

Een lineaire piëzomotor

M.P. Koster, A. Visscher

Inleiding

Het piëzo-elektrisch effect is in 1880 door Pierre en Jacques Curie ontdekt. Het effect hangt samen met de relatie tussen de elastische deformatie van een niet-geleidende vaste stof en de elektrische veldsterkte in de richting van deze vervorming. Voor het bereiken van praktisch bruikbare verplaatsingen moet er worden gewerkt met hoge veldsterkten. Die kunnen niet alleen worden verkregen door een hoge spanning aan te leggen tussen de elektroden, maar ook door de dikte van de isolerende laag tussen de elektroden sterk te verkleinen. Dat laatste kan worden bereikt door de meerlaags-technologie toe te passen die afkomstig is uit het fabricageproces voor keramische condensatoren [1]. Deze technologie maakt het mogelijk de benodigde spanningen te verminderen van 800 V – een gebruikelijke waarde voor gangbare piëzo-elektrische actuatoren – tot 60 V voor zgn. CMA's (CMA: Ceramic Multilayer Actuator), bij vergelijkbare afmetingen en verplaatsingen.

In het volgende zullen we een lineaire piëzomotor (LPM) beschrijven die zijn aandrijving ontleent aan de nieuwe CMA's en die berust op een soort wandelmechanisme. Het principe van een "wandelende piezo-motor" is niet nieuw [2]. Dat is wel het geval met de hier beschreven combinatie van dit principe met een mechanisch versterkingsmechanisme [3], met het doel de prestaties van de piezo-elektrische actuatoren zo te beïnvloeden dat een verhoudingsgewijs hoge wandelsnelheid wordt verkregen.

Het wandelmechanisme vereist ook een klemconstructie, die op de gebruikelijke manier rondom een staaf aangrijpt. In tegenstelling tot de gangbare klemmechanieken [2] is de door ons ontworpen constructie niet erg gevoelig voor variaties in de staafdikte, met

het voordeel dat de motor vrij ongevoelig is voor slijtage.

De draaipunten in ons mechanisme zijn van het elastische type. Als zulke draaipunten goed worden ontworpen, hebben ze het voordeel dat ze relatief soepel zijn voor de gewenste rotatie, maar spelingsvrij en verhoudingsgewijs stijf voor de overige vrijheidsgraden [4,5].

De piëzo-actuator

Figuur 1 toont de meerlaags-piëzo-actuator (CMA). Deze is opgebouwd uit het bekende piëzo-elektrische keramische materiaal, bestaande uit een mengsel van lood-zirkonaat en -titaanaat [1]. De relatie tussen de elektrische veldsterkte en de mechanische vervorming, die kenmerkend is voor het piëzo-elektrisch effect, kan men uitdrukken door:

$$\epsilon_{33} = \sigma_{33}/E + d_{33} \cdot V_{33} \quad (1)$$

Daarin stelt ϵ_{33} de rek in het materiaal voor in de richting van het elektrisch veld en σ_{33} de mechanische spanning in dezelfde richting. E is de elasticiteitsmodulus van het keramische materiaal, eveneens in de richting van het elektrisch veld, en d_{33} stelt de rek in dezelfde richting voor, maar dan per eenheid van veldsterkte. V_{33} is de aangelegde veldsterkte in de richting van de 3-coördinaat.

Hoe hoger de veldsterkte V_{33} is, des te sterker is het piëzo-elektrische effect, zich manifesterend als verlenging ϵ_{33} bij constante spanning σ_{33} , of als uitgeoefende belasting σ_{33} bij constante

rek ϵ_{33} . Bij de traditionele actuatoren wordt een hoge veldsterkte verkregen door het aanleggen van hoge spanningen: ongeveer 1000 V. Dankzij de meerlaagstechnologie is het mogelijk de dikte van het keramische materiaal te reduceren tot slechts 20 tot 40 μm . Daardoor kunnen nu veldsterkten V_{33} van 1 kV/mm worden gerealiseerd bij een aangelegde spanning van niet meer dan ongeveer 50 V [1]. Het gewenste piëzo-elektrisch effect is nu dus bereikt bij een veel lagere spanning.

Figuur 1 laat ook zien dat de lagen in de actuator zijn gestapeld loodrecht op de richting van de 3-coördinaat, zodat dit ook de richting is van het veld V_{33} . Vanwege het fabricageproces is de totale stapelhoogte beperkt tot circa 2 mm. Daarom wordt in dit geval gebruik gemaakt van de verplaatsing in de langsrichting volgens de 1-coördinaat. In die richting is echter de rek per eenheid van veldsterkte in de 3-richting – d_{31} – slechts half zo groot als d_{33} , wat het gevolg is van de dwarscontractie, waarvoor de constante van Poisson ν maatgevend is. Deze is voor het toegepaste keramische materiaal ongeveer gelijk aan 0,5. Er wordt een verhoudingsgewijs grote verlenging verkregen, omdat de afmeting ℓ van de actuator in de richting van de 1-coördinaat groot is.

Uit formule (1) kunnen we afleiden dat de verlenging van de d_{31} -actuator gelijk is aan

$$h = \epsilon_{31} \ell \quad (2)$$

bij constante belasting, waarbij

$$\epsilon_{31} = d_{31} \cdot V_{33} \quad (3)$$

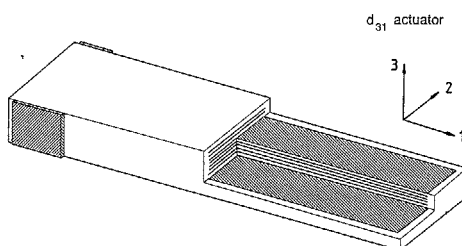
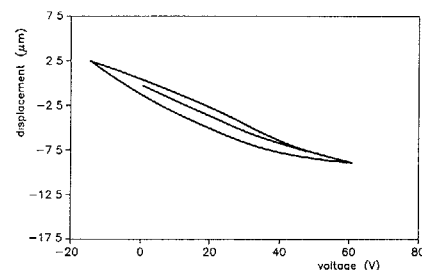


Fig. 1. Een piëzo-keramische meerlaags-actuator (CMA).



Figuur 2. Het gedrag van een CMA in de d_{31} -mode.

gelijk is aan de rek veroorzaakt door het piezo-elektrisch effect. De stijfheid van de actuator is gelijk aan $c_1 = EA/\ell$, met A de oppervlakte van de doorsnede.

Figuur 2 laat het gedrag zien van een CMA met een lengte van ongeveer 20 mm en een stapelhoogte van 2 mm. Opgemerkt moet worden dat bij het ontwerpen de thermische effecten niet onderschat mogen worden, aangezien de actuator ook functioneert als condensator met aanzienlijke capaciteit. Snelle bewegingen veroorzaken daarom relatief grote stromen, die op hun beurt – door de niet te verwaarlozen waarde van de verliesfactor $\tan \delta$ van het materiaal – warmte opwekken. De toelaatbare temperatuur van het materiaal stelt een limiet aan de frequentie van de voedingspanning bij de maximum amplitude van de verlenging.

Het wandelmechanisme

Het wandelmechanisme is schematisch afgebeeld in figuur 3. Daarin stellen wp de actuatoren voor die de wan-

delbeweging voor hun rekening nemen door beurtelings uit te zetten en te krimpen in de richting x van de wandelbeweging. Met cp zijn de actuatoren voor het klemmen aangeduid. Zij worden beurtelings groter en kleiner in de y-richting, loodrecht op de wandelbeweging. Daarmee wordt afwisselend deel A of deel B van de motor vastgeklemd aan de omgeving. De uitgangsbeweging wordt afgeleid van het middeledeel C.

Figuur 4 toont een complete cyclus van de verschillende actuatoren, waarbij t_c de tijd voorstelt die nodig is voor het volbrengen van een volledige cyclus. Deel C bereikt een constante snelheid indien de tijd t_{ch} voor het omstellen van het klemmen van A naar B of vice-versa, valt binnen het tijdsinterval tussen piek en dal van de bewegingspatronen van de actuatoren wpA en wpB. Dientengevolge kan niet de maximaal haalbare slag \hat{h} van de actuatoren wp worden gebruikt. De werkelijke slag is $h = \eta_t \hat{h}$ met $\eta_t = (t_c - 2t_{ch})/t_c$.

Mechanische versterking

Wij hebben mechanische versterking toegepast om de karakteristieken van de actuatoren aan te passen aan de gewenste eigenschappen van de motor. De belangrijkste eisen waaraan wij een prototype van de LPM willen laten voldoen, zijn een zo hoog mogelijke snelheid en een klemstijfheid die is afge-

stemd op de gewenste bewegingsnauwkeurigheid.

Een en ander zullen we aan de hand van figuur 5 toelichten. In figuur 5a stelt 4 het deel voor dat de uitgangsbeweging verzorgt. De overbrengingsverhouding van hefboom 2,3 is gelijk aan $i = b/a$.

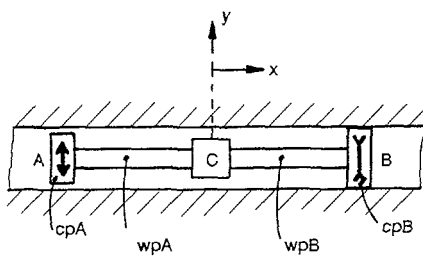
In figuur 5b stelt $h(t)$ de verplaatsingsfunctie aan de ingang voor. Deze wordt bepaald door de spanning die wordt aangelegd aan de elektroden van de actuator. In het geval van een ideaal, oneindig stijf mechanisme zou de uitgaande slag gelijk zijn aan $x = i\eta_t h$,

waarin h de slag van de actuator voorstelt.

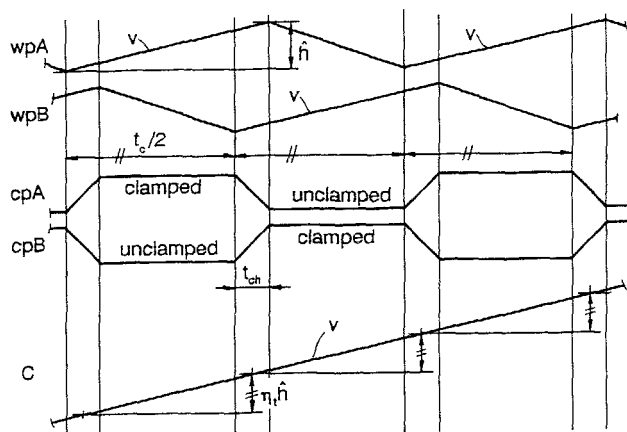
Het dynamisch model van figuur 5b kan worden getransformeerd in een model waarin alle parameters een functie zijn van de uitgangskoördinaat x en waarin de hefboom niet meer voorkomt. Met behulp van dit model kunnen formules voor de wandelsnelheid en de stijfheid worden afgeleid, zie kader. Uit deze formules blijkt onder andere dat de keuze van de overbrengingsverhouding i van de hefboom bepalend is voor de afweging van snelheid tegen stijfheid.

De klemconstructie

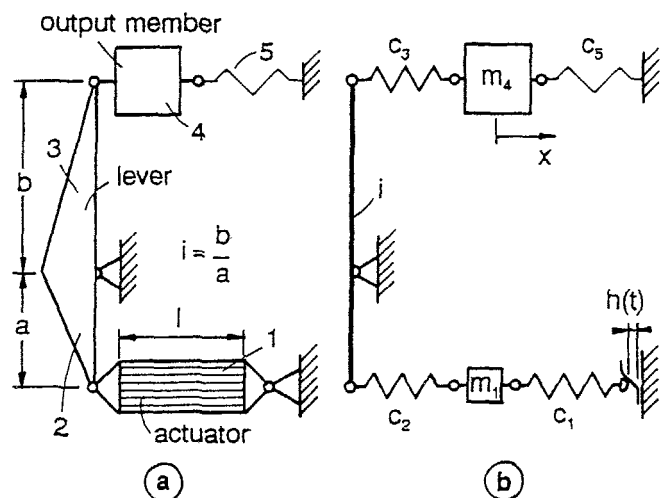
Het principe van de klemconstructie is dat er bij het wisselen van het klemmen van deel A naar B en andersom in ieder geval steeds één van beide klemmen



Figuur 3. Het principe van een wandelmechanisme.



Figuur 4 (boven). De volgorde der bewegingen.



Figuur 5 (rechts). Mechanische versterking.

Een lineaire piëzomotor

Afleiding formules voor wandelsnelheid en stijfheid met behulp van getransformeerd model

In het getransformeerde model, zie figuur, stelt $c_a = c_1/h^2$ de stijfheid van de actuator voor. De stijfheden van de hefboom worden vertegenwoordigd door c_2/h^2 en c_3 , wat samen c_s oplevert volgens

$$1/c_s = 1^2/c_2 + 1/c_3 \quad (9)$$

Deel m_4 voor de uitgaande beweging is niet geheel vrij van zijn omgeving. De bijbehorende stijfheid c_x is parallel geschakeld aan het eigenlijke mechanisme:

$$c_x = c_s \quad (10)$$

De quasistatische beweging van het uitgangdeel volgens (8) kan nu worden geschreven als

$$x = \eta_p \eta_m \eta_i h \quad (11)$$

met

$$\eta_m = 1/(1 + (c_p/c_a)(1 + c_x/c_s)) \quad (12)$$

De stijfheid van het mechanisme gemeten aan de uitgang is gelijk aan

$$c_x = c_a c_s / (c_a + c_s) + c_p \quad (13)$$

Als de actuator het enige elastische deel in het mechanisme zou zijn, zou de stijfheid van het geheel gelijk zijn aan $c_x = c_a = c_1/h^2$. Echter

$$c_x = \eta_c S_a \quad (14)$$

met

$$\eta_c = 1/((c_a/c_s) + 1) + c_p/c_a \quad (15)$$

Massa m_4 in figuur 5 stelt de bewegende massa van het mechanisme voor. $m_4 = m_x$. In het geval dat de actuator alleen zijn eigen massa m_1 in beweging zou moeten brengen, zou – betrokken op de uitgangskoördinaat – de bewegende massa gelijk zijn aan $m_1 h^2 = m_a$.

De bewegende massa kan ook worden uitgedrukt als

$$m_x = \eta_m m_a \quad (16)$$

met $\eta_m \gg 1$.

Om de amplitude te kunnen beheersen moet de wandelfrequentie f ruim onder de laagste eigenfrequentie f_c van het mechanisme blijven:

$$f = \eta_f f_c \quad (17)$$

met $\eta_f < 1$. De laagste eigenfrequentie is gelijk aan

$$f_c = (1/2\pi) \sqrt{(c_x/m_x)} \text{ [Hz]} \quad (18)$$

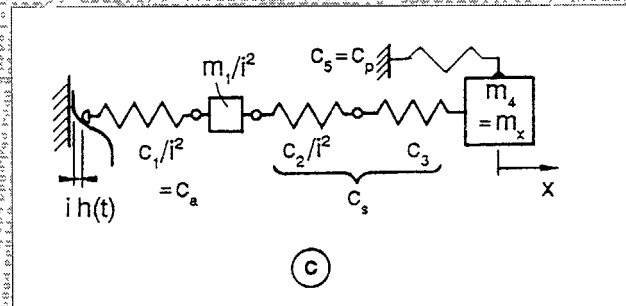
Met behulp van (14), (16) en (21), en met $c_a = c_1/h^2$ en $m_a = m_1/h^2$ kan de wandelfrequentie worden uitgedrukt als

$$f = (\eta_f/2\pi) \sqrt{(\eta_c/\eta_m)} \sqrt{(E/p)} (1/\ell) \quad (19)$$

aangezien de stijfheid van de actuator volgens (4) gelijk is aan EA/ℓ en zijn massa gelijk is aan $pA\ell$, met p de dichtheid van het piezoelektrisch materiaal.

Met behulp van (11), (19) en (2) kan de wandelsnelheid v geschreven worden als

$$v = (\eta_f \eta_m \eta_i / \pi) \sqrt{(\eta_c/\eta_m)} \sqrt{(E/p)} \epsilon_{31} l \quad (20)$$



De klemstijfheid, een parameter die belangrijk is in verband met de positioneer nauwkeurigheid, kan met behulp van (14), (4) en $c_a = c_1/h^2$ worden geschreven als

$$c_x = \eta_c EA/(\ell^2) \quad (21)$$

Voor de ontwerper is het een uitdaging η_c , η_m , η_f en η_i zo groot mogelijk te maken en η_m zo klein mogelijk. Zoals hiervoor reeds is besproken, wordt er in verband met de warmteontwikkeling aan η_f een grens gesteld.

werkzaam is. Als dat niet het geval zou zijn, zou nauwkeurig positioneren onmogelijk worden. Zouden daarentegen de delen A en B beide op hetzelfde moment klemmen, dan zou de axiale positie overbepaald zijn, met als gevolg het optreden van slijtage.

Figuur 6 illustreert het principe van het klemmechaniek. In de tekening is klem A actief en B passief. Beide klemmen worden voorgespannen door de gemeenschappelijk veer V. Als de actuator van A zich verlegt, rust klem A op de bewegende massa m en klem B is los. In dat geval zorgt veer V voor de klemkracht bij A. Als de actuator van A zich samentrekt, is klem A los en B rust

op de bewegende massa. Veer V zorgt dan voor de klemkracht bij B.

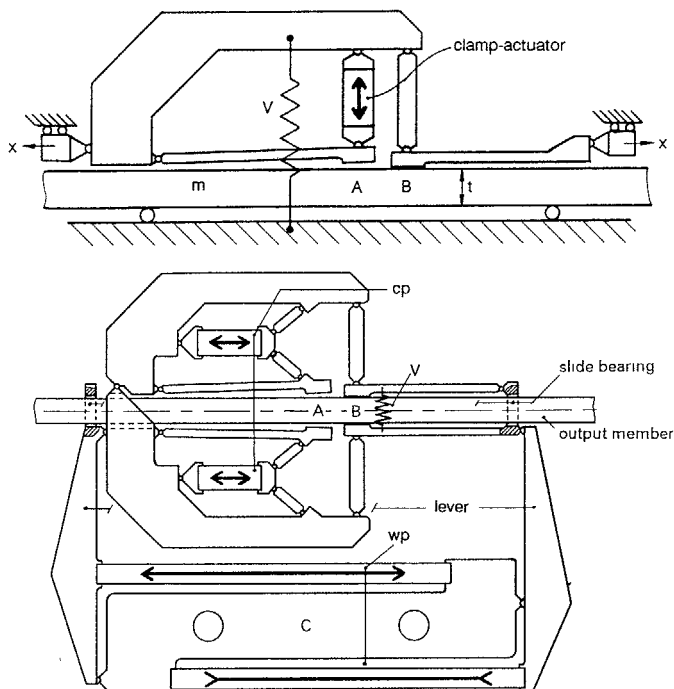
Klemmen A en B bevinden zich zo dicht mogelijk bij elkaar om het klemproces ongevoelig te maken voor variaties in de dikte van de bewegende massa m . Geleidelijke dikteveranderingen zijn echter toegestaan. Dat geldt eveneens voor vormveranderingen door slijtage. Prototypes bleken zonder problemen een totale weg van 20 km af te kunnen leggen.

De elastische draaipunten

Zowel het wandel- als het klemmechanisme is voorzien van een aantal draai-

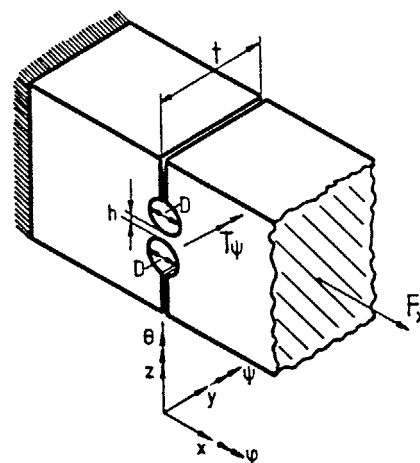
punten. Om slijtageproblemen te vermijden en om de fabricage te vereenvoudigen zijn elastische draaipunten toegepast, zoals weergegeven in figuur 7. De waarde van h/D [4,5] bepaalt de verhouding van de stijfheid in de x-richting tot de rotatiestijfheid $k_{\psi\psi}$. De grootste stijfheid is die in de x-richting. Daarom dient deze samen te vallen met de richting van de belasting van het draaipunt.

Figuur 8 illustreert het principe van de lineaire motor als geheel. C is het motorlichaam. Twee actuatoren w_p voor de wandelbeweging brengen de hefboomen in beweging. De linker hefboom bedient de hier actieve klem A; de rech-



Figuur 6. Principe van het klemmechanisme.

Figuur 8. Het principe van de lineaire piëzomotor [LPM].



Figuur 7. Een elastisch draaipunt [4].

ter hefboom doet dat op zijn beurt met de hier passieve klem B. Veer V is verantwoordelijk voor de klemkracht. De twee actuatoren cp voor het klemmen zijn verbonden met de eigenlijke klemmen via een knie-hefboom-mechanisme, met het doel een geschikte plaats te creëren voor de actuatoren.

Enkele ontwerpgegevens van de lineaire piëzomotor

Het motorlichaam is samen met het wandel- en klemmechanisme uit één stuk vervaardigd, en wel van 4 mm dik roestvaststaal, zie figuur 9. Beide actuatoren voor de wandelbeweging worden gebruikt in de d_{31} -mode. De actu-

atoren voor het klemmen werken in de d_{33} -mode. Met F_v wordt de kracht aangeduid die een voorgespannen veer uitoefent om het contact te waarborgen tussen de actuatoren voor de wandelbeweging en de bijbehorende hefboomen.

De ontwerpresultaten van het prototype kunnen als volgt worden samengevat:

- maximum snelheid 30 mm/s,
- continue snelheid 3 mm/s,
- stijfheid $1,5 \cdot 10^6$ N/m,
- aandrijfkracht 3 N,
- klemkracht 10 N,
- voedingsspanning 15 V.

Tot slot willen wij erop wijzen dat, binnen de grenzen die worden opgelegd door de toegepaste CMA's, elke andere combinatie van snelheid en stijfheid mogelijk is.

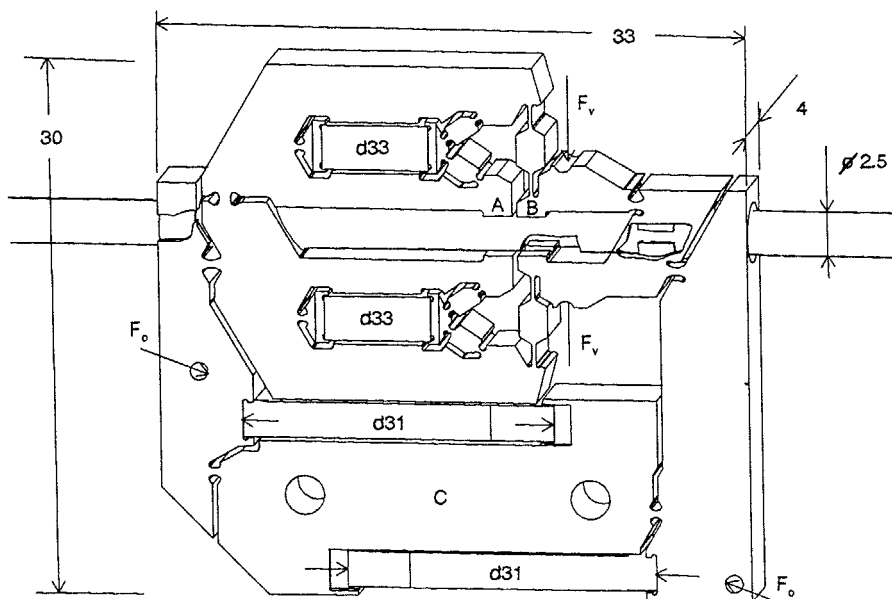
Literatuur

- [1] J W Waanders, Piezo-electric ceramics, properties and applications, Philips Components, Eindhoven (1991)
- [2] Burleigh Instruments, US Patent 3902084 (1975)
- [3] J K Thomley, T G King, M E Preston, The design of mechanical amplifiers using piezo-electric multilayer devices for use as actuators, Symposium on Mechatronics, Inst Mech Eng (1992)
- [4] M P Koster, Constructie-principes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, Collegedictaat 113136, Universiteit Twente (1992)
- [5] A Visscher, Definitie stijfheden nieuw gatscharnier afwijkend, Mikroniek 33(1993)6

Auteursnoot

De auteurs prof dr ir M P Koster en ir A Visscher zijn werkzaam bij het Centre for Manufacturing Technology, Philips, Eindhoven

De vertaling uit het Engels is verricht door ir F Zuurveen



Figuur 9. Een praktische uitvoering van de LPM.

sept. 1992
A. Visscher