

Positie-actuator oppervlakte-

Oppervlakte-akoestische golven (Engels: Surface Acoustic Waves, afgekort SAW) kunnen worden gebruikt om een mechanische beweging op te wekken. Dit artikel, voortkomend uit een IOP-project, beschrijft het werkingsprincipe van een SAW-motor. Verder worden van een experimentele versie van een dergelijke motor voor lineaire beweging de onderdelen, de aansturing en een aantal resultaten beschreven. Potentiële toepassingen van de SAW-motor zijn onder meer positionering van kleine spiegels, lenzen, lasers en sensoren in optische opstellingen, positionering van samples in (elektronen)microscopen voor inspectie en materiaalonderzoek, actuatoren met extreme eisen qua (lage) elektromagnetische velden en actuatoren voor in de ruimte.

• P.J. Feenstra en P.C. Breedveld •

M

Miniaturisatie en nauwkeuriger regeling van processen en bewegingen zijn twee belangrijke trends in de industrie. Voorbeelden zijn de vraag naar kleine motoren (actuatoren) in kantoorartikelen zoals printers [1] en optische instrumenten zoals camera's [2] en naar bewegingen voor precieze manipulatie zoals microchirurgie en assembleerprocessen. Daarnaast is er de vraag naar niet-vervuilende actuatoren, bijvoorbeeld in het domein van de halfgeleiderproductie. Additionele eisen kunnen het functioneren in vacuüm zijn en het gebruik in een omgeving die afwezigheid van magnetische velden vereist.

Elektromagnetische motoren (Lorentz-motoren), uitgevonden door de Britse natuur- en scheikundige Michael Faraday, domineren de industrie. Revolutionaire verbeteringen kunnen niet worden verwacht zonder de ontdekking van nieuwe magnetische of supergeleidende materialen. Hiernaast vermindert de energie-efficiency van elektromag-

netische actuatoren snel met kleinere vormfactoren. Dit in tegenstelling tot ultrasone motoren, die ongevoelig zijn voor de grootte en daarom superieur zijn als minimotoren [1], hetgeen de interesse in dit type motoren verklaart.

De naam 'ultrasone motor' refereert, in het algemeen, aan een klasse van motoren die microscopische elastische trillingen gebruiken om een macroscopische rotatie of translatie te genereren in respectievelijk een rotor of slede. De frequentie van de microscopische trillingen is ultrasoon, dat wil zeggen hoger dan het bereik van het menselijke gehoor, dus boven de 20 kHz. De conversie tussen de trillingen en de resulterende beweging is gebaseerd op wrijving [3]. Een ultrasone motor wordt bijvoorbeeld door Canon gebruikt voor het automatisch focuseren van een cameralens.

Een bijzondere uitvoering van een ultrasone motor is de 'Surface Acoustic Wave (SAW) motor' [4], 'oppervlakte-

op basis van akoestische golven

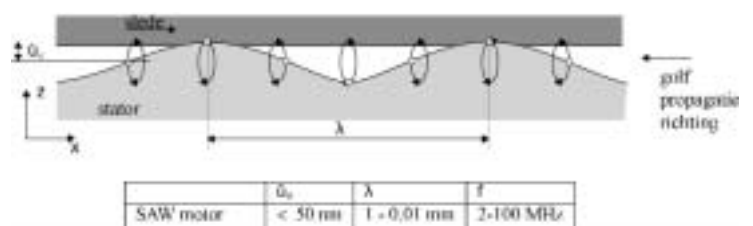
akoestische-golf motor' in het Nederlands. Het gebruik van oppervlaktegolven voor bekrachtiging heeft een aantal inherente voordelen. Het is aangetoond [5] dat het mogelijk is om stappen te maken van 2 nm, dat wil zeggen een hoge resolutie. Voorts is geen smering nodig, wat dit transductieprincipe in principe bruikbaar maakt voor vacuümtoepassingen: een experiment toonde aan dat de motor werkt bij een druk lager dan $3 \cdot 10^{-2}$ mbar. Elektromagnetische velden zijn niet nodig voor de aandrijving en de beweging blokkeert in de afwezigheid van golven; dit in tegenstelling tot onbekrachtigde Lorentz-motoren, die extern eenvoudig in beweging kunnen worden gezet. Bovendien kunnen magnetische velden een bron van verstoring zijn in bijvoorbeeld applicaties die elektronen gebruiken. Een SAW-motor kan in één graad van vrijheid werken of in meerdere vrijheidsgraden, bijvoorbeeld een beweging in een plat vlak [6]. Ook dan kan nog steeds een compacte en structureel simpele constructie worden ontworpen [7].

Werkingsprincipe

Een oppervlakte-akoestische golf, beter bekend als Rayleigh-golf, is als eerste beschreven in 1885 door de Britse wiskundige en natuurkundige Lord Rayleigh in zijn artikel "On waves propagated along the plane surface of an elastic solid". De Rayleigh-golf plant zich voort aan het oppervlak van een stator; zie Figuur 1. De stator is gemaakt van een vast, bijvoorbeeld keramisch materiaal. Het adjectief 'akoestisch' wekt vaak verwarring op door de associatie met geluid. In de fysica is het begrip 'akoestisch' echter generaliseerd tot de studie van tijdvariërende deformaties of vibraties in een medium, dat wil zeggen in gas, vloeistof óf vast materiaal [8]. Een fundamenteel kenmerk van een Rayleigh-golf is de elliptische beweging van oppervlakte-deeltjes. Daardoor wordt een wrijvingskracht uitgeoefend op een slede die tegen het stator-oppervlak is aangedrukt, hetgeen resulteert in een beweging van de slede. Deze beweging wordt omgedraaid door het aanbrengen van een golf die zich voortplant in tegengestelde richting.

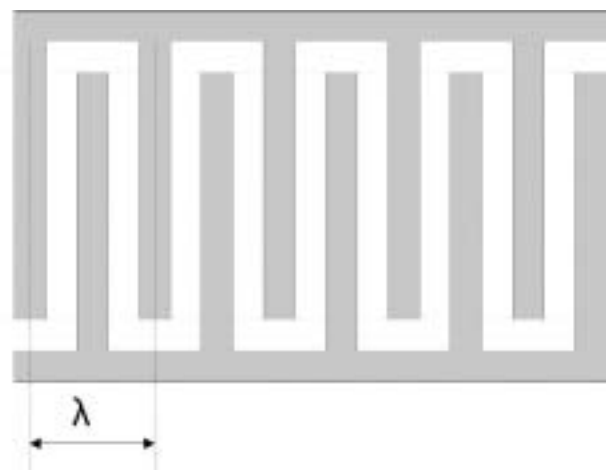
Experimentele set-up

Door middel van een zogeheten InterDigital Transducer (IDT) kan elektrische energie worden omgezet naar akoes-



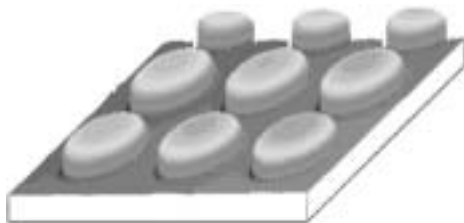
Figuur 1. Werkingsprincipe van een SAW-motor. De figuur is niet op schaal.

tisch energie (Rayleigh-golven) en vice versa; zie Figuur 2. Een IDT bestaat uit twee vingervormige elektroden van bijvoorbeeld aluminium of zilver; deze zijn gehecht aan een piezo-elektrisch materiaal in een laag van enkele micrometers door middel van een lithografisch proces. De golflengte λ van de door de IDT gegenereerde golven is gelijk aan de afstand tussen twee vingers met dezelfde polariteit. De eigenschappen van het statormateriaal bepalen de voortplantingssnelheid c van een Rayleigh-golf. Hiermee ligt de frequentie f van de golf én het elektrische ingangssignaal vast: $f = c/\lambda$.



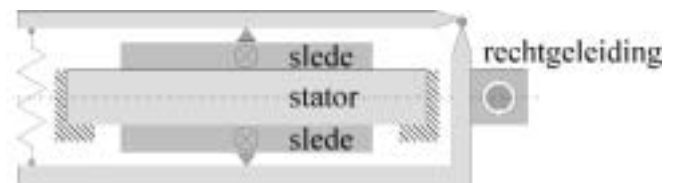
Figuur 2. Bovenaanzicht van een InterDigital Transducer. Het aantal vingerparen is 5.

De ruwheid van de stator is laag om verzwakking van de golf te voorkomen en om een gedefinieerd contact te krijgen tussen de stator en de slede. De slede (1 cm^2) is gemaakt van silicium en uitgevoerd met uitsteeksels (Engels: projections) voor het verkrijgen van een juist contact tussen slede en stator. De vorm van deze uitsteeksels kan bijvoorbeeld cilindrisch of bolvormig (Figuur 3) zijn. Beschouw voor de werking van de uitsteeksels een kleine ruimte tussen een vibrerend en een gefixeerd object. Als de luchtfilm genoeg tijd heeft (in relatie tot de trillingsperiode), dan zal deze kunnen wegstromen en zich manifesteren als demper. In het andere geval is de luchtfilm opgesloten en zal deze zich dominant gedragen als een veer; dan is er geen direct mechanisch contact tussen slede en stator. Daardoor kan geen mechanische energie van de Rayleigh-golven worden overgedragen op de slede (de wrijvingscoëfficiënt wordt erg laag), hetgeen een goede werking van de motor belemmert. De tijd benodigd voor het wegstromen van de lucht is afhankelijk van het contactoppervlak en de contactdruk, en reduceert significant door het gebruik van de uitsteeksels. De uitsteeksels voorkomen dus het ontstaan van een luchtfilm en daarmee een lage wrijving tussen slede en stator.



Figuur 3. Detail van een slede-oppervlak verkregen met een interference measurement microscope.

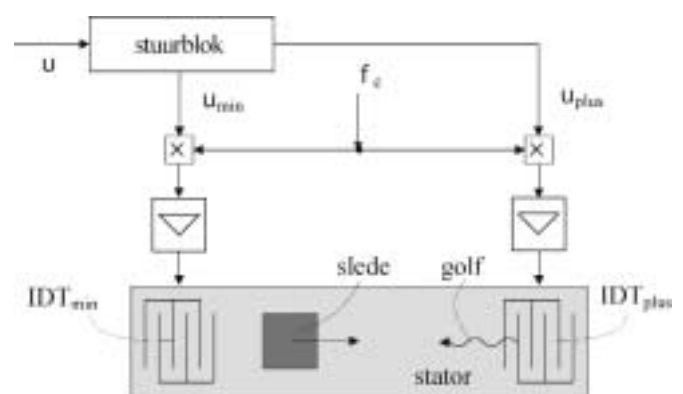
De voorspankracht die de slede tegen het stator-oppervlak drukt is een belangrijke ontwerpparameter [6], [9]. De kracht zal groot moeten zijn om voldoende wrijvingskracht te genereren, maar klein genoeg om te voorkomen dat de slede en stator continu blokkeren. Een compacte en lichtgewicht manier om deze voorspankracht op te wekken, kan worden gerealiseerd met behulp van veren. In een ontwerp [10] is bijvoorbeeld één stator gebruikt met sledes aan onder- én bovenkant, waarbij de voorspankracht gerealiseerd wordt middels één gemeenschappelijke veer; zie Figuur 4. Deze constructie heeft als bijkomend voordeel dat het totale motorvermogen verdubbeld wordt ten opzichte van een versie met slechts één slede van dezelfde grootte. Als alternatief kan een voorspankracht worden aangebracht door bijvoorbeeld een magnetisch veld of een vacuüm.



Figuur 4. Voorspanning door middel van een gemeenschappelijke veer.

Aansturing van een SAW-motor

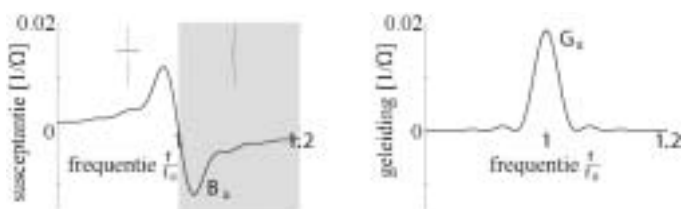
Een SAW-motor met twee IDT's kan een lineaire beweging opwekken. Dat wil zeggen een IDT genereert een golf in de ene richting en de andere IDT genereert een golf in tegengestelde richting; zie Figuur 5. Het stuurblok berekent beide aanstuursignalen (u_{min} en u_{plus}) als functie van een regelaaroutput (u). Het berekenen van de aanstuursignalen kan op vele manieren plaatsvinden. In een vergelijking tussen vier methodes blijkt dat de beste resultaten worden behaald met behulp van pulsbreedtemodulatie (pulse width modulation, PWM [6]). In deze methode wordt het teken van de regelaaruitgang gebruikt voor het schakelen tussen de IDT's en is er een niet-lineair verband tussen de absolute waarde van de regelaaruitgang en de breedte van het PWM-signaal.



Figuur 5. Blokschema van de elektrische aansturing.

Een amplitudegemoduleerd (AM) signaal wordt verkregen door vermenigvuldiging van het laagfrequente aanstuursignaal met het hoogfrequente draaggolfsignaal (f_c). Laatstgenoemde frequentie hangt af van het motorontwerp (en daarmee van de vorm van de IDT's) en zal gewoonlijk liggen tussen 2 en 100 MHz. Een vermogensversterker ver-

groot het voltage van het stuursignaal. Omdat het AM-sig-naal een elektromagnetisch golfkarakter heeft, moeten de versterkers en de gebruikte coaxiale kabels dezelfde karakteristieke impedantie (bijvoorbeeld 50φ) hebben om reflectie van signalen te voorkomen. Om dezelfde reden heeft elke IDT een aanpassingsnetwerk dat de impedantie van de IDT, rond de draaggolffrequentie, aanpast aan de karakteristieke impedantie. Figuur 6 laat de admittantie (de reciproke waarde van de impedantie) van een IDT zonder aanpassingsnetwerk zien. Merk op dat het imaginaire deel van de admittantie (de zogeheten susceptantie) nul is bij de draaggolffrequentie, capacitatief voor lagere frequenties en inductief voor hogere frequenties.

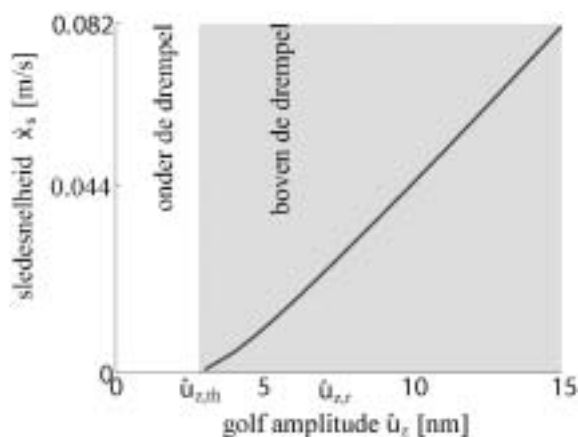


Figuur 6. Admittantie van een IDT zonder aanpassingsnetwerk. Opmerking: de inherente statische elektrische capaciteit van de vingerstructuur is weggelaten.

Resultaten

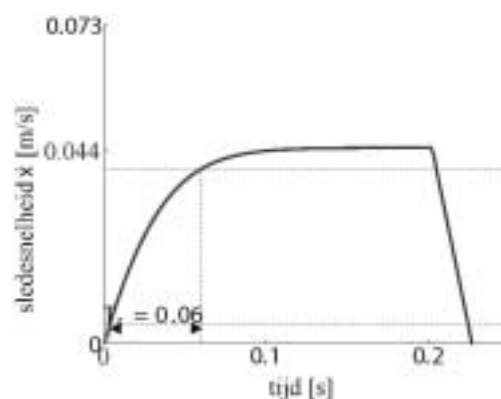
Een groot aantal experimenten is uitgevoerd om het karakteristieke gedrag van een SAW-motor zonder regelaar en aansturing te bepalen. Observeerbare kenmerken zijn onder meer de drempelamplitudes van het elektrische en het akoestische signaal voor het aandrijven van de motor; zie Figuur 7. Een bepaalde drempelwaarde moet worden overschreden voordat de slede begint te bewegen. Dit verschijnsel kan worden verklaard met behulp van een model op micro-contactniveau dat door middel van simulatie is doorgerekend. Bij amplitudes kleiner dan de drempelwaarde blijft het contact tussen de slede-uitsteeksels en de golf permanent ‘plakken’ (Engels: stick), zodat er geen effectieve beweging van de slede wordt gegenereerd door de elliptische beweging van de deeltjes in het contactoppervlak.

Een tweede kenmerk is het verschil in de stijgende en dalende helling van de snelheidskarakteristiek ten gevolge van een stapresponsie in de golfamplitude; zie Figuur 8. De stijgende helling is gekromd, wat op micro-contactniveau ver-



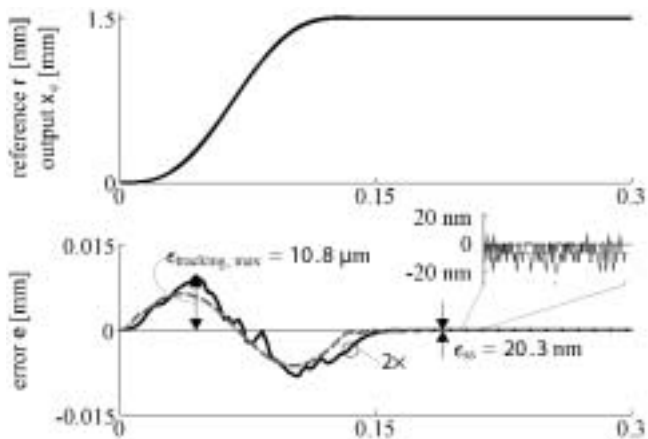
Figuur 7. De sledesnelheid als functie van de golfamplitude.

klaard wordt door het zogeheten stick-slip gedrag tussen de slede-uitsteeksels en het golvende stator-oppervlak. De dalende helling is daarentegen een lineaire functie van de tijd ten gevolge van droge wrijving (slip).



Figuur 8. Stapresponsie-gedrag van een SAW-motor.

Naast deze zogeheten open-lus experimenten zijn gesloten-lus experimenten uitgevoerd. In de gesloten lus werden motorpositie en -snelheid teruggekoppeld naar de regelaar. Figuur 9 laat de responsie zien op een cycloïde-stap. De tijdsduur van de cycloïde is 0,13 s en de stapgrootte is 1,5 mm. De volgfout was maximaal 10,8 μ m en bleek repeterend te zijn. De rustfout bedroeg 20,3 nm en had een grootte van drie encoder-incrementen.



Figuur 9: Responsie op een cycloïde-stap. De fout is geplot voor twee experimenten, die precies over elkaar heen vallen, en een simulatie (gestreepte lijn).

Auteursnoot

Dr.ir. P.J. Feenstra is werkzaam bij TNO Human Factors in Soesterberg en dr.ir. P.C. Breedveld is verbonden aan de Universiteit Twente.

Referenties

- [1] Uchino, K. (1998), 'Piezoelectric ultrasonic motors: overview', *Smart Material Structures* 7, 273-285.
- [2] Zhao, C. (2005), Development and applications of ultrasonic motors in China, in '2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators', Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn.
- [3] Ueha, S. & Tomikawa, Y. (1993), *Ultrasonic Motors: Theory and Applications*, Oxford University Press Inc., New York. With contributions from M. Kurosawa and K. Nakamura.
- [4] Koc, B., Basaran, D., Akin, T. & Erden, A. (2002), Design of a piezoelectric ultrasonic motor for micro-robotic application, in 'Int. Conf. Mechatronic Design and Modeling, Turkey', pp. 205-219.
- [5] Shigematsu, T., Kurosawa, M.K. & Asai, K. (2003), 'Nanometer stepping drives of surface acoustic waves motor', *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control* 50(4), 376-385.
- [6] Feenstra, P.J. (2005), Modeling and Control of Surface Acoustic Wave Motors, PhD thesis, University of Twente, Enschede. ISBN: 90-365-2235-8
- [7] Vermeulen, M.M.P.A., Peeters, F.G.P., Soemers, H.M.J., Feenstra, P.J. & Breedveld, P.C. (2002), Development of a surface acoustic wave planar motor under closed loop control, in '3rd Euspen International Conference', Eindhoven University of Technology, pp. 107-110.
- [8] Auld, B.A. (1990), *Acoustic Fields and Waves in Solids*, 2nd edn, Krieger Publishing Company, Inc.
- [9] Asai, K., Kurosawa, M.K. & Higuchi, T. (2000), Evaluation of the driving performance of a surface acoustic wave linear motor, in 'Proc. of IEEE Ultrasonic Symp.', Vol. 3C.
- [10] Dijk, P. (2000), Development of a surface acoustic wave linear motor, Master's thesis, University of Twente.

IOP Precisietechnologie

In het 'Surface Acoustic Wave Motor'-project (2001-2005) heeft de Control Engineering-groep van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente een dergelijke motor onderzocht. Dit onderzoek is mede mogelijk gemaakt dankzij financiële ondersteuning door het ministerie van Economische Zaken in het kader van het Innovatiegerichte Onderzoeksprogramma (IOP) Precisietechnologie.

philippus.feenstra@tno.nl
p.c.breedveld@utwente.nl
www.senternovem.nl/iopprecisietechnologie