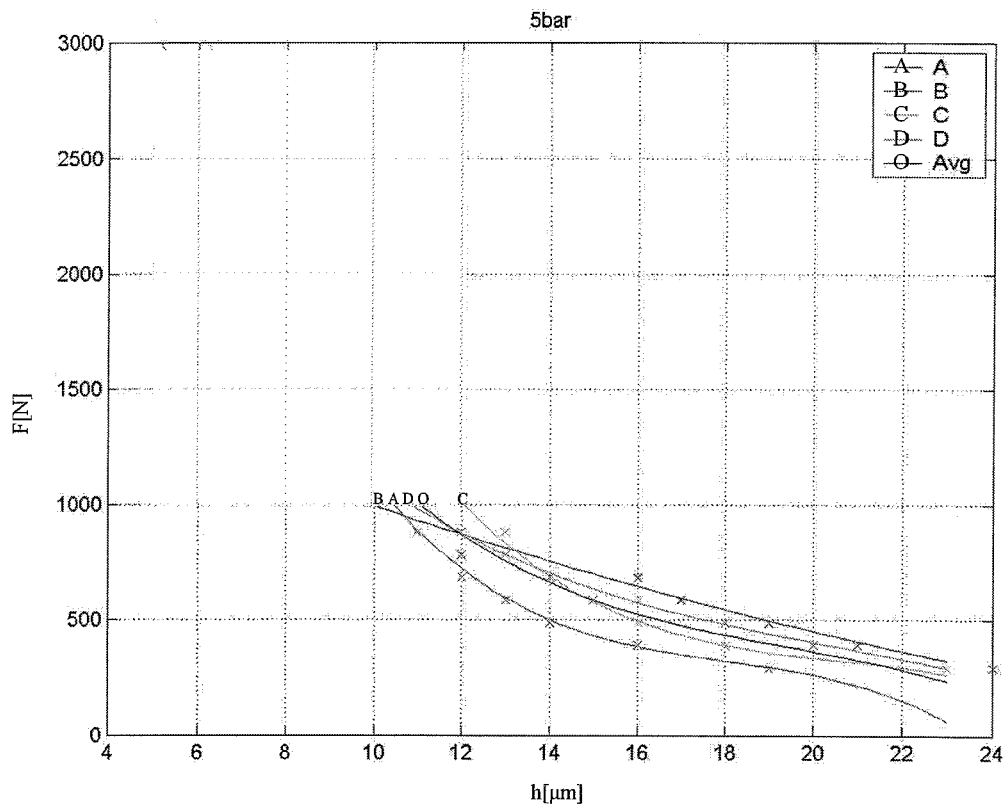
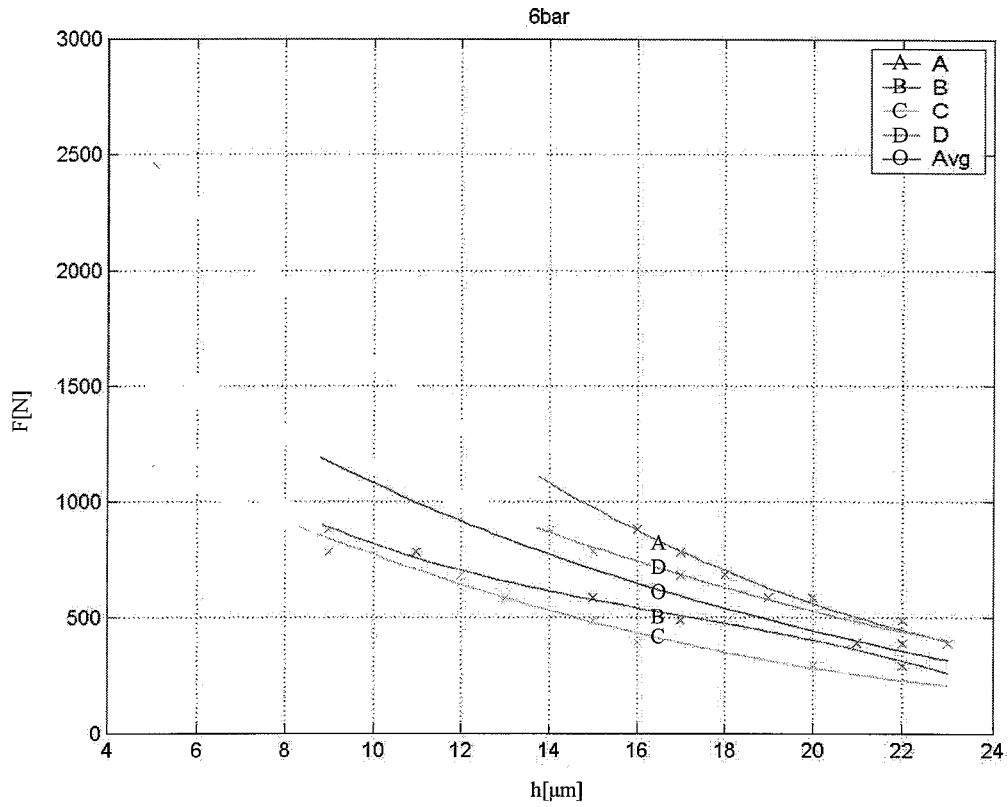
- Siglab
- Verplaatsingssensoren, zwenkarmpjes: TESA 24 & TESA 26
- Versterkers TESA 1 en TESA 6
- Krachtsensor, STORK 274
- Shaker 08 B&K
- Versnellingsensoren: B&K 33, B&K 51, B&K 53 en B&K 55
- Amplifier Nexus B&K 22 en B&K 29

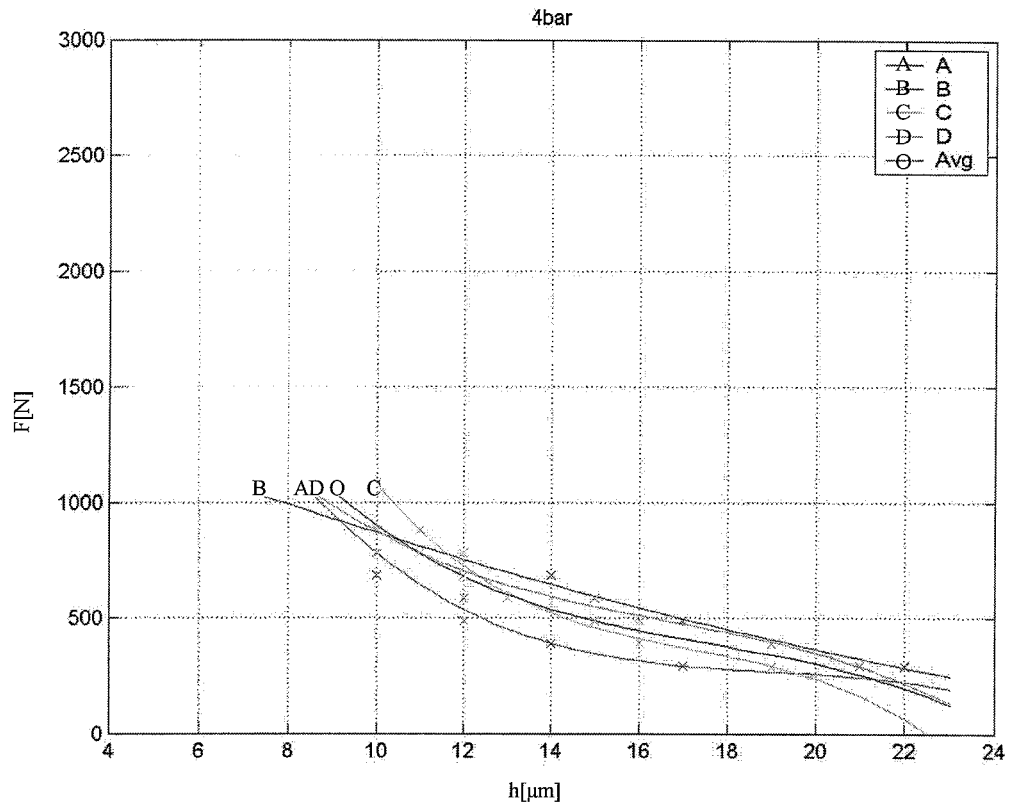
Bijlage 8 Meetresultaten op glas

Bijlage 8.1 Statische metingen op glas met de belasting als variabele

F[kg]	F[kN]	p[bar]	d-C[μm]	d-B[μm]	d-A[μm]	d-D[μm]
30	0.29	6	20	22	26	27
40	0.39	6	16	21	22	23
50	0.49	6	15	17	22	21
60	0.59	6	13	15	20	19
70	0.69	6	12	12	18	17
80	0.78	6	9	11	17	15
90	0.88	6	9	9	16	14
F[kg]	F[kN]	p[bar]	d-A[μm]	d-D[μm]	d-C[μm]	d-B[μm]
30	0.29	5	19	23	22	24
40	0.39	5	16	20	18	21
50	0.49	5	14	18	16	19
60	0.59	5	13	16	15	17
70	0.69	5	12	14	14	16
80	0.78	5	12	13	13	13
90	0.88	5	11	12	13	12
F[kg]	F[kN]	p[bar]	d-A[μm]	d-D[μm]	d-C[μm]	d-B[μm]
30	0.29	4	17	21	19	22
40	0.39	4	14	19	16	19
50	0.49	4	12	16	15	17
60	0.59	4	12	15	13	15
70	0.69	4	10	12	12	14
80	0.78	4	10	11	12	11
90	0.88	4	10	10	11	10

Door de meetwaarden per hoekpunt zijn eerst polynomen gefit, die vervolgens gemiddeld zijn om de gemiddelde filmdikte te kunnen berekenen.





Bijlage 8.2 Statische metingen op glas met de druk als variabele

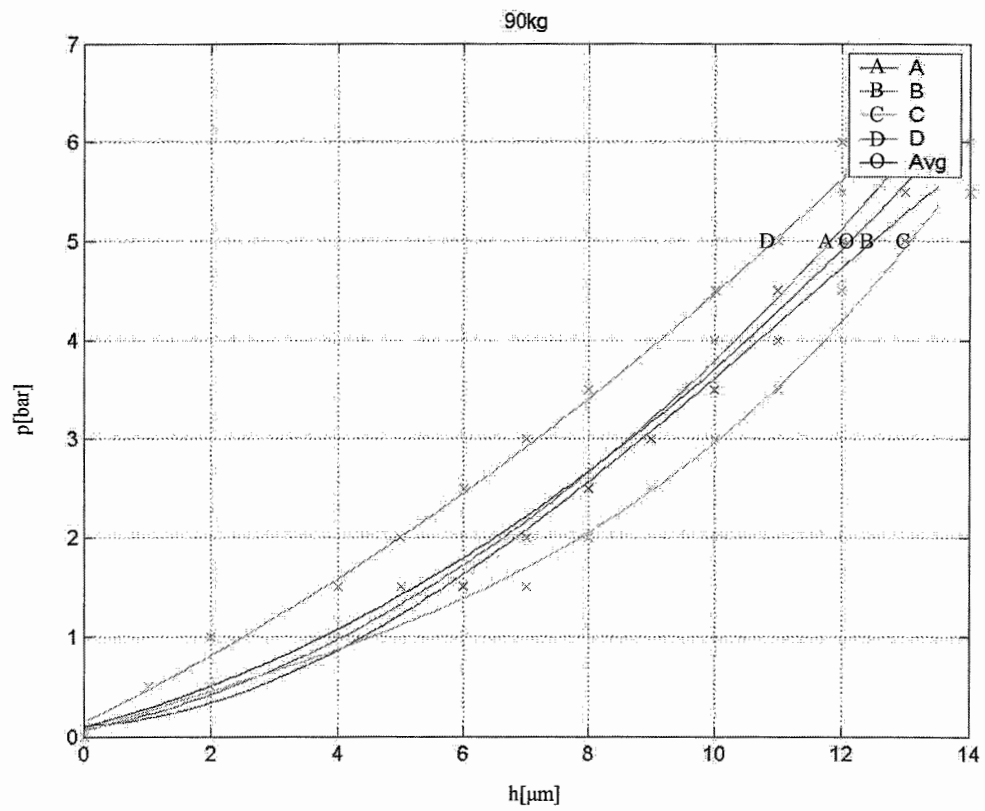
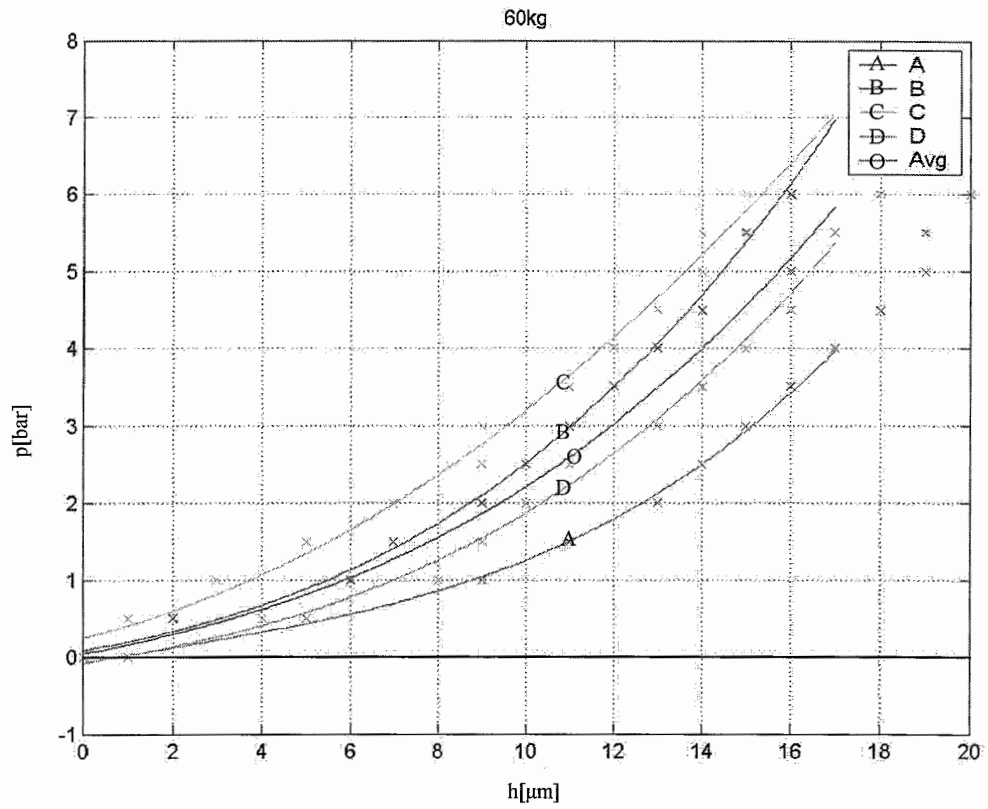
F[kg]	F[kN]	p[bar]	d-A[μm]	d-D[μm]	d-C[μm]	d-B[μm]
60	0.58	6.0	20	18	15	16
60	0.58	5.5	19	17	14	15
60	0.58	5.0	19	16	14	14
60	0.58	4.5	18	16	13	14
60	0.58	4.0	17	15	12	13
60	0.58	3.5	16	14	11	12
60	0.58	3.0	15	13	9	11
60	0.58	2.5	14	11	9	10
60	0.58	2.0	13	10	7	9
60	0.58	1.5	11	9	5	7
60	0.58	1.0	9	8	3	6
60	0.58	0.5	5	4	1	2
60	0.58	0.0	1	1	0	0

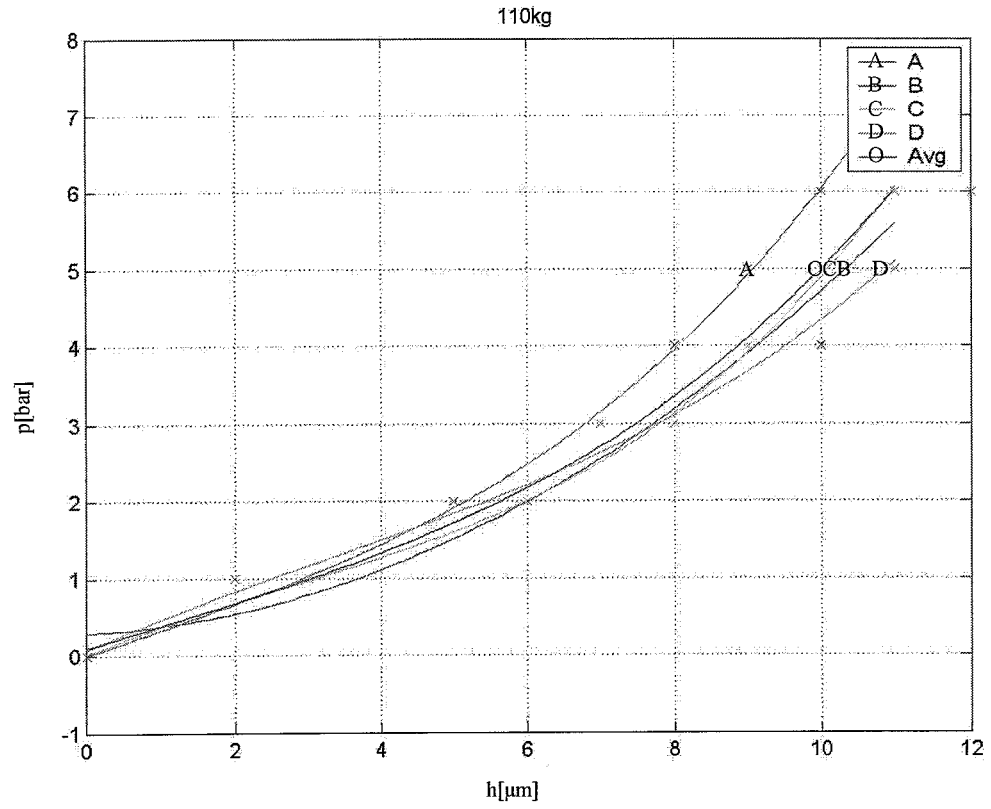
F[kg]	F[N]	p[bar]	d-C[μm]	d-B[μm]	d-A[μm]	d-D[μm]
90	0.88	6.0	14	14	13	12
90	0.88	5.5	14	14	13	12
90	0.88	5.0	13	12	11	11
90	0.88	4.5	12	11	11	10
90	0.88	4.0	12	11	10	10
90	0.88	3.5	11	10	10	8
90	0.88	3.0	10	9	9	7
90	0.88	2.5	9	8	8	6
90	0.88	2.0	8	7	7	5
90	0.88	1.5	7	6	5	4
90	0.88	1.0	4	4	4	2
90	0.88	0.5	2	2	2	1
90	0.88	0.0	0	0	0	0

F[kg]	F[N]	p[bar]	d-C[μm]	d-B[μm]	d-A[μm]	d-D[μm]
110	1.1	6.0	11	11	10	12
110	1.1	5.0	10	10	9	11
110	1.1	4.0	9	10	8	9
110	1.1	3.0	8	8	7	8
110	1.1	2.0	6	6	5	6
110	1.1	1.0	3	2	3	2
110	1.1	0.0	0	0	0	0

Door de meetwaarden per hoekpunt zijn eerst polynomen gefit, die vervolgens gemiddeld zijn om de gemiddelde filmdikte te kunnen berekenen.

Onderzoek naar stijfheidseigenschappen van een planaire reluctantie motor ter verbetering van de stabiliteit





Bijlage 9 Meetresultaten met vervorming bij metingen op stator

Deze tabel is ter illustratie opgenomen om de vervorming van de mover bij externe belasting te tonen. De kolom aangeduid met index 'T' geeft de gemeten verplaatsingen van de hoekpunten (A t/m D) aan ten opzichte van de nulstand (Tesa tasters bevestigd op de meettafel), de index 's' geeft de lokale verplaatsing van de stator aan, de index 'h' geeft het verschil aan tussen de meetwaarden gemeten op de mover en de stator. Index 'd' geeft tenslotte de verplaatsing van de mover ten opzichte van de stator zuiver als gevolg van de externe kracht aan (de onbelaste filmdikte bij aangegeven druk is er dus van afgetrokken). Te zien is dat de mover zeer schuin, dan wel vervormd van de stator afkomt.

p[bar]	F[N]	C _T [μm]	C _s [μm]	C _h [μm]	dC[μm]	p[bar]	F[N]	D _T [μm]	D _s [μm]	D _h [μm]	dD[μm]
6	0	12	0	12	0	5	0	12.7	0	12.7	0
6	1000	26.1	12.6	13.5	1.5	5	200	14.4	1.6	12.8	0.1
6	1100	28.9	13.6	15.3	3.3	5	500	16.4	4.5	11.9	-0.8
6	1200	32.6	14.8	17.8	5.8	5	1000	22.4	9.1	13.3	0.6
6	1300	37	16.2	20.8	8.8						

p[bar]	F[N]	B _T [μm]	B _s [μm]	B _h [μm]	dB[μm]	p[bar]	F[N]	C _T [μm]	C _s [μm]	C _h [μm]	dC[μm]
6	0	14.5	0	14.5	0	5	0	13.7	0	13.7	0
6	200	18.5	1.8	16.7	2.2	5	200	17.6	2.5	15.1	1.4
6	300	20.7	3.1	17.6	3.1	5	500	23.5	6	17.5	3.8
6	400	22.7	3.7	19	4.5	5	1000	36.1	13	23.1	9.4
6	600	26.7	5.8	20.9	6.4	5	1300	50	17	33	19.3
6	800	31.3	8	23.3	8.8						
6	1000	37.7	10.7	27	12.5						

p[bar]	F[N]	A _T [μm]	A _s [μm]	A _h [μm]	dA[μm]	p[bar]	F[N]	B _T [μm]	B _s [μm]	B _h [μm]	dB[μm]
6	0	12	0	12	0	5	0	13.2	0	13.2	0
6	200	13.7	1.6	12.1	0.1	5	200	16.6	1.6	15	1.8
6	1000	24.1	10.8	13.3	1.3	5	500	19.8	4.4	15.4	2.2
6	1100	26.3	11.8	14.5	2.5	5	1000	25	8.1	16.9	3.7
6	1200	29.6	12.7	16.9	4.9	5	1300	28.9	11.1	17.8	4.6
6	1300	34.9	13.5	21.4	9.4						

p[bar]	F[N]	D _T [μm]	D _s [μm]	D _h [μm]	dD[μm]	p[bar]	F[N]	A _T [μm]	A _s [μm]	A _h [μm]	dA[μm]
6	0	13.3	0	13.3	0	5	0	13.1	0	13.1	0
6	200	16.3	1.6	14.7	1.4	5	200	16.2	1.8	14.4	1.3
6	300	18.1	2.3	15.8	2.5	5	500	20.7	5	15.7	2.6
6	400	19.7	2.8	16.9	3.6	5	1000	30.3	10.1	20.2	7.1
6	600	23.9	4.4	19.5	6.2	5	1300	37.8	13.4	24.4	11.3
6	800	28.1	6.2	21.9	8.6						
6	1000	33.5	7.7	25.8	12.5						

Bijlage 10 Metingen op de stator bij variërende druk

p[bar]	d-B[μm]	d-C[μm]	d-D[μm]	d-A[μm]	h-avg-m[μm]
6.0	12	12	12	11	11.8
5.5	12	11	11	11	11.3
5.0	11	11	11	10	10.8
4.5	11	10	10	9	10
4.0	10	9	10	9	9.5
3.5	10	9	9	8	9
3.0	9	8	8	7	8
2.5	7	6	8	7	7
2.0	4	4	6	4	4.5
1.5	0	0	1	0	0.3
1.0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0
0.0	0	0	0	0	0

Door de meetwaarden per hoekpunt zijn eerst polynomen gefit, die vervolgens gemiddeld zijn om de gemiddelde filmdikte te kunnen berekenen.

