

Piëzo-elektrische Mechatronisch

In tegenstelling tot elektromagnetische aandrijvingen hebben piëzo elektrische-aandrijvingen zich nog nauwelijks een gevestigde positie weten te verwerven in industriële toepassingen van mechatronische systemen. Voor de machinebouw geldt dit nog sterker: daar lijken piëzo elektrische actuatoren nog helemaal taboe te zijn. In feite is de grote doorbraak die al jarenlang verwacht werd, nog steeds uitgebleven, hoewel er wel steeds meer speciale toepassingen komen waarin de piëzoactuator z'n weg naar de industrie vindt.

• G. van Schothorst, M.M.P.A. Vermeulen, G.Z. Angelis¹ •

Waarom blijft de doorbraak van piëzo uit?

Voor zover de piëzoactuator z'n weg heeft gevonden, beperkt zich dat met name tot de high-end toepassingen en een aantal *niche*-applicaties. De vraag is waarom de echte brede doorbraak tot nu toe uitgebleven is. Een aantal mogelijke redenen kan hiervoor genoemd worden.

Allereerst is er de beleving dat de technologie duur is. Een standaard actuator met versterker kost al gauw meer dan vijfduizend euro. Voor high-end toepassingen is dit nog wel acceptabel, maar voor toepassingen in de machinebouw niet. Voor toepassingen in massaproductie daarentegen, zoals sensoren voor de automobiellindustrie, zijn stuksprijzen in de orde van enkele euro's al wel haalbaar. De kosten

van de technologie zijn dan ook niet de beperking voor een doorbraak, maar werken hoogstens remmend.

Een andere factor zou de onbekendheid met de technologie kunnen zijn, en 'onbekend maakt onbemind'... Toch valt hier wel wat op af te dingen. De technologie is al lang niet meer 'nieuw': de eerste toepassingen van piëzoactuatoren zijn al tientallen jaren geleden ontwikkeld, onder meer binnen Philips [1]. Ook zijn er inmiddels veel leveranciers van piëzo-elektrisch materiaal op de markt, en zijn er heel wat congressen met als thema 'piëzoactuatoren' gehouden [2].

¹ Philips Centre for Industrial Technology (CFT), Eindhoven

aandrijvingen in Systeemontwerp

Bovendien vindt op veel technische universiteiten onderzoek rondom piëzo-elektrische toepassingen plaats. Kortom, piëzotechnologie is al voldoende ontwikkeld. Zijn het dan de vele nadelen? Of is het een gebrek aan voordelen? Nadelen zijn er inderdaad te noemen, maar daar hebben enthousiaste onderzoekers en ontwikkelaars in veel gevallen ook al oplossingen voor gevonden, en de voordelen van piëzoactuatoren kunnen ook gemakkelijk worden opgesomd (zie tabel 1).

Stelling

Tegen de geschetste achtergrond lijkt het ontbreken van een doorbraak nog het beste te verklaren met de volgende stelling: "Het toepassen van piëzo-elektrische aandrijvingen is (nog) een mechatronische oplossing." Dit vraagt om systeeminzicht en grondige kennis van de individuele deelstukken. In het vervolg van dit artikel zal dit verder worden uitgewerkt door stil te staan bij een aantal mechatronische overwegingen. Daarna zal nog een tweetal voorbeelden van piëzotechnologie uit de onderzoeksactiviteiten van Philips CFT worden toegelicht, om vervolgens af te sluiten met conclusies.

Actuatorprincipes

Binnen het bereik van piëzo-elektrische aandrijvingen valt een viertal actuatorprincipes te onderscheiden:

- Directe aandrijving, al of niet met mechanische versterking
- Stappende aandrijvingen
- Ultrasonische (US) aandrijvingen, inclusief travelling wave motoren
- Surface Acoustic Wave (SAW) motoren

Afhankelijk van de gewenste toepassing zal uit deze principes een keuze moeten worden gemaakt. Of anders gezegd, elk van deze principes is geschikt voor een bepaald soort toepassing.

Directe aandrijvingen

Bij een directe aandrijving wordt de verplaatsing of rek van het piëzo-elektrisch materiaal direct gebruikt om een verplaatsing of kracht te genereren. Een overzicht van een aantal verschijningsvormen van deze directe aandrijving is gegeven in afbeelding 1. Opvallend voor dit type aandrijving is de beperkte slag; dit maakt met name de dikke actuatoren van het d_{33} type geschikt voor precisie-positionering in de micrometer-sfeer of kleiner, hoewel door stape-

Nadelen	Oplossingen	Voordelen
• Hysterese / kruip	→ Closed loop control	• Zeer hoge resolutie
• Hoog voltage	→ Multi-Layer Actuators	• Grote krachten
• Kleine verplaatsingen	→ Mechanische versterking	• Laag energie-gebruik
• Bros materiaal (keramiek)	→ Voorspanning	• Zelf-rendement
• Trillingsdoorgifte	→ Dynamisch concept	• Vacuüm & cleanroom compatibel
• Warmte-ontwikkeling	→ Tuning, materiaalkeuze	• Compacte bouw
• Niet-lineair gedrag	→ Advanced control, DSA (zie verder in dit artikel)	• Geen magnetische velden

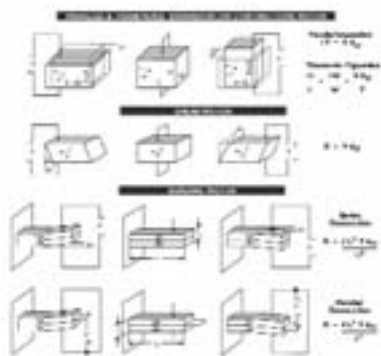
Tabel 1 Samenvatting van voor- en nadelen van piëzo-elektrische aandrijvingen

ling ook slagen tot 200 μm bereikt kunnen worden.

Naast het parallelle (d_{33}) of transverse (d_{31}) effect kan ook het afschuif-effect worden benut. Dit zijn de zogenaamde d_{15} actuatoren; de elektrische spanning (= veldsterkte) wordt dan loodrecht op de polarisatie-richting aangebracht, waardoor het piëzo-kristal een afschuifvervorming vertoont. Met name voor hogere veldsterktes levert dit een hogere efficiëntie op [3].

Tenslotte is er de bimorph actuator, die van het d_{31} effect gebruik maakt, waar de slag vergroot wordt door de transversale rek om te zetten in een buiging van de bimorph. Hoewel het nadeel van deze slagvergroting een kleinere kracht en lagere stijfheid is, worden deze actuatoren toch vrij breed toegepast.

© Piëzo Systems, Inc.



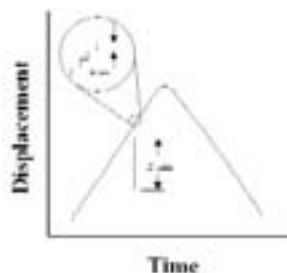
Afbeelding 1.
Verschijningsvormen
van directe piëzo-
aandrijvingen

Stappende aandrijvingen

Wanneer grote slagen nodig zijn (tot tientallen millimeters of zelfs meer), en de gladheid van de beweging minder belangrijk is, zijn stappende piëzo-aandrijvingen een goed alternatief [4], [5], [6]. Deze aandrijvingen kenmerken zich door één of ander overnamemechanisme, zodat de beperkte slag van een aantal piëzoactuators kan worden benut om sequentieel stapjes te maken.

Een belangrijk voordeel van de stappende aandrijvingen is dat ze zelfremmend zijn. Ze zijn voor eenvoudige point-to-pointbewegingen heel geschikt, maar voor mechatronische toepassingen waarin nauwkeurige scannende bewegingen op verschillende snelheden gemaakt moeten worden, is er een aantal nadelen te noemen. Allereerst is dat de gladheid van de beweging: door het overname-principe zal de beweging op micro-schaal altijd een beetje schokkerig zijn (zie ook afbeelding 2). Verder vraagt dit principe om een niet-lineaire aansturing, die het regelen van dit systeem moeilijk maakt. Tenslotte zal deze aandrijving bij het doorlopen van een bepaalde snelheidsrange ook een range van stap-fre-

© EXFO



Afbeelding 2. Schets van verplaatsingskarakteristiek voor stappende piëzo aandrijvingen.

quenties doorlopen. Hiermee worden gemakkelijk resonanties in het systeem aangestoten, wat in ongewenste trillingen resulteert.

Ultrasonische aandrijvingen

Een andere manier om de kleine slag van piëzo's om te zetten in een grote beweging is het ultrasonische principe [7]. Daarbij wordt een elliptische beweging opgewekt door het piëzo elektrische effect te combineren met een tweetal resonante modes (op gelijke frequentie) van een mechanische constructie. Door deze elliptische beweging onder voorspanning tegen een ander deel van de constructie te plaatsen, wordt een lineaire of roterende beweging opgewekt. Een voordeel van dit principe is, dat dankzij de hoge (ultrasonische) frequentie van meer dan 20 kHz geen ongewenste trillingen worden opgewekt. Ook is een groot bereik van snelheden mogelijk van zo'n 1 $\mu\text{m/s}$ tot 100 mm/s. Toch blijft het ook hier moeilijk om gladde bewegingen te realiseren, met name voor de lage snelheden. Daarnaast vraagt de aansturing speciale elektronica en zijn voor goed servogedrag geavanceerde regelingen nodig. Dit neemt niet weg dat dit type aandrijving al wel z'n industriële toepassingen kent.

Surface Acoustic Wave aandrijvingen

De opgewekte elliptische beweging bij ultrasonische aandrijvingen is ook het kenmerkende bewegingsmechanisme van Surface Acoustic Wave (SAW) aandrijvingen [8], [9]. Daarbij wordt de elliptische beweging gegenereerd in het oppervlak van een lichaam (de stator) door zich voortplantende Rayleigh golven. Een slider die op de toppen van de golven draagt, wordt door de elliptische beweging in een bepaalde richting voortbewogen. De golven worden opgewekt door piëzo's met vingervormige electrodes aan de randen van de lokaal gepolariseerde stator. De aandrijffrequentie is in de orde van 1 tot 10 MHz, en de golf amplitude bedraagt ca. 20 tot 40 nm, wat afhangt van de opgedrongen spanningsamplitude. Vanwege de kleine amplitudes zijn zeer gladde bewegingen mogelijk, met een snelheidsbereik van 1 $\mu\text{m/s}$

tot 1 m/s. De aandrijfkraft hangt af van de voorspankracht en de wrijvingscoëfficiënt, en is in de orde van 1 tot 10 N per cm² slider oppervlak.

Mechanisch ontwerp

Als afhankelijk van de toepassing het juiste piëzo-elektrische aandrijfprincipe eenmaal gekozen is, zal het mechanisch ontwerp plaatsvinden. Hierbij zullen de volgende overwegingen een rol moeten spelen:

- Op basis van gewenste stijfheid (Youngs modulus) en piëzo-elektrische ladingsconstantes moet een materiaalkeuze worden gemaakt; ofwel op kunststof folie gebaseerd (PVDF), ofwel op keramiek gebaseerd (PZT). In de laatste categorie kan nog weer tussen harde en zachte materialen gekozen worden, waarbij zachte materialen typisch meer damping vertonen; dit kan van belang zijn voor de thermische balans.
- Als hoge voltages niet toelaatbaar zijn, zullen typisch multi-layeractuatoren toegepast moeten worden. Ook op piëzo-fibers gebaseerde actuatoren kunnen soms uitkomst bieden [10], bijvoorbeeld bij toepassing op gekromde oppervlakken.
- De benodigde afmetingen van het piëzomateriaal zijn zeer afhankelijk van het aandrijfprincipe. Per geval zullen de dimensies afgestemd moeten worden op de gewenste slag, draagkracht, buigend moment (bij d_{31} toepassingen), actuatorstijfheid, enzovoort.
- Bij wisselende belastingen in verschillende richtingen moet het brosse keramische materiaal behoed worden voor trekspanningen. Daarom wordt meestal voorzien in flexibele ontkoppelingen en een voorspanconstructie, zoals bijvoorbeeld weergegeven in afbeelding 3. Hoewel principieel correct, lijkt deze voorspanconstructie vaak overgedimensioneerd. Dit gaat ten koste van de effectiviteit van de piëzoactuator.
- Om de slag te vergroten kan een mechanische versterking ('hefboommechanisme') worden toegepast. Hierbij moet wel worden bedacht dat de kracht lineair en de stijfheid van de aandrijving kwadratisch met de overbrengverhouding daalt!



Afbeelding 3. Voorspanconstructie voor Smart Disc prototype van de Universiteit Twente

- In dynamische toepassingen waarbij snelle nauwkeurige bewegingen gevraagd worden, is het ook van belang de eigenfrequentie van de actuator voldoende hoog te ontwerpen. Veelal wordt de actuator dan als stijfheid (c) gezien, en het te positioneren onderdeel als massa (m), waarbij de eigenfrequentie afgeschat wordt met de formule: $\omega = \sqrt{c/m}$. In veel gevallen zal echter de constructie zelf meer slappe toevoegen dan de actuator, en zal een meer gedetailleerde dynamische analyse van het totaalstelsel gemaakt moeten worden om goede voorspellingen van de performance te kunnen doen.

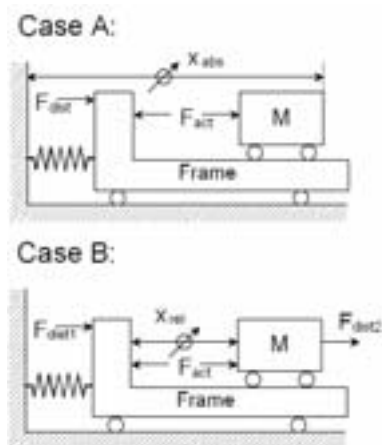
Dynamische concepten

Met betrekking tot de karakterisering van het dynamisch gedrag van een piëzo-aangedreven systeem bestaat soms onduidelijkheid over hoe een piëzoactuator gemodelleerd moet worden: als positieactuator of als krachtactuator? Dit in tegenstelling tot een Lorentzactuator, die zich ideaal gezien gedraagt als een krachtactuator met nul stijfheid. In dit opzicht kan afbeelding 4 duidelijkheid verschaffen: de afbeelding toont twee volledig equivalente dynamische modellen van een piëzoactuator. Links wordt het systeem gemodelleerd door een ideale positieactuator in serie met een veer, die de interne slappe van de actuator representeert. Rechts is een model gegeven waarin de gegenereerde kracht parallel aan de veer evenredig is met het ingangssignaal van de piëzoactuator. Uitschrijven van de (bewegings)vergelijkingen van beide modellen toont aan dat deze inderdaad gelijk zijn.

Op basis van dit inzicht kan voor een mechatronische toepassing een juiste keuze gemaakt worden tussen een piëzo- en een Lorentzaandrijving; een piëzoactuator 'is' immers een Lorentzactuator parallel aan een stijve veer... Een tweetal voorbeelden zoals gegeven in afbeelding 5 illustreert dit. In Case A is een situatie gegeven waarin een massa M ten opzichte van een frame wordt aangedreven, waarbij de massa M absoluut gepositioneerd moet worden ten opzichte van een vaste referentie. Aannemende dat verstoringen in dit systeem zich manifesteren als stoorkrachten op het frame, is het gewenst dat de actuator een zo laag mogelijke inherente stijfheid heeft, om zo het doorgeven van trillingen te voorkomen. Een Lorentzactuator is hier dus dynamisch gezien beter. In Case B echter, wordt een relatieve positionering ten opzichte van het frame gevraagd. Zowel



Afbeelding 4. Dynamische equivalentie van piëzo als positie- danwel als krachtactuator



Afbeelding 5. Dynamische machine concepten. Case A: absolute positionering bij voorkeur met Lorentzactuator. Case B: relatieve positionering bij voorkeur met piëzoactuator

voor stoorkrachten op het frame als voor stoorkrachten op de massa is een inherente stijfheid van de actuator voordelig, en komt juist een piëzoactuator in aanmerking.

Andere mechatronische overwegingen

Thermische effecten

Vanwege het capacitef karakter van een piëzoactuator is de warmtegeneratie door elektrische verliezen evenredig met de frequentie en kwadratisch met de amplitude van het aanstuuringsignaal (voor sinusvormige aansturing). Daarom moet bij hoogfrequente toepassingen (> 1 kHz), zeker bij multilayer actuatoren die extra mechanische verliezen vertonen vanwege de hogere demping, nadrukkelijk nagedacht worden over de warmtehuishouding. Eventueel kan bij een goed thermisch ontwerp de behuizing benut worden voor warmteoverdracht. Overigens is een voordeel van piëzo-aandrijvingen boven elektromagnetische aandrijvingen, dat er geen energiedissipatie plaatsvindt bij het leveren van een constante kracht bij stilstand.

Versterkerkeuze

In de keuze of het ontwerp van een versterker voor een piëzoaandrijving speelt het capacitef karakter van de actuator ook een dominante rol. Grote actuatoren met grote capaciteiten ($> 10 \mu\text{F}$) die bij hoge frequenties opereren, vragen een hoog vermogen. Vanwege het grote reactief vermogen is in sommige gevallen een schakelende voeding te prefereren boven een lineaire, om zo warmteontwikkeling te beperken. Tenslotte zal bij nauwkeurige positionersystemen aandacht besteed moeten worden aan het ruisniveau van de versterker; niet alleen in termen van RMS niveaus maar ook in termen van frequentiespectra: in het frequentiegebied waar het systeem dynamisch gevoelig is moet het ruisniveau klein zijn.

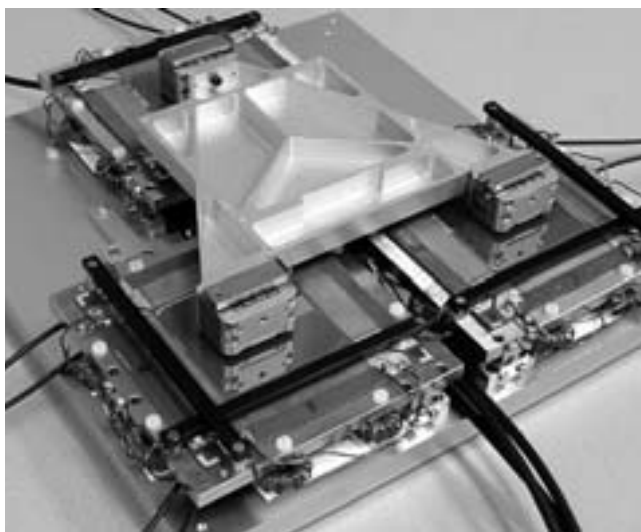
Regelaarontwerp

In veel gevallen zal de prestatie van het piëzo-aangedreven mechatronische systeem bepaald worden door de regeltechniek. Daarbij is het aandrijfprincipe van grote invloed op de benodigde regeltechnische oplossing. Stappende, ultrasone en SAW-aandrijvingen vragen een speciale besturing, waarna veelal met PID-regelaars kan worden volstaan, eventueel aangevuld met snelheids- en versnellingsfeedforward. Voor actieve trillingsdemping is een PID-regelaar echter minder geschikt, en worden principieel andere regelaartypes toegepast, zoals bijvoorbeeld Integral Force Feedback-controllers [11], [12]. Zoals bekend in de regeltechniek, geldt ook hier dat het in kaart brengen en begrijpen van zowel de (niet-lineaire) systeemdynamica alsook de verschillende verstoringen in de keten, essentieel is om tot een goed regelaarontwerp te komen.

Toepassing I:

Surface Acoustic Wave motor – een update

In Mikroniek nr. 6, jaargang 42 is een artikel verschenen [9] dat de ontwikkeling van SAW motoren beschrijft, zoals deze plaatsvindt bij Philips CFT en op de Universiteit Twente (UT) in de vorm van een IOP project. Op de UT wordt met name gewerkt aan de modelvorming van het contactverschijnsel tussen stator en slider, en worden deze modellen getoetst aan de praktijk. Philips CFT richt zich vooral op het ontwerpen en realiseren van prototypes lineaire en planaire aandrijvingen die middels een closed loop-regeling worden aangedreven. Het onderstaande is een beschrijving van dit laatste onderwerp.



Afbeelding 6. Planaire SAW motor prototype I

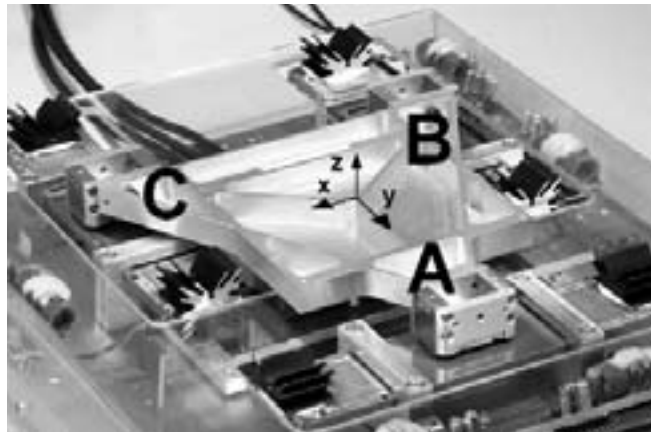
Wrijvingsgedrag onder invloed van aansturing

Bij een onbekrachtigde SAW motor zorgt de voorspanning tussen slider en stator voor een hoge contactstijfheid, resulterend in zelfremmendheid. Zodra echter een grotere kracht dan de houdkracht wordt aangebracht, gaat de motor slippen en wordt droge wrijving ervaren. Hiermee samenhangend vertoont deze aandrijving van zichzelf een dode band in de snelheids-karakteristiek: bij verticale golfamplitudes kleiner dan de Hertz contact indrukking en de ruwheid van de stator, vindt geen beweging plaats bij eeningangssignaal ongelijk aan nul. Zoals in de eerdere bijdrage beschreven, is ter voorkoming van deze dode band een alternatieve aandrijving bedacht en gepatenteerd, 'Dual Side Actuation' (DSA) genoemd. Hierdoor kan de verticale component van de elliptische beweging onafhankelijk van de horizontale component worden geregeld. Door nu een relatief grote verticale component te handhaven, ook bij een kleine horizontale component (dus lage snelheid), gedraagt de motor zich macroscopisch als een viskeuze demper in plaats van als stijfheid (stilstand) of wrijving (beweging). Experimenten hebben aangetoond dat deze demper-eigenschap optreedt voor zowel lopende als staande golven met voldoende grote verticale component. Dit verschijnsel zal, zoals uit het volgende blijkt, het ontwerp van een planaire aandrijving beïnvloeden.

Planaire SAW motor prototype 1

In afbeelding 6 is de eerder ontwikkelde planaire SAW-motor [9] getoond. Bij dit concept wordt een carrier in het horizontale vlak in drie graden van vrijheid geregeld: twee translaties (x en y) en de rotatie om de verticale as (R_z). Hiervoor is de carrier voorzien van drie sliders, die individueel kunnen worden aangedreven in x - en y -richting. De positie van de carrier (x , y , en R_z) wordt middels een planaire encoder gemeten en teruggekoppeld naar de regelaar. Met dit eerste prototype is onder meer aangetoond dat het mogelijk is een planaire Rayleigh-wave te genereren die is samengesteld uit twee interefererende golven, waarvan de voortplantingssnelheid loodrecht op elkaar staat (x - en y -richting). De richting van de samengestelde golf wordt bepaald door de amplitudeverhouding van de individuele golven. Op deze manier kan een slider in een willekeurige richting worden aangedreven.

In dit concept zijn *twaalf* piezoactuatoren nodig, elk voorzien van elektronische matching en elk aangestuurd door een versterker. De vraag is nu of het mogelijk is deze carrier aan te drijven met een kleiner aantal actuatoren en versterkers, waardoor een simpeler en goedkopere planaire aandrijving ontstaat.



Afbeelding 7. Planaire SAW-motor prototype 2

Planaire SAW motor prototype 2

Stel dat we de carrier van de planaire motor voortbewegen door elk van de drie sliders slechts in één richting aan te drijven. Je zou dan kunnen volstaan met drie lineaire motoren (A, B, en C), zoals te zien in afbeelding 7. Als de carrier bijvoorbeeld in y -richting moet worden bewogen, worden de sliders van de motoren B en C aangedreven. Daarbij zou slider A over de stator moeten glijden, wat gepaard gaat met een hoge statische wrijvingskracht. In de praktijk zijn de sliders van de motoren B en C niet in staat deze wrijvingskracht te leveren. Echter, door een staande golf op te wekken in actuator A met de DSA-techniek, verandert het gedrag van de slider A bij het bewegen in y -richting in dat van een demper in plaats van een wrijvingskracht. Het is zelfs mogelijk de slider te bewegen in een *willekeurige* richting, zonder dat daarbij wrijving optreedt. Op deze manier van wrijving opheffen is patent aangevraagd.

Er hoeft nu slechts een demperkracht te worden overwonnen, welke de maximaal haalbare snelheid bepaalt. Met experimenten met het prototype van de planaire motor zoals weergegeven in afbeelding 7, is de haalbaarheid van dit aandrijfconcept geverifieerd; een eenvoudiger en goedkopere aandrijving blijkt mogelijk!

Toepassing 2: Active Structural Acoustic Control

De prestatie en het comfort dat geëist wordt van moderne machines voor precisietoepassingen neemt doorlopend en versneld toe. Denk hierbij aan machines als lithografische projectoren, MRI-scanners, DVD-recorders enzovoort. Vanuit dynamisch oogpunt gezien vormt ongewenst trilgedrag vaak een beperking van de prestatie van een apparaat. Zo kunnen trillingen in de constructie van een lithografi-

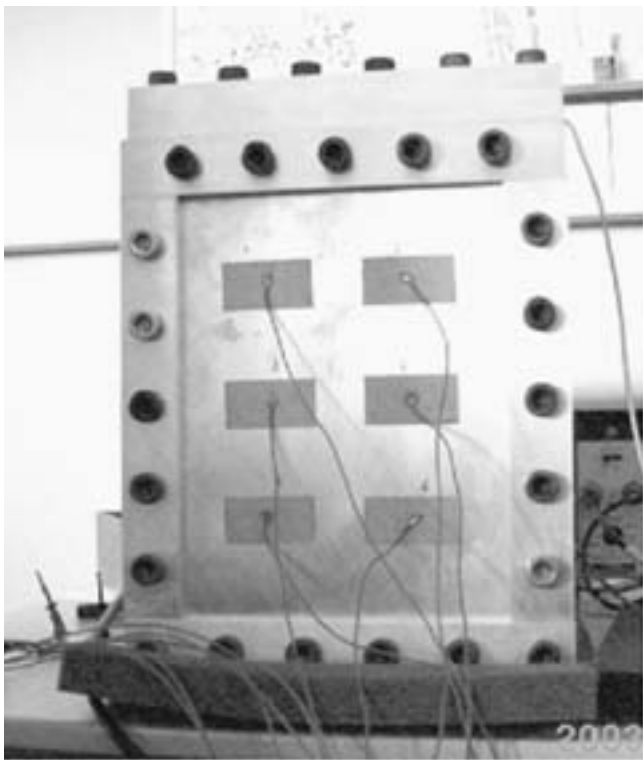
sche projector een verschoven en vaag geprojecteerd beeld veroorzaken. In een MRI scanner kan een door de scanse-quentie geëxciteerde trillende constructie via geluidsafstraling een onacceptabel geluidsniveau opleveren.

Naast het statisch bepaald en op massa en stijfheid construeren speelt in bovenstaande voorbeelden het introduceren van voldoende structurele demping in de constructie een belangrijke rol. Naast het in de constructie opnemen van passieve dempende elementen, is het introduceren van actieve demping een flexibel en veelbelovend alternatief. Daarbij wordt regeltechnische demping geïntroduceerd door op de constructie geplaatste (piëzo)actuators, welke worden aangestuurd met signalen afkomstig van (piëzo)sensoren op diezelfde constructie.

Actieve demping middels piëzoactuators en -sensoren is één van de onderzoeksactiviteiten van Philips CFT, waarbij verschillende testopstellingen zijn ontworpen en gerealiseerd.

Voorspellend modelleren

In de eerste fase van het ontwerp zal de haalbaarheid van de geëiste prestatie voorspeld en gekwantificeerd worden. Om geschikte locaties, benodigde aantallen en afmetingen van piëzoactuators en sensoren te kunnen bepalen, zal via voorspellende modellering onderzocht moeten worden wat de invloed zal zijn van het plaatsen van de actuators en sensoren



Afbeelding 8. Active Structural Acoustic Control setup

met de bijbehorende regeltechniek op de structuurdynamica. Onderwerp van studie zijn hierbij het voorspellen van modale of operationele trilvormen van de structuur alsook de invloed die de piëzoactuators op deze trilvormen kunnen uitoefenen (regelbaarheid) en de mate waarin de trilvormen door de sensoren waargenomen kunnen worden (observeerbaarheid). In het geval van comfort-verhogende geluidsreductie kan het belangrijk zijn om ook de geluids-afstraal-modes met bijbehorende geluids-afstraal-efficiëntie te berekenen.

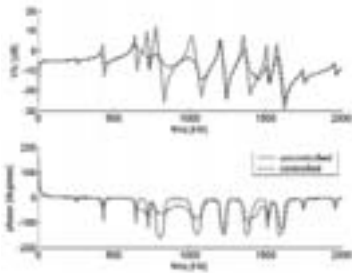
Binnen Philips CFT is een aantal procedures in ontwikkeling waarmee op basis van genoemde overwegingen (regelbaarheid, waarneembaarheid, geluidsafstraling) tot een geschikt plaatsingsontwerp voor de piëzosensoren en -actuators gekomen kan worden. Naast mechanisch-elektrische modellering via Eindige Elementen Modelling (EEM) gebaseerd op CAD geometrie is een experimentele modale of operationele trillingsanalyse van het systeem hierbij een goed uitgangspunt, omdat daarmee modelonzekerheden uitgesloten kunnen worden.

Op dit moment is een testopstelling gerealiseerd waarmee het voorspellend modelleren uitgebreid getest wordt (zie afbeelding 8). Een flexibele aluminium plaat, A4 formaat 1 [mm] dik, aan vier zijden ingeklemd als deksel van een rigide doos, is voorzien van twaalf piëzo's (23 [mm] bij 45 [mm] en 0.3 [mm] dik), zes aan iedere kant van de plaat, symmetrisch en equidistant geplaatst in een raster. Validerende experimenten hebben aangetoond dat het mogelijk is de invloed van de piëzo's op de structuurdynamica voldoende nauwkeurig te voorspellen.

Regelaarontwerp

Het regelaarontwerp heeft tot doel demping te introduceren in dominant optredende trillingsvormen van het systeem. Afhankelijk van de applicatie, betekent dit demping introduceren in een smalle frequentieband in het geval dat slechts één of enkele trillingsvormen de prestatie beperken, of in het geval waar geluidsreductie beoogd wordt in een brede frequentieband, bijvoorbeeld van 200 Hz tot 4 kHz. Daarbij moet de regelkring robuust zijn, dat wil zeggen dat onzekerheden of systeemvariëaties niet mogen leiden tot instabiliteit van de regelkring. Het onderzoek richt zich daarom op frequentieresponsie gebaseerde regelstrategieën, omdat modelgebaseerde regelstrategieën gevoeliger zijn voor modelonzekerheden en daarmee samenhangende stabiliteitsproblemen [12]. Er zijn ook relatief goedkope en gemakkelijk in te stellen analoge regelaars (filters) ontwikkeld, waarmee tot 4 kHz voldoende demping gerealiseerd kan worden, dit in tegenstelling tot digitale regelaars, die door de sample-rate beperkt worden.

In bovengenoemde testopstelling is geëxperimenteerd met verschillende regelstrategieën waarmee actieve demping verkregen kan worden. In het gebied tussen de 250 en 1939



Afbeelding 9. Frequentie responsie meting van één piëzoactuator naar één piëzo sensor (co-located) in Active Structural Acoustic Control setup

[Hz] doen zich elf vrijwel ongedempte structurele flexibele trillingsvormen van het systeem voor. Met het sluiten van één regellus met slechts één vierde orde filter blijkt het mogelijk om vrijwel iedere modus in enige mate (gemiddeld 6.4 dB) te dempen (zie afbeelding 9). De piekwaarde in de frequentie responsie tot 2 kHz, een belangrijke maat voor geluidsreductie, is gereduceerd met 9.1 dB. Verder is een geluidsreductie gemeten in het verre veld van 5 dB bij een witte ruis aanstoting tot 1 kHz. Door het sluiten van meerdere regellussen of door te focussen op slechts enkele trillingsvormen zal de trillingsreductie zelfs nog verder verhoogd kunnen worden.

Conclusie

Gezien het brede scala aan overwegingen dat in dit artikel aan bod is gekomen, kan concluderend worden gesteld dat een succesvolle toepassing van piëzoaandrijvingen een voluit mechatronische benadering vraagt. Dit maakt dat standaard toepassing van piëzoaandrijvingen in bijvoorbeeld de machinebouw (nog) niet aan de orde is. De verwachting is dan ook dat piëzoactuatoren de mechatronische wereld niet revolutionair zullen veroveren, maar dat er meer sprake zal zijn van een evolutionaire ontwikkeling waarin piëzoactuatoren meer en meer hun toepassingen zullen vinden. Vooral nog zullen toepassingen zich echter beperken tot *niches* en de high-end markt, wat met een tweetal voorbeelden is geïllustreerd.

Literatuur

- 1] J.W. Waanders, *Piëzo-electric Ceramics: Theory and Applications*, 1997.
- 2] ACTUATOR (www.actuator.de), SPIE Conference on Smart Structures and Materials (www.spie.org/Conferences/Programs/04/ss)
- 3] K.D. Muller, "Nanometer Precision at Millimeter Stroke with Piëzoelectric Actuators", Reader Mikrocentrum Themadag "Piëzo als actuator", 30 oktober 2003
- 4] See www.exfo.com, www.piezomotor.se
- 5] M.P. Koster, A. Visscher, *Een Lineaire Piëzo Motor*, Mikroniek 33 Nr. 6, 1993
- 6] M. Versteyhe, D. Reynaerts, H. Van Brussel, Piëzo-stapper met submicron nauwkeurigheid, Mikroniek 38 Nr. 6, 1998
- 7] See www.nanomotion.com, www.cedrat.com, www.physikinstrumente.de
- 8] M.K. Kurosawa, *State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications*, Elsevier, Ultrasonics 38, pp. 15-19, 2000
- 9] M.M.P.A. Vermeulen, F.G.P. Peeters, H.M.J. Soemers, P.J. Feenstra, P.C. Breedveld, *Ontwikkeling van een Surface Acoustic Wave Planaire Motor in Closed Loop Regeling*, Mikroniek 42 Nr. 6, 2002
- 10] P. Daue, *Piëzokomposite für adaptive Strukturen – Stand der kommerziellen Entwicklung*, Proc. Adaptronik Congress, Wolfsburg, Germany 2003
- 11] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures – An Introduction*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1997
- 12] A. den Hamer, G.Z. Angelis, N.B. Roozen, R. v.d. Molengraft, *Broad-band Active Vibration Suppression*, 23rd Benelux Meeting on Systems and Control, Helvoirt, 17 - 19 maart 2004

Advertentie

Advertentie