

Actieve demping.

Een nieuw

Voor het ontwerpen van precisie-apparatuur kunnen we gebruik maken van een beperkt aantal welbekende constructieprincipes. Principes die ons bijvoorbeeld vertellen dat een machineframe stijf moet zijn, maar niet te zwaar, dat we statisch bepaald moeten construeren, en dat we wrijving en speling moeten uitsluiten. Een nadeel van aldus ontworpen constructies is een gebrek aan demping. Tot nu toe heeft dit in praktijk nog maar zelden tot onoverkomelijke problemen geleid, maar naarmate de nauwkeurigheidseisen aan precisie-apparatuur steeds hoger worden, zal het gebrek aan demping een steeds grotere rol gaan spelen. In de toekomst zal daarom al in de ontwerpfase moeten worden nagedacht over de realisatie van voldoende demping in dergelijke machineframes. In het kader van het Innovatief Onderzoeksprogramma 'Precisietechnologie' is aan de Universiteit Twente onderzocht in hoeverre de regeltechniek ons hierbij van pas kan komen. Wordt ACTIEVE DEMPING een nieuw constructieprincipe?

• *Jan Holterman en Theo J.A. de Vries* •

Het onderzoek naar actieve demping vindt zijn oorsprong in de ruimtevaart. Een belangrijke eis aan constructies die de ruimte ingestuurd worden, is dat ze extreem licht moeten zijn. Een direct gevolg hiervan is dat grote ruimtevaart-constructies doorgaans zeer flexibel zijn en eenvoudig in trilling gebracht kunnen worden. Het dempen van zulke trillingen is geen eenvoudige opgave. Traditionele, passieve oplossingen, zoals het aanbrengen van viscoëlastisch materiaal op grote oppervlakken, leggen al snel te veel gewicht in de schaal. In de ruimtevaart lag het daarom voor de hand over te gaan op *actieve dem-*

ping. Hierbij wordt de constructie uitgerust met sensoren die de trillingen kunnen meten, en met actuatoren waarmee de trillingen gereduceerd kunnen worden. Als principe is *actieve trillingsbeheersing* dus allerminst nieuw.

In precisie-apparatuur is actieve trillingsbeheersing evenmin nieuw. Het wordt gebruikt voor *trillings-isolatie*, reeds van oudsher een belangrijk principe in het ontwerp van precisie-apparatuur. Hoge nauwkeurigheid kan immers alleen bereikt worden wanneer een apparaat goed geïsoleerd is van stoorbronnen uit de omgeving.

constructieprincipe?

Het grootste deel van de verstoring komt binnen via de vloer, en daarom dient precisie-apparatuur te worden opgesteld op speciale trillingsisolatoren.

Wanneer enkel *passieve isolatie* niet voldoende soelaas biedt, moet een oplossing gezocht worden in de combinatie van een passief systeem en een *actief* geregeld systeem (zie kader A). Het passieve systeem zorgt dan voor isolatie van hoogfrequente storingen, en het actieve systeem draagt zorg voor de juiste statische positie van de apparatuur en voor voldoende demping van de zogenaamde *suspension modes* (laagfrequente trillingsmodes waarbij de machine in zijn geheel staat te 'dansen' op de isolatoren).

Naast de bovengenoemde suspension modes kent een machine-frame echter nog veel meer trillingsmodes. Dit zijn modes waarbij het machineframe voornamelijk intern vervormt, en waarvan de frequenties hoger liggen dan de suspension modes. Om de negatieve invloed van deze interne trillingsmodes op de nauwkeurigheid zo klein mogelijk te maken, moet om te beginnen het frame zo stijf mogelijk zijn en de massa zo laag mogelijk gehouden worden (principe 'construeren op stijfheid'). De stijfheid van een machine kan echter niet onbeperkt worden opgevoerd. De ontwerper moet namelijk rekening houden met meer constructieprincipes dan alleen het optimaliseren van de stijfheid. Een ander belangrijk principe betreft het 'statisch bepaald' construeren [1].

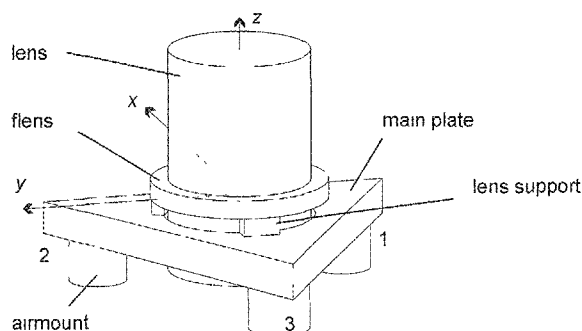
Wafer stepper lens-ophanging

We beschouwen als voorbeeld de lens-ophanging van een wafer stepper (zie kader B), schematisch weergegeven in figuur 1. In deze figuur representeert de zogeheten *main plate* de 'schone wereld'. Deze staat op drie airmounts (actieve pneumatische trillingsisolatoren) en heeft zo nagenoeg geen last van trillingen vanuit de vloer. In de main plate is een cirkelvormige uitsparing gemaakt, waarin de lens is opgehangen. Deze lens is in feite een openstapel van lenzen, met een totale hoogte van

circa 1 meter en een diameter van 0.5 meter. De lens is gevat in een flens die op zijn beurt is bevestigd aan de main plate met behulp van drie identieke blokken staal, de zogeheten *lens supports*.

Teneinde alle zes vrijheidsgraden van de lens exact één keer voor te schrijven (principe 'statisch bepaald construeren'), moet ieder van de drie lens supports twee coördinaten voorschrijven: verticaal en tangentieel (y en z in figuur 2). Lokaal moeten de overige vier coördinaten worden vrijgelaten, en daartoe moet een lens support worden uitgerust met diverse scharnieren. Om speling en wrijving, notoire bronnen van onnauwkeurigheid, te vermijden, ligt het voor de hand gebruik te maken van elastische scharnieren [1].

Een conventionele lens support is uitgerust met twee horizontale elastische scharnieren over de volle lengte van de support (zie figuur 2). Hiermee worden per ophangpunt echter slechts twee coördinaten vrijgelaten (x en φ_y in figuur 2). Twee te weinig dus. Deze keuze is het resultaat van de afweging tussen de principes 'construeren op stijfheid' en 'statisch bepaald construeren'.



Figuur 1 Schematische weergave lens-ophanging in een wafer stepper

Een lens support met meer dan twee elastische scharnieren zou leiden tot te veel stijfheidsverlies. Een gevolg van dit besluit is dat de twee eindvlakken van een lens support, en ook de daarmee corresponderende aanlegvlak-

Kader A: Trillingsisolatie

Het principe van passieve trillingsisolatie is geschetst in figuur A.1a. De frequentieresponsie van dit systeem is geschetst in figuur A.2, en wordt gekenmerkt door twee grootheden: de kantelfrequentie (f_s : de frequentie van de 'suspension mode', de trillingsmode waarbij de machine in zijn geheel 'danst' op de isolator) en de hoogte van de piek bij die frequentie. De kantelfrequentie is gegeven door:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

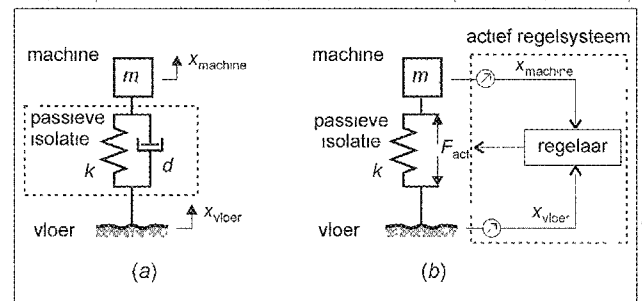
Isolatie treedt op voor frequenties hoger dan f_s . Hoe lager de kantelfrequentie, hoe groter het frequentiegebied waarin de isolatie effectief is. De kantelfrequentie kan echter niet ongestraft omlaag worden gebracht, omdat dat gepaard gaat met een heel lage stijfheid k van de isolatoren, die wel het gewicht (statisch) van de machine moeten kunnen dragen (anders wordt de statische inzakking van machine te groot).

Een ander probleem is dat de isolator het gedrag van de machine in de buurt van de kantelfrequentie negatief beïnvloedt. De negatieve invloed, gerepresenteerd door de resonantiepiek in figuur A.2, kan slechts worden verkleind door voldoende demping aan te brengen in het systeem (d in figuur A.1a). Een hoge waarde van de demping is met passieve middelen echter moeilijk te realiseren. Beide problemen (statisch gedrag, resonantiepiek) kunnen worden aangepakt met actieve middelen (figuur A.1b): parallel aan de passieve isolator wordt dan een krachtbron F_{act} geplaatst. De positie van de machine en/of de trilling van de vloer wordt gemeten en

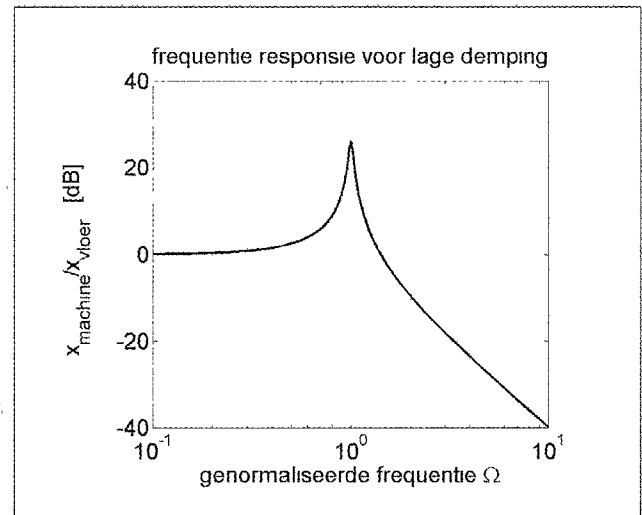
ken in de machine, voldoende evenwijdig moeten worden aangeboden.

Voor de analyse van het hierboven beschreven systeem (main plate plus lens, samen goed geïsoleerd van de vloer), nemen we gemakshalve aan dat zowel de lens als de main plate intern niet vervormen. Het dynamisch gedrag kan dan worden gekarakteriseerd door zes trillingsmodes van de lens ten opzichte van de main plate. De twee trillingsmodes met de laagste eigenfrequenties (circa 100 Hz) worden de 'joystick modes' genoemd. Bij deze modes is er sprake van kanteling van de lens om een

op basis hiervan wordt een geschikte kracht gegenereerd, zodanig dat de statische positie van de machine goed blijft, en eventuele trillingen worden gecompenseerd.



Figuur A.1: Trillingsisolatie (a: passief; b: combinatie passief en actief)



Figuur A.2: Gedrag van een passieve isolator met weinig demping

as in het vlak van ophanging (x - y -vlak in figuur 1). Hierbij wordt een beroep gedaan op de verticale stijfheid van de lens supports. In dit artikel zullen we ons richten op actieve demping van deze twee trillingsmodes.

Referentie-experiment

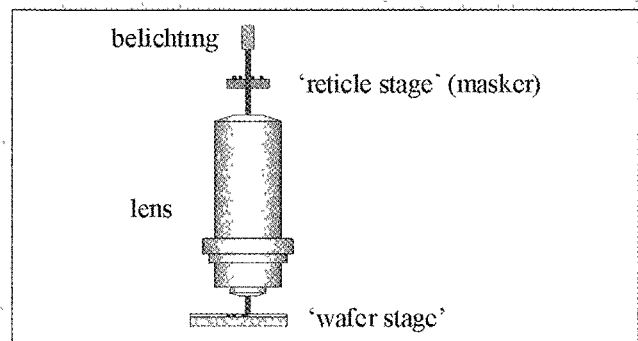
Om een van beide joystick modes goed zichtbaar te maken, is een zogenaamd *referentie-experiment* uitgevoerd [2]. In dit experiment is geprobeerd de joystick rotatie te meten om de (willekeurig gekozen) x -as in figuur 1, oftewel rotatie in het vlak van tekening in

Kader B: Wafer stepper

'Wafer steppers' zijn apparaten die worden ingezet bij de productie van IC's (integrated circuits). Ze brengen volgens een lithografisch procedé een patroon van elektronische schakelingen aan op een siliciumschijf, de zogeheten 'wafer'.

Het masker met het gewenste patroon wordt op de juiste plek gebracht door de 'reticle stage', die zich boven in de machine bevindt. De wafer wordt gepositioneerd met behulp van de 'wafer stage', onder in de machine. Tussen beide stages bevinden zich verscheidene opeengestapelde lenzen, samen gemakshalve aangeduid als 'lens'. Via deze lens wordt het gewenste patroon op het silicium geprojecteerd. Het niet-belichte materiaal op de wafer wordt na de belichting weggeëtst, zodat uiteindelijk een circuit met de gewenste vorm overblijft. Hierbij is het de kunst om de patronen van het circuit zo klein mogelijk te maken. Hoe fijner de lijnen, hoe meer schakelingen per oppervlak, hoe kleiner en hoe sneller de chip.

De wafer stepper is een uitstekend voorbeeld van een precisie-apparaat: de specificaties zijn opgesteld in termen van nanometers (één-miljoenste millimeter). De lens-oophanging van een speciaal daartoe aangepast frame van een wafer stepper heeft dienst gedaan als test-opstelling voor de in dit artikel beschreven Smart Disc experimenten.

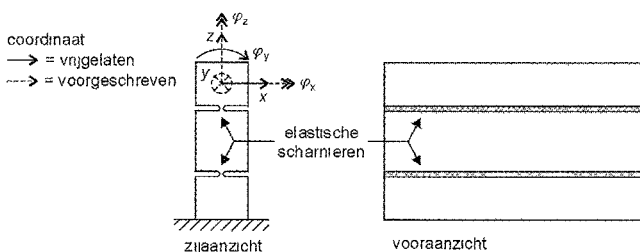


Figuur B.1 Eenvoudige voorstelling van het lithografisch proces in een wafer stepper

figuur 3. De airmounts worden gebruikt om een controleerbare verstoring aan te brengen op de main plate: het koppel T_{am} om de x-as. Dit koppel is een wit ruissignaal over een frequentieband tussen 0 en 300 Hz. Het spectrum van de verstoring is derhalve vlak in een voldoende breed frequentiegebied.

De joystick-rotatie $\varphi_x(t)$ kan niet direct worden gemeten. In plaats daarvan wordt de rotatie gereconstrueerd uit een viertal versnellingsmetingen, op zowel de lens als de main plate (aangegeven met de witte vierkantjes in figuur 3), met behulp van de volgende vergelijking:

$$\hat{\varphi}_R = \iint \left[\frac{a_{bottom}(t) - a_{top}(t)}{h_{lens}} - \frac{a_{mp,2}(t) - a_{mp,1}(t)}{h_{mp}} \right] (dt)^2$$



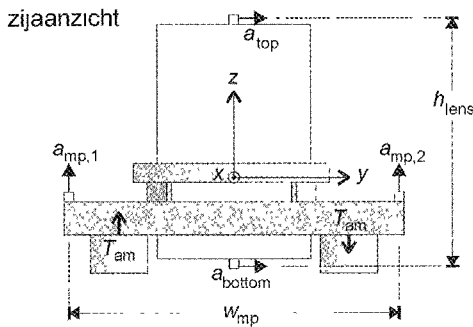
Figuur 2 Schematische weergave conventionele lens support

De resultaten van het referentie-experiment zijn weergegeven in figuur 4 (zie kader C):

- boven: de gereconstrueerde joystick-rotatie $\hat{\varphi}_R(t)$;
- midden: de bijbehorende Power Spectral Density (PSD, deze geeft aan hoe het vermogen verdeeld is over het frequentie-spectrum);
- onder: de bijbehorende cumulatieve PSD.

Dit referentie-experiment maakt duidelijk dat, bij de gegeven instelling van de airmount-ruis, de amplitude van de joystick-rotatie $0.43 \mu\text{rad}$ bedraagt (zie kader C). Voorts blijkt uit de steile stap rond 110 Hz in de cumulatieve PSD dat deze rotatie vrijwel volledig voor rekening komt van het gebrek aan demping van de joystick modes. Nadere inspectie van de meetresultaten heeft laten zien dat de relatieve demping van de joystick modes slechts 0.2% bedraagt [2].

Op zich hoeft deze lage waarde van de demping geen probleem te zijn, bijvoorbeeld wanneer er voor gezorgd kan worden dat de trillingsmodes niet worden aangestoten. In praktijk is het echter nagenoeg onmogelijk om de lens en de main plate volledig van alle stoorkrachten uit de omgeving te isoleren. De belangrijkste stoorbron blijkt in dit verband akoestiek te zijn: de lucht in het sys-



Figuur 3 Zijaanzicht test-opstelling ter bepaling van de joystick-rotatie om de x-as

teem is volop in beweging, en het is praktisch onmogelijk om de ‘schone wereld’ hiervan te isoleren.

Een oplossing die dan meer voor de hand ligt is het verhogen van de demping in het systeem. Voor de realisatie van voldoende demping in precisie-apparatuur zijn echter nog geen volwaardige constructieprincipes beschikbaar. De voornaamste oorzaak hiervan is dat demping in mechanische systemen vooral toe te schrijven is aan wrijving, terwijl de meeste vormen van wrijving juist funest voor de nauwkeurigheid. Het creëren van passieve dempingsmechanismen die niet de nauwkeurigheid in gevaar brengen, is daarmee een groot probleem. Net als in de ruimtevaart, is dan de stap naar *actieve demping* een logische zet.

Uit ruimtevaarttoepassingen is bekend dat een van de grootste problemen met het actief regelen van licht gedempte mechanismen bestaat in het garanderen van de *stabiliteit* van het geregelde systeem. Het ontwerp van een regelaar is gebaseerd op een model, dat per definitie een vereenvoudiging van het werkelijke systeem is. De regelaar zal daarom goed presteren voor die trillingsmoden die in het model zijn opgenomen, maar ongemodelleerde trillingsmoden kunnen eenvoudig instabiliteit veroorzaken. De makkelijkste manier om dit soort instabiliteit te voorkomen, is door gebruik te maken van het principe van *collocated control*: het sluiten van een regellus tussen een sensor en een actuator die op één en dezelfde plek in het systeem zijn geplaatst [3]. Op dit principe komen we later in dit artikel nog terug.

Smart Disc concept

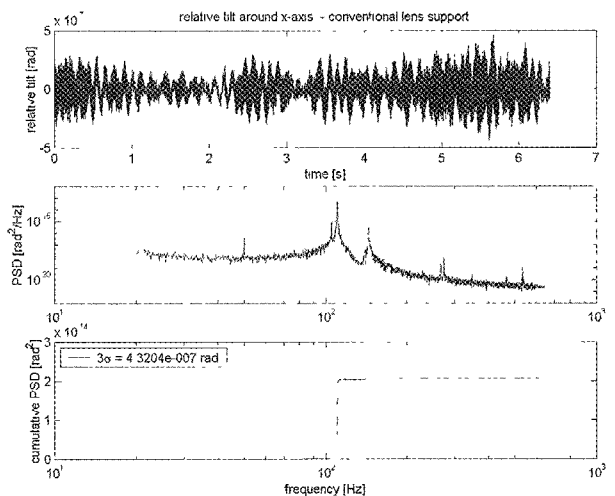
Het zogenaamde *Smart Disc* concept [4], onderwerp van onderzoek aan de Universiteit Twente, is een voorbeeld van een concept dat *collocated control* mogelijk maakt.

Het doel van het Smart Disc onderzoeksproject, dat deel uitmaakt van het Innovatief Onderzoeksprogramma ‘Precisietechnologie’, is te komen tot (richtlijnen voor het ontwerp van) ‘actieve structurelementen om het dynamisch gedrag van precisie-apparatuur te verbeteren’. Om zo’n actief structurelement te realiseren kan gebruik worden gemaakt van piezoelektrisch materiaal, dat dienst kan doen als actuator (onder invloed van een elektrische spanning zet het uit), maar ook als sensor (wanneer er een kracht op wordt uitgeoefend, resulteert dit in een elektrische lading).

In het kader van het Smart Disc project is voor de wafer stepper een zogenaamde *Smart Lens Support* (SLS) ontwikkeld: een lens support die is uitgerust met een piezoelektrische positie-actuator en een piezoëlektrische krachtsensor. Het doel hiervan is geweest te onderzoeken in hoeverre de joystick modes in de wafer stepper actief gedempt kunnen worden. Eenvoudig is na te gaan dat, om actieve demping van deze modes mogelijk te maken middels drie identieke SLS’s, elke SLS lokaal in *verticale* richting Smart Disc-functionaliteit moet vertonen. Met andere woorden: de hoogte van elke SLS moet actief beïnvloed kunnen worden, en de verticale kracht in elke SLS moet gemeten kunnen worden

Mechanisch ontwerp [5]

Het mechanisch ontwerp van de Smart Lens Support is in eerste instantie gebaseerd op de conventionele lens



Figuur 4 Resultaten referentie-experiment (joystick rotatie rond x-as)

Kader C: Power Spectral Density

Twee belangrijke kenmerken van een signaal zijn het gemiddelde μ en de standaard-deviatie σ . Voor het vermogen van een signaal geldt dat het gelijk is aan $P = \mu^2 + \sigma^2$. Een geschikte maat voor de amplitude van een ruisig signaal is de 3σ -waarde. Een normaal verdeeld signaal ligt 99,7% van de tijd binnen de grenzen $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$.

In dit artikel zijn we vooral geïnteresseerd in de bijdrage van bepaalde trillingsmodes aan de amplitude van de gemeten signalen. Dit betekent dat we niet zozeer moeten kijken naar het signaal als functie van de tijd, maar naar de frequentie-inhoud ervan. De *Power Spectral Density*, $PSD(f)$, is een maat voor het vermogen bij de frequentie f . De *cumulatieve PSD* is gedefinieerd als het oppervlak onder de PSD tot aan de frequentie f :

$$cumPSD(f) = \int_0^f cumPSD(\rho) d\rho$$

De eindwaarde van de cumulatieve PSD is gelijk aan het totale vermogen in het signaal. Wanneer μ gelijk is aan nul, kan uit de eindwaarde van de cumulatieve PSD de standaarddeviatie worden berekend:

$$\sigma = \sqrt{cumPSD(f_{max})}$$

en daarmee kan vervolgens de 3σ -waarde worden bepaald. Voor figuur 4 geldt:

$$3\sigma = 3\sqrt{2.1 \cdot 10^{-14}} = 0.43 [\mu rad]$$

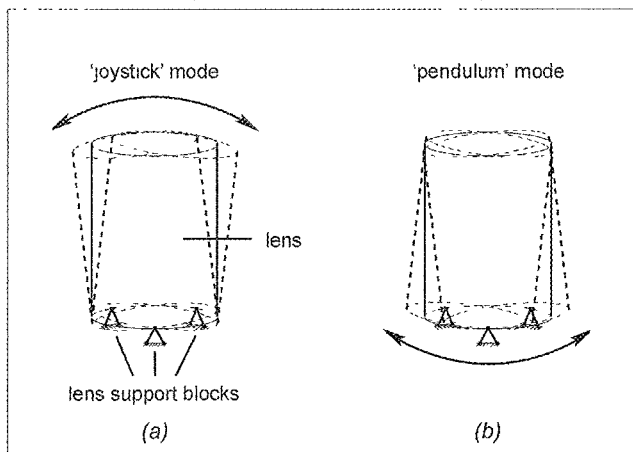
support. Hiervan zijn de twee horizontale elastische scharnieren gekopieerd, evenals de aanlegvlakken en de draadgaten voor de bouten aan de boven- en de onderkant. Bovendien heeft de SLS dezelfde afmetingen als een conventionele lens support ($l \times b \times h = 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$), teneinde een eerlijke vergelijking mogelijk te maken tussen SLS-experimenten en het referentie-experiment.

De SLS is opgebouwd uit (zie figuur 5):

- een zogenaamd scharnierblok;
- twee actuator-sensor-stacks, elk bestaande uit een multi-layer actuator en een single-layer sensor (de actuator bestaat uit meerdere piezoëlektrische lagen,

De cumulatieve PSD in figuur 4 laat zien dat dit vermogen vrijwel geheel toe te schrijven is aan één van de joystick modes (bij 110 Hz). Uit de PSD in figuur 4 blijkt echter dat de versnellingsensoren ook kleine bijdragen oppikken van andere trillingsmodes:

- de andere joystick mode (bij 105 Hz; hieruit blijkt dat de opstelling in praktijk niet geheel symmetrisch is)
- een mode rond 140 Hz (torsie van de main plate; de main plate vervormt dus wel degelijk, in tegenstelling tot een van de aannames die ter vereenvoudiging in dit artikel zijn gedaan)
- modes rond 280 Hz (de zogeheten pendulum modes, waarbij de lens min of meer horizontaal in het vlak van ophanging beweegt – zie figuur C.1).



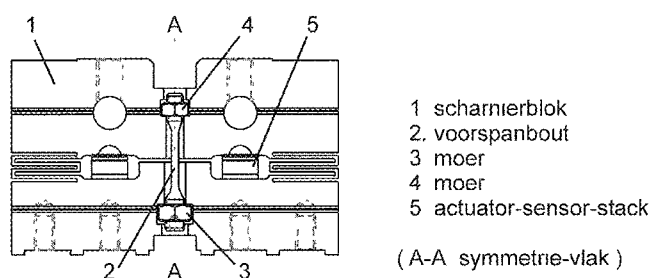
Figuur C1 Schematische weergave van dominante trillingsmodes van de lens ten opzichte van de main plate

om met een beperkte elektrische spanning toch een redelijke uitzetting te kunnen realiseren);

- een voorspanbout met twee bijbehorende moeren.

Alvorens in te gaan op het ontwerp van de individuele onderdelen, is het belangrijk te wijzen op de symmetrie in het ontwerp. De symmetrie moet ervoor zorgen dat, wanneer de actuatoren worden aangestuurd, de bovenkant van de SLS puur verticaal beweegt ten opzichte van de onderkant. Bovendien moet worden opgemerkt dat in het ontwerp van de SLS gekozen is voor een elastisch voorspanelement, dat nodig is omdat piezoëlektrisch materiaal niet al te zeer op trek belast mag worden. Het gekozen voorspanelement is een bout (verjongd, om de

voorspanstijfheid zo laag mogelijk te houden), met twee draadeinden met verschillende spoed. Door het verschil in spoed handig te kiezen, is het mogelijk de SLS voldoende nauwkeurig voor te spannen. Omdat het instellen van de mechanische voorspanning toch nog niet zo eenvoudig is, is er gekozen voor één voorspanbout in het midden, en twee actuator-sensor-stacks aan de zijkant van de SLS. Zowel de beide actuatoren als de beide sensoren zijn elektrisch parallel geschakeld, zodat ze samen zorgen voor Smart Disc-functionaliteit in slechts één richting. Een bijkomend voordeel van de keuze voor twee actuator-sensor-stacks is een verdubbeling van het effectieve oppervlak van de actuator (en de daarmee gepaard gaande stijfheid).



Figuur 5 Smart Lens Support

Actuator-sensor-stack

Als basis voor de actuator-sensor-stack is gebruik gemaakt van een standaard multi-layer actuator uit de collectie van Physik Instrumente: de P-804.10, met een oppervlak van 10 mm X 10 mm, een hoogte van 18 mm, en een maximale uitzetting van 15 μm [6]. Omdat dit veel meer is dan de benodigde uitzetting (uiteindelijk bleek 0.1 μm meer dan voldoende) en er in de lens support slechts beperkte ruimte is om de stacks in te bouwen, is besloten uit één enkele actuator twee kleinere actuatoren te zagen (van 4 mm hoog) en hierop een enkellaags piezoëlektrische sensor te bevestigen (dikte 1 mm). Aan de beide uiteinden van de stack en tussen de actuator en de sensor zijn bovendien dunne lagen passief keramiek aangebracht om de actuator- en de sensor-elektroden en het stalen scharnierblok elektrisch van elkaar te scheiden. De aldus verkregen actuator-sensor-stack is te zien in figuur 6. De uiteindelijke hoogte bedroeg 7.3 mm.

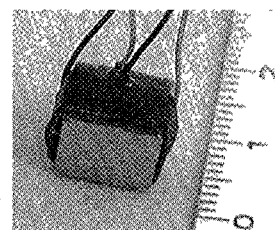
Een andere reden om de hoogte van de stacks zo klein mogelijk te houden, is het beperken van het verlies van

stijfheid van de support. Op basis van grove modelvorming werd verwacht dat de verticale stijfheid van de SLS, voornamelijk bepaald door de horizontale elastische scharnieren in serie met de twee parallelle stacks, ongeveer de helft zou bedragen van de stijfheid van de conventionele lens support. Hoewel dit een drastische afname van de stijfheid is, werd besloten het ontwerp van de SLS (met name de stacks) niet verder te optimaliseren. De reden hiervoor was de verwachting dat het gegeven ontwerp in elk geval zou voldoen aan de voornaamste eis aan een SLS, namelijk het mogelijk maken van Smart Disc-experimenten in de lens-ophanging van een wafer stepper

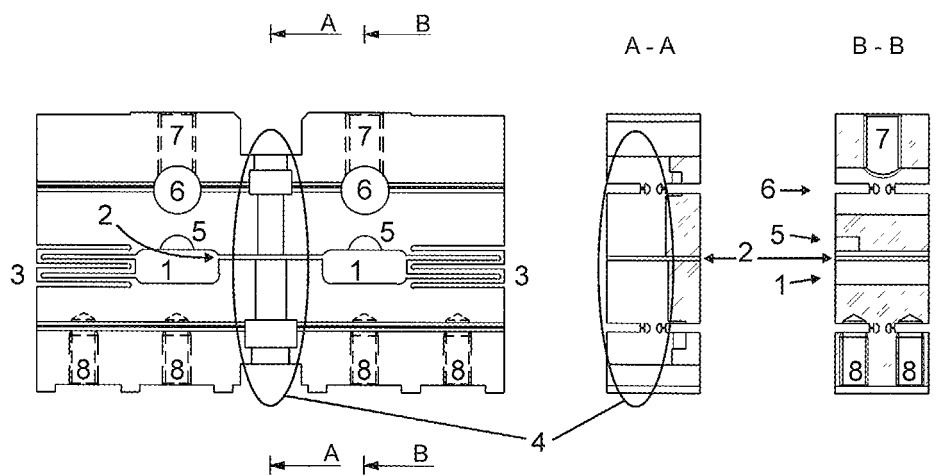
Scharnierblok

Van het scharnierblok van de SLS zijn de voorkant en twee dwarsdoorsneden gegeven in figuur 7. In het midden van het blok zijn twee gaten gemaakt waarin de actuator-sensor-stacks geplaatst kunnen worden. Tussen beide gaten is een horizontale sneed gemaakt en aan weerszijden van het blok zijn zogenaamde harmonicaveren aangebracht. Verder is er in het midden van het blok een verticale sleuf gemaakt waarin de voorspanbout en de moeren geplaatst kunnen worden. De harmonicaveren zorgen voor een elastische graad van vrijheid in (onder andere) verticale richting tussen de boven- en de onderkant van het scharnierblok. De hoogte van de gaten voor de actuator-sensor-stacks is 0.1 mm kleiner gekozen dan de hoogte van de stacks, zodat deze al meteen na het inbrengen in het scharnierblok (maar nog voor de voorspanbout is aangebracht) onder een lichte mechanische voorspanning staan. De voorspankracht die de harmonicaveren leveren zou onder operationele condities echter onvoldoende zijn, vandaar dat de voorspanbout ook nodig is.

Voor het fixeren van de stacks in het scharnierblok zou de voorspankracht van alleen de harmonicaveren wellicht al wel voldoende zijn geweest, maar toch is besloten om



Figuur 6 Onder- en vooraanzicht van de actuator-sensor-stack



Figuur 7 Vooraanzicht en dwarsdoorsneden van het scharnierblok van de SLS

- 1 gaten voor actuator-sensor-stacks
- 2 horizontale snede (maakt verticale beweging mogelijk)
- 3 harmonica-veren (houden boven- en onderkant bij elkaar)
- 4 verticale sleuf voor voorspanbout en moeren
- 5 extra ruimte om eventueel solderen mogelijk te maken

- 6 conventionele gaten
 - 7 conv draadgaten
 - 8 conv draadgaten
- (6 - 8: gekopieerd van conv lens support)

hiervoor, aan zowel de boven- als de onderkant van de actuator-sensor-stacks, lijm te gebruiken. Het doel hiervan is vooral geweest het voorkomen van beschadiging aan het piezoëlektrisch materiaal, als gevolg van mogelijke maat-afwijkingen, oneffenheden of onvlakheden. (Het nadeel van de lijm is opnieuw de afgenomen stijfheid.) Voor de verlijming is gebruik gemaakt van een speciaal ontworpen lijmmal, waarmee de juiste uiteindelijke hoogte van de SLS kan worden gegarandeerd. Alle toleranties worden vervolgens opgevangen in de twee lijmlagen (per stack) met een beoogde dikte van $2 \times 0.05 \text{ mm}$

Experiment met passieve Smart Lens Supports

Op de opstelling zoals geschetst in figuur 1, maar nu uitgerust met (passieve) Smart Lens Supports, is een identiek experiment uitgevoerd als het eerder beschreven referentie-experiment met de conventionele lens supports. De resultaten zijn weergegeven in figuur 8 [2].

Uit de PSD (middelste figuur) kunnen we het volgende opmaken.

- De frequentie van de joystick modes is afgenomen van 110 Hz tot 96 Hz, respectievelijk van 105 Hz tot 92 Hz. Dit betekent dat, als gevolg van de afgenomen verticale stijfheid van de lens supports, de effectieve stijfheid die bij deze modes een rol speelt, is afgenomen tot $(92/105)^2 = 0.76$ van de oorspronkelijke waarde.

- De frequentie van de pendulum modes (zie figuur C 1) is afgenomen van 274 Hz tot 184 Hz, respectievelijk van 266 Hz tot 179 Hz. Dit betekent dat, als gevolg van de afgenomen tangentiële stijfheid van de lens supports, de zongenaamde effectieve stijfheid die bij deze modes een rol speelt, is afgenomen tot $(179/266)^2 = 0.45$ van de oorspronkelijke waarde
- De frequentie van de trillingsmode rond 140 Hz (torsie van de main plate) is nauwelijks afgenomen, hetgeen aangeeft dat de stijfheid van de lens supports bij deze mode nauwelijks een rol speelt.

Uit de cumulatieve PSD (onderste figuur) kunnen we opmaken dat, hoewel de stijfheid van de lens-ophanging drastisch is afgenomen, de gemiddelde joystick rotatie niet is toegenomen. Sterker nog: in termen van de 3σ -waarde blijkt de joystick rotatie zelfs te zijn *afgenomen* (van $0.43 \mu\text{rad}$ tot $0.38 \mu\text{rad}$). Deze reductie kan worden verklaard door de toegenomen passieve demping in het systeem, veroorzaakt door een combinatie van hysteresis in het piezoëlektrisch materiaal, weerstanden in de actuator- en sensor-elektronica (die wel is aangesloten, maar niet is bekrachtigd), en de viscoelasticiteit van de lijm. Nadere inspectie van de meetresultaten heeft laten zien dat de relatieve demping van de joystick modes is toegenomen van 0.2% voor de conventionele lens support tot 0.5% voor de lens-ophanging met passieve SLS's. Hoewel de nieuwe waarde van de demping dus nog steeds erg

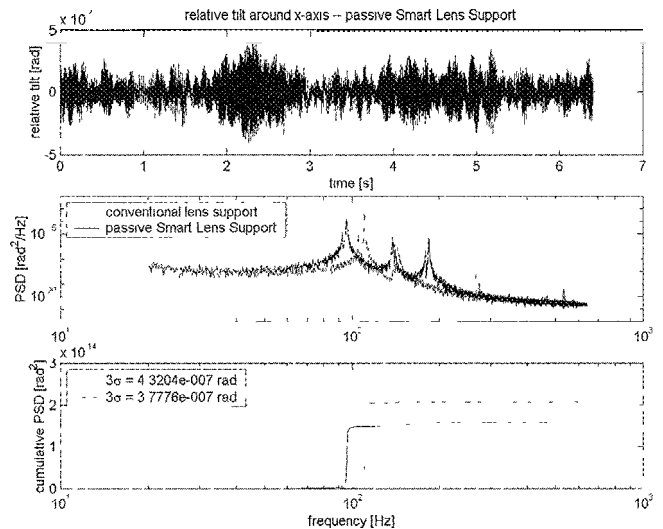
klein is, blijkt uit dit experiment reeds de positieve invloed ervan op het dynamisch gedrag van de lens en de main plate. Het op een actieve manier verder vergroten van de demping lijkt dus zonder meer de moeite waard.

Actieve demping: regeltechniek

De gebruikte regelstrategie om met de SLS actief te dempen, is gebaseerd op het feit dat in het Smart Disc concept de actuator en de sensor zich op dezelfde plek in de structuur bevinden. Dit namelijk maakt het mogelijk *collocated control* toe te passen, waarmee *actief* (met behulp van actuatoren, sensoren, en versterkers) het gedrag van een *passief* element (dus ‘gegarandeerd’ stabiel) kan worden gerealiseerd. Dit kan worden uitgelegd met behulp van figuur 9. Hier beschouwen we het eenvoudige eendimensionale geval waarin een machine bestaat uit twee framodelen (m_1 en m_2) die met beperkte stijfheid aan elkaar zijn verbonden: $k_{21} < \infty$ (figuur 9a). De stijfheid k_{10} stelt een isolator voor.

In deze configuratie kan een Smart Disc worden opgenomen als geschetst in figuur 9b. De actuator-sensor-stack gedraagt zich, in passieve zin, vooral als een elastisch element: k_s . Onder invloed van een op de actuator aangebrachte elektrische spanning zal deze een bepaalde hoeveelheid willen uitzetten. Dit is aangegeven met de ‘verplaatsingsbron’ x_{act} . De werkelijke uitzetting van de actuator-sensor-stack is echter afhankelijk van meerdere factoren. Zo hangt in figuur 9b de statische verplaatsing bijvoorbeeld af van de voorspanstijfheid k_p . Uit het oogpunt van efficiëntie, maar ook uit het oogpunt van regelbaarheid [7], is het raadzaam de stijfheid van een voorpanelement zo laag mogelijk te kiezen

In figuur 9b is bovendien aangegeven dat de kracht in de actuator-sensor-stack gemeten wordt (F_{sens}), en als ingangssignaal dient voor de regelaar. Deze kracht vormt samen met de tijdsafgeleide van de gestuurde positie een zogenaamd *vermogensgeconjugeerde* variabelenpaar. Het product van de gemeten (druk)kracht en de gestuurde snelheid is gelijk aan het vermogen dat van het mechanisch systeem naar het regelsysteem vloeit. Door er nu voor te zorgen dat het teken van dit product te allen tijde positief is, kan men er zeker van zijn dat het regelsysteem energie aan het mechanisch systeem onttrekt. Op een actieve manier wordt zo het (passieve) gedrag van een visceuze demper gerealiseerd (figuur 9c). De regelaar in figuur 9b moet simpelweg een statische lineaire relatie voorschrijven tussen de gemeten kracht en de te sturen snelheid:



Figuur 8 Resultaten experiment met passieve Smart Lens Supports

$$v_{act}(t) = KF_{sens}(t),$$

hetgeen overeenkomt met een visceuze demper met waarde $d_{avc} = F_{sens}/v_{act} = 1/K$ (figuur 9c).

Het signaal dat in figuur 9b naar de positie-actuator moet worden gestuurd, kan worden verkregen door $v_{act}(t)$ te integreren

$$x_{act}(t) = \int v_{act}(t) dt = \int KF_{sens}(t) dt = K \int F_{sens}(t) dt$$

oftewel, na Laplace transformatie:

$$x_{act}(s) = \frac{K}{s} F_{sens}(s).$$

Deze regelstrategie wordt ‘Integral Force Feedback’ genoemd [3].

Om voor lage frequenties de versterking van de regelaar te beperken, wordt meestal gebruik gemaakt van een *lekkende integrator*:

$$x_{act}(s) = \frac{K}{s+p} F_{sens}(s),$$

met een statische versterking K/p . Het passieve equivalent van deze regelaar is geschetst in figuur 9d: parallel aan de oorspronkelijke demper $d_{avc} = 1/K$ staat nu een extra stijfheid, gegeven door $k_{avc} = p/K$

Het grote voordeel van de hiervoor beschreven regelstrategie is dat er nauwelijks gebruik wordt gemaakt van modelkennis. De enige kennis die gebruikt is, betreft het feit dat de actuator en de sensor zich op dezelfde plek in het systeem bevinden. Voor de prestaties van het regelsysteem is het uiteraard wel belangrijk de regelaarparameters K en p goed af te stemmen op het mechanisch systeem; hiervoor is een eenvoudige set *tuning-regels* opgesteld [7]. De stabiliteit van het geregelde systeem zal echter niet in gevaar komen wanneer de regelaar minder zorgvuldig ingesteld wordt, of wanneer het dynamisch gedrag van het mechanisch systeem in de loop van de tijd onverhoopt mocht veranderen. De gebruikte regelstrategie is kortom zeer *robuust*.

Afgezien van de regelstrategie heeft een actief regelsysteem in praktijk natuurlijk wel enkele belangrijke beperkingen. De actuator heeft slechts een beperkt bereik, en de beperkte bandbreedte van de elektronica kan ervoor zorgen dat hoogfrequente trillingsmodes voor al te hoge regelaar-versterking toch instabiel raken. Wanneer het ontwerp van de actuator en de elektronica goed is afgestemd op de voorhanden zijnde situatie, hoeft dit echter geen onoverkomelijk probleem te vormen. Het fundamentele probleem in de hierboven beschreven methode om actieve demping te implementeren is het vinden van een goede balans tussen de waarde van de stijfheid k_{avc} en de demper d_{avc} in figuur 9d. Enerzijds mag de stijfheid k_{avc} niet te groot zijn, omdat anders de

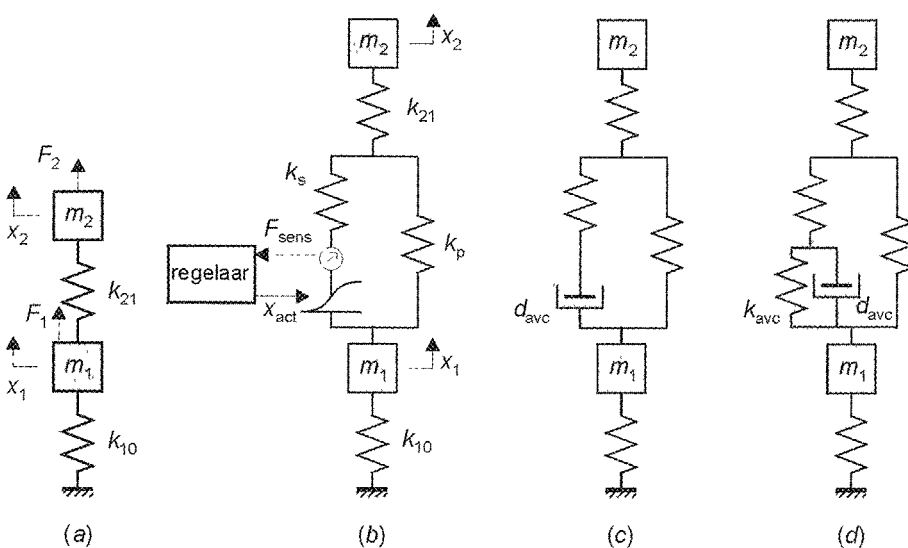
demper nauwelijks effectief is, maar anderzijds mag de stijfheid k_{avc} ook weer niet te klein zijn, omdat daarmee de stijfheid van het hele systeem te veel zal afnemen [7].

Experiment met actieve Smart Lens Supports

De hiervoor beschreven regelstrategie is tegelijk toegepast op elk van de drie Smart Lens Supports in de lensophanging van de wafer stepper. Na zorgvuldig tunen is eenzelfde experiment uitgevoerd als de voorgaande referentie-experimenten. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 10 [2]

Vergelijking van de tijd-domein signalen met de referentie-experimenten (bovenste resultaten in figuur 4, 8 en 10) laat zien dat de joystick-rotatie significant is afgenomen (let op de schaal langs de verticale as). In de PSD van figuur 10 is te zien dat dit enkel en alleen het gevolg is van de toegenomen demping van de joystick modes. De andere trillingsmodes (pendulum modes en torsie van de main plate) worden nauwelijks gedempt.

Uit de cumulatieve PSD kunnen we weer proberen een maat te destilleren voor de amplitude van de joystick rotatie: de 3σ -waarde is afgenomen van $0.43 \mu\text{rad}$ voor de conventionele lens supports, via $0.38 \mu\text{rad}$ voor de passieve SLS's, tot $0.10 \mu\text{rad}$ voor de actieve SLS's. Hiervan komt echter slechts $0.06 \mu\text{rad}$ voor rekening van de joystick modes, zo blijkt uit nadere inspectie van de



Figuur 9 Illustratie van het Smart Disc concept
 a: eenvoudig ongedempt eindimensionaal systeem;
 b: Smart Disc functionaliteit toegevoegd tussen beide massa's;
 c: passief equivalent van een pure integrator in de regelaar;
 d: passief equivalent van een lekken-integrator in de regelaar

cumulative PSD. Wanneer het hele frequentie-gebied in beschouwing wordt genomen, kunnen we dus spreken over een verbetering met een factor 4, maar wanneer we ons slechts beperken tot de echte rotatie die het gevolg is van de joystick mode, dan kunnen we spreken over een verbetering met een factor 7. Wanneer we puur focussen op de relatieve demping van de joystick mode dan kunnen we zelfs spreken over een factor 80, want deze is toegenomen van 0.2%, via 0.5%, tot maar liefst 16%.

De moraal van dit verhaal moge duidelijk zijn: de drie opeenvolgende experimenten tonen aan dat actieve demping een gunstige invloed heeft op het dynamisch gedrag van precisie-apparatuur, maar de precieze waarde ervan is op basis van de beschreven experimenten niet eenduidig bepaald. De werkelijke waarde van actieve demping moet worden gemeten in termen van de uiteindelijke nauwkeurigheid van de afbeelding op de wafer.

Conclusie

De in dit artikel beschreven experimenten hebben laten zien dat het de moeite waard is in het ontwerp van precisie-apparatuur expliciet aandacht te besteden aan de realisatie van voldoende demping. Hoewel dit lokaal onvermijdelijk tot stijfheidsverlies leidt, en daarmee dus in tegenspraak is met het principe om te “construeren op stijfheid”, is aangetoond dat het overall dynamisch gedrag van een machine-frame aanmerkelijk kan verbeter-

ren. Bovendien lijkt, gezien de moeilijkheden om ‘betrouwbare’ passieve dempingsmechanismen in te bouwen (berustend op fenomenen die *niet* de nauwkeurigheid negatief beïnvloeden), *actieve demping* hiervoor een zeer geschikt ‘constructieprincipe’. In dit verband hebben we in dit artikel gewezen op de relatieve eenvoud waarmee actieve demping gerealiseerd kan worden: een actuator en een sensor op één en dezelfde, geschikt gekozen plek in het systeem, en een eenvoudige, robuuste regelstrategie.

Literatuur

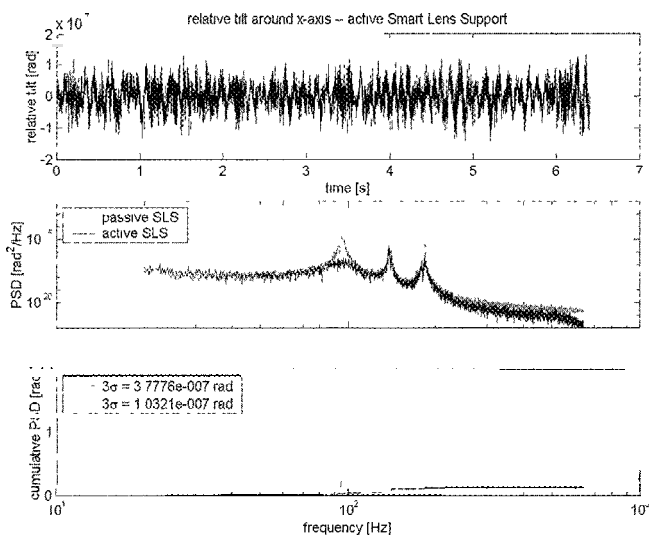
[1] Koster, M.P., (1998), *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren*, 2e druk, Twente University Press, Enschede, ISBN 9036511356.
 [2] Jansen, B.S.H., (2000), *Smart Disc tuning and application*, Afstudeerverslag 016R2000, Vakgroep Regeltechniek, Faculteit der Elektrotechniek, Universiteit Twente, Enschede.
 [3] Preumont, A., (1997), *Vibration Control of Active Structures – An Introduction*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, ISBN 0792343921.
 [4] Holterman, J., T.J.A. de Vries en M.P. Koster, (1999), “Smart Disc – Actieve compensatie van vervorming”, *Mikroniek* nr. 3.
 [5] Holterman, J. en B.G. Tacoma, (2001), *Smart Lens Support – mechanical design*, Rapport 008R2001, Vakgroep Regeltechniek, Faculteit der Elektrotechniek, Universiteit Twente, Enschede.
 [6] Physik Instrumente, <http://www.physikinstrumente.com>
 [7] Holterman, J., (2002), *Vibration Control of High-precision Machines with Active Structural Elements*, Proefschrift, Vakgroep Regeltechniek, Faculteit der Elektrotechniek, Universiteit Twente, Enschede, ISBN 9036517931.

Auteursnoot

Het Smart Disc project is mede mogelijk gemaakt dankzij de financiële ondersteuning door het ministerie van Economische Zaken in het kader van het Innovatiegericht Onderzoeksprogramma ‘Precisietechnologie’, onder de noemer ‘intelligent structurelement’.

Voor meer informatie:

Jan Holterman, Drebbel Instituut voor Mechatronica, Universiteit Twente, Postbus 217, 7500 AE, Enschede. E-mail: j.holterman@utwente.nl.



Figuur 10 Resultaten experiment met actieve Smart Lens Supports