

## Instrumenten met een duikspoel als actuator of krachtopnemer

Erwin Dekkers

De "duikspoel" is één van de meest elementaire typen lineaire motoren. Het werkingsprincipe is gebaseerd op dat van een normale luidspreker: een spoel die zich in een permanent magneetveld bevindt ondervindt een kracht of verplaatsing.

Door het ontbreken van commutatie, wrijving en veldvariatie is de kracht die de spoel levert lineair evenredig met de stroom door de spoel. De massa van het bewegende deel kan beperkt worden tot het koper van de spoel. Dit maakt de duikspoel zeer geschikt als snelle en nauwkeurige lineaire servomotor voor kleine translaties.

Door met behulp van terugkoppeling de spoel op zijn plaats te houden en de stroom door de spoel te meten kan de duikspoel gebruikt worden als zeer stijve en nauwkeurige krachtopnemer. Om de goede eigenschappen van de duikspoel in een instrument te waarborgen is het noodzakelijk om het instrument wrijvingsloos en kinematisch bepaald uit te voeren.

De Centrale Technische Dienst (CTD) van de Technische Universiteit Eindhoven heeft recent een aantal instrumenten moeten ontwerpen en maken waarin kleine krachten en kleine verplaatsingen aangebracht en gemeten moeten worden. Deze instrumenten worden voor verschillende doeleinden in verschillende vakgebieden gebruikt.

Voor deze groep van produkten is als actuator en krachtopnemer de duikspoel toegepast.

### Werkingsprincipe van een duikspoelactuator

De duikspoelactuator bestaat uit een permanente ringmagneet met een weekijzeren bovenplaat, onderplaat en een kern om een magneetveld in radiale richting te creëren. De veldlijnen lopen volgens figuur 1. De spoel hangt in de veldconcentratie van de luchtspleet. Als

er een stroom door de spoel looptervaart hij een "Lorentz"-kracht in axiale richting waarvan de grootte evenredig is met die stroom.

De spoel moet in de luchtspleet gehouden worden met een rechtgeleiding.

### Voor en nadelen van de duikspoelactuator:

Voordelen:

- De kracht is zeer goed lineair evenredig met de stroom. Door dit lineaire gedrag is de duikspoel goed te modelleren en kan tijdens het ontwerp de haalbare nauwkeurigheid goed bepaald worden. Bovendien kan de stroom door de spoel in bepaalde opstellingen als kracht signaal gebruikt worden.
- Door de lage massa van het bewegende deel (voornamelijk koper van de wikkelingen) is de duikspoel geschikt voor zeer snelle bewegingen en heeft een grote haalbare bandbreedte.
- Door de grote veldsterkte van de magneet heeft de duikspoel een hoge motorconstante. Dit betekent dat bij een relatief kleine stroom al veel kracht geleverd wordt.
- De duikspoel heeft geen commutatie (zoals borstels of elektronische commutatie bij andere motoren) en is daardoor wrijvingsloos en eenvoudig aan te sturen met gelijkstroom.
- In teruggekoppeld bedrijf kan een hoge positioneer-nauwkeurigheid gehaald worden. De nauwkeurigheid is afhankelijk van de kwaliteit van het positiemeetsignaal en de regeling.

Nadelen:

- Als bij stilstand kracht geleverd moet worden is het rendement nul, waar-

door het toegevoegde vermogen uitsluitend in warmte omgezet wordt. Dit geldt overigens voor alle elektromagnetische motoren. Bij snelheid nul is het uitgaande vermogen nul. Het ingaande vermogen is de stroom benodigd om kracht te leveren in het kwadraat maal de spoelweerstand.

- Beperkte slag (ongeveer 25 mm). Een lange slag betekent meer windingen buiten het veld en daardoor een lager rendement.

Het toepassingsgebied van de duikspoel ligt in het gebied van de lage krachten (maximaal ongeveer 100 N) afhankelijk van de grootte en de maximale warmteontwikkeling die is toegestaan. Omdat de stroom lineair evenredig is met de kracht kan met een duikspoel ook kracht gemeten worden. De slag is beperkt tot ongeveer 25 mm afhankelijk van de rechtgeleiding, de benodigde lineariteit en het gewenste rendement.

### Vuistregels voor de berekening van de duikspoelactuator

Voor de kracht  $F_s$  [N] op de spoel geldt volgens Lorentz:

$$F_s = B_g \cdot I_s \cdot l_d \text{ met}$$

$I_s$  de stroom door de spoel [A],

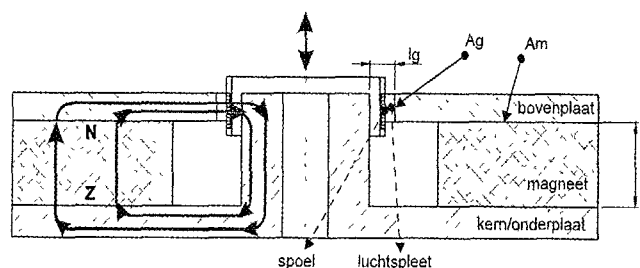
$B_g$  de magnetische inductie in de luchtspleet [T],

$l_d$  de lengte van de draad in het veld [m].

Voor het ingaande vermogen  $P_s$  [W] geldt dan, met de ohmse weerstand van de spoel  $R$  [ $\Omega$ ]:

$$P_s = R \cdot I_s^2$$

Hiermee kan de warmte-ontwikkeling in de spoel berekend worden.



Figuur 1  
Werkingsprincipe van de duikspoelactuator

De magnetische inductie in de luchtspleet kan voor kleine stromen benaderd worden volgens:

$$B_g = \frac{I_m \cdot B_r \cdot A_m}{\mu_{rm} \cdot A_m \cdot l_g + A_g \cdot l_m} \text{ met:}$$

$B_r$  de remanentie van de magneet [T],  
 $\mu_{rm}$  de relatieve permeabiliteit van de magneet [-],  
 $A_m$  het oppervlak van de magneet [m<sup>2</sup>],  
 $A_g$  het oppervlak van de luchtspleet [m<sup>2</sup>],  
 $l_m$  de lengte van de magneet [m],  
 $l_g$  de luchtspleet [m].

Door het verschil in oppervlak van de magneet en de luchtspleet wordt de magnetische inductie in de luchtspleet versterkt. Deze versterking kan niet oneindig opgevoerd worden omdat bij een magnetische inductie van ongeveer 1,5 Tesla verzadiging van ijzer optreedt. Hoe kleiner de luchtspleet hoe groter de magnetische inductie.

In analogie met gelijkstroommotoren kan een motorconstante (dit is de kracht geleverd door de duikspoel bij een stroom van één Ampère) worden gedefinieerd:  
 $k_m = B_g \cdot l_d$  [N/A].

### Andere lineaire actuatoren voor kleine translaties

Naast de duikspoel zijn de piezoverplaatser en een motor met een mechanische overbrenging van rotatie naar translatie veel gebruikte lineaire actuatoren voor kleine translaties. Afhankelijk van het gestelde doel kan één van deze drie aandrijvingen de voorkeur verdienen.

#### • De piezoverplaatser

Voordelen.

- De elektrische spanning over de piezo is bij benadering evenredig met de verlenging.
- Door de lage massa zijn hoge versnellingen en een hoge bandbreedte haalbaar.
- Weinig warmteontwikkeling als bij stilstand een kracht geleverd wordt.
- Hoge mechanische belastbaarheid.
- De piezo is ook zonder terugkoppeling te bedienen voor toepassingen met lagere eisen voor de statische positioneerbaarheid.

- De positioneerbaarheid in teruggekoppeld bedrijf is afhankelijk van de kwaliteit van het positiemeetsignaal en de regeling.

Nadelen.

- Kruip bij constante belasting of elektrisch spanningsverschil en hysteresis bij het doorlopen van een krachtlus. Hierdoor is de piezo niet lineair waardoor modelleren en regelen moeilijker wordt.
- Hoge spanningsverschillen om de maximale slag te halen.
- Beperkte verplaatsing (ongeveer 100  $\mu$ m) afhankelijk van de lengte en uitvoering.

Indien hoge statische krachten geleverd moeten worden, de lineariteit minder belangrijk is en de benodigde verplaatsing zeer klein is, is de piezoverplaatser geschikt. De haalbare positioneerbaarheid en bandbreedte van piezo en duikspoel zijn ongeveer gelijk, afhankelijk van de wijze van regeling en positiemeting. Bedreven zonder terugkoppeling kan de piezo met een beperkte positioneerbaarheid een zeer hoge bandbreedte bereiken.

#### • Motor met een overbrenging van rotatie naar translatie

Voordelen:

- Bij grote overbrengingsverhoudingen kan de overbrenging zelfremmend zijn waardoor bij stilstand kracht geleverd kan worden zonder vermogen te dissiperen.
- Grote haalbare verplaatsing.

Nadelen:

- Wrijving, hysteresis en speling, waardoor het dynamisch gedrag moeilijk te voorspellen is en de nauwkeurigheid beperkt

De werktuigbouw kent zeer veel goede en minder goede voorbeelden van dit min of meer "klassieke" oplossingsgebied. Afhankelijk van de uitvoering van de motor en de overbrenging kunnen nauwkeurigheid en bandbreedte van een piezo of duikspoel alleen in het gunstigste geval benaderd worden.

#### Voorbeeld

Toepassing van de duikspoelactuator als "particle crusher". Het instrument is ontwikkeld ten behoeve van een onder-

zoek naar het breukgedrag van deeltjes van abrasieve poeders. Doel van het onderzoek is te achterhalen volgens welk mechanisme de deeltjes bezwijken en bij welke kracht dit gebeurt

Dit onderzoek wordt uitgevoerd aan de T.U.E. door Ir M.A. Verspui en Prof Dr. G. de With bij de vakgroep Vaste Stof Chemie en Materialen van de faculteit Scheikundige Technologie.

#### Eisen

Met de particle crusher worden kracht-weg diagrammen van het bezwijkproces van kleine brosse deeltjes gemeten. Per meting wordt één deeltje tussen twee diamanten aambeelden geplet. Het bijbehorende kracht-weg diagram wordt in kaart gebracht. De afmetingen van de deeltjes liggen tussen 5  $\mu$ m en 250  $\mu$ m.

De aambeelden moeten elkaar met een constante instelbare snelheid (van 0,1 tot 1000  $\mu$ m/sec) naderen om snelheidseffecten op het breukgedrag te kwantificeren en versnellingskrachten in het kracht-weg diagram te vermijden.

Tijdens de meting moet het bezwijkproces met een microscoop bekeken kunnen worden. De ruimte tussen de aambeelden moet goed bereikbaar zijn om de aambeelden schoon te kunnen maken en een nieuw deeltje te kunnen positioneren.

Voor de relatieve verplaatsing tussen de aambeelden geldt:

slag 500  $\mu$ m,  
 reproduceerbaarheid 0,1  $\mu$ m

Voor de krachtmeting geldt:  
 bereik 50 N,  
 reproduceerbaarheid 0,5 mN.

#### Constructie van de particle crusher

Om een constante naderingssnelheid tussen de aambeelden te garanderen op het moment dat er een stuk van een deeltje afspringt is een zeer stijve aandrijving met geringe massa nodig. Deze sprong in de kracht resulteert namelijk in een resttrilling. Deze resttrilling moet een zo laag mogelijke amplitude en een korte uittriltijd hebben, zodat het natrillende aambeeld niet nogmaals de korrel raakt. Naast een hoge stijfheid moet de aandrijving dus ook over veel

## Instrumenten met een duikspoel als actuator of krachtopnemer

demping beschikken. Als actuator is gekozen voor een duikspoel, omdat de slag voor een piezo aan de grote kant is en de krachten niet groot zijn.

De stijfheid en de demping kunnen nu afgesteld worden met de regelparameters van de terugkoppellus.

Omdat het proces zich, zolang er contact is met de korrel, afspeelt met een constante snelheid zal de stroom door de spoel recht evenredig zijn met de kracht op de korrel. Stroom is eenvoudig nauwkeurig te meten en wordt dan ook als krachtmeetsignaal gebruikt.

Zie figuur 2: principe schets van de constructie.

De aambeelden zijn cilindrische diamantvensters (diam. 2 x 1mm) gesoldeerd door Drukker International op een houder van molybdeen. Het deeltje kan met een microscoop worden bekeken via een gat van 1 mm in de houder.

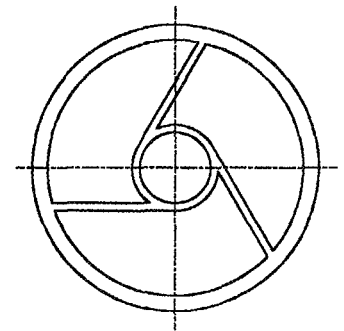
Voor de meting moeten de vlakken van de aambeelden nauwkeurig evenwijdig zijn. De toleranties bij het solderen zijn te ruim. De diamanten moeten daarom evenwijdig gesteld kunnen worden. De bovenste diamant is bevestigd op een elastisch bolschamier vervaardigd met behulp van draadvonkverspaning. De aambeelden kunnen evenwijdig gesteld worden met twee differentieelschroeven. De differentieelschroeven bevinden zich aan het uiteinde van de inste-

larmen en hebben een eindspoed van 0,1 mm. Hiermee is een evenwijdigheid van 50  $\mu$ rad haalbaar.

Het bovendeel van het apparaat is met drie kogels in drie V-gleuven bevestigd aan het onderste deel. Op deze manier kan het bovendeel eenvoudig en eenduidig geplaatst en afgenomen worden voor het plaatsen van een korrel. De opstelling met drie kogels in drie V-gleuven is kinematisch bepaald en het thermisch centrum ligt op het midden van het aambeeld.

De kogels hebben een voorspankracht nodig om voldoende stijfheid te leveren. Daarom wordt iedere kogel met een verende klem voorgespannen.

Het bovenste aambeeld is stijf verbonden met de vaste wereld. De verticale vrijheidsgraad (de bewegingsrichting) van het onderste aambeeld wordt vastgelegd door de duikspoel. De overige vijf vrijheidsgraden van dit aambeeld moeten nog vastgelegd worden met een rechtgeleiding. De rechtgeleiding wordt kinematisch bepaald gerealiseerd met vijf sprieten, drie in het bovenvlak en twee in het ondervlak [2]. Het thermische centrum van de rechtgeleiding ligt nu in de hartlijn van het aambeeld, waardoor temperatuurverschillen tussen spoelhouder en huis niet leiden tot een radiale verplaatsing van het onderste aambeeld.



Figuur 3 Drie sprieten gedraadvonkt uit plaat

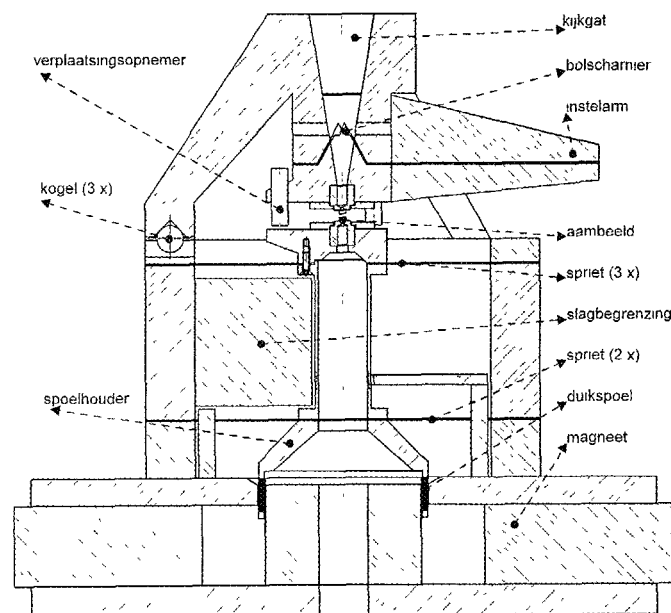
De sprieten zijn door middel van draadvonkverspanen aangebracht in plaat van 0,3 mm dikte; zie figuur 3.

In het vlak van de plaat zijn de sprieten veel breder dan de plaatdikte waardoor er twijfel zou kunnen bestaan of er sprake is van sprieten of bladveren. De hockverdraaiing die de sprieten in het vlak maken als gevolg van de beweging in z-richting is echter zo klein dat deze ook elastisch wordt opgevangen.

Als verplaatsingsopnemers wordt gebruik gemaakt van contactloze inductieve opnemers om wrijving te voorkomen. Volgens Abbe moet de verplaatsing in lijn van de te meten positie gemeten worden om kantelingsfouten van de geleiding niet in het verplaatsings-signaal terug te vinden. Dit zou in de constructie leiden tot een lange meetweg met veel temperatuurdrijf. Bovendien is het belangrijk om de verplaatsingsmeting los te koppelen van de krachtlus, omdat anders de eindige stijfheid van het freem de meting beïnvloed.

Daarom is gekozen om de verplaatsing over de kortst mogelijke weg rechtstreeks tussen de twee aambeelden te meten. Om de "Abbefout" te compenseren wordt met drie opnemers in de omtrek de verplaatsing gemeten, waarvan het gemiddelde genomen wordt.

Het apparaat is uit aluminium vervaardigd. Hierdoor wordt de magnetische lekflux beperkt. Door de goede warmtegeleiding blijven temperatuurgradiënten, die vervorming van de constructie veroorzaken, minimaal. De grote warmtecapaciteit zorgt voor een langzaam verloop van temperatuurvariaties waardoor de afwijkingen tijdens de korte meting gering blijven.



Figuur 2  
Principeschets van de  
particle crusher

Het geheel is op een eenvoudige  $x-y-\pi$  manipulator geplaatst om een deeltje in beeld van de microscoop te krijgen.

Figuur 4 toont het gerealiseerde apparaat. Het microscoopbeeld, opgenomen met een CCD-camera en het kracht-wegdiagram wordt met behulp van een computer verwerkt. Hiermee staat vast welk stuk van het deeltje afgebrokkeld is en welk kracht-weg diagram daarbij hoort.

### Regeling

De regeling van de duikspoel is analoog aan die van een normale DC-servomotor. De duikspoel wordt aangestuurd via een DC-versterker met een analoge regeling van het type PID. Het stuur-sig-naal wordt digitaal gerealiseerd met een bij de CTD ontwikkelde digitale besturing.

Omdat voor het meetproces een hoge stijfheid van de actuator vereist is moet de proportionele versterking (P-actie) van de regeling zo groot mogelijk zijn

De grens voor de proportionele versterking is afhankelijk van een aantal zaken:

- De eigenfrequentie van het regelsysteem moet ver onder de laagste eigenfrequentie van het mechanische

systeem liggen om opslingering te voorkomen. De laagste eigenfrequentie is te berekenen door het mechanisch systeem te benaderen met een model van massa's en veren volgens literatuur [2]. De laagste eigenfrequentie van het bewegende gedeelte van het mechanische systeem ligt op 7,5 kHz. Dit is de eigenfrequentie in verticale richting van de aambeeldhouder op de holle cilinder tussen de sprietten

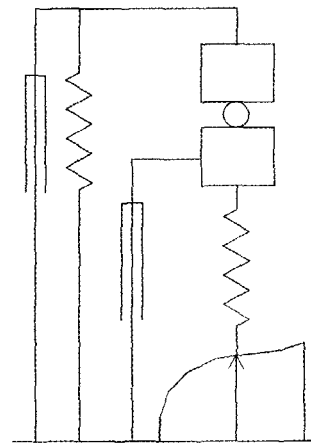
- Het positie-sig-naal moet een hogere bandbreedte hebben dan de eigenfrequentie van het regelsysteem en weinig ruis bezitten. De bandbreedte van het meetsysteem achter een ingebouwd ruisfilter ligt op 15 kHz, met een ruisniveau overeenkomend met een verplaatsing van 50 nm.
- Er moet voldoende demping in het systeem aanwezig zijn om trillingen snel uit te dempen. Demping kan toegevoegd worden in de vorm van mechanische (passieve) demping of in de vorm van een actieve snelheidssterugkoppeling.

Figuur 5 toont het vereenvoudigd mechanisch model van de particle crusher. Mechanische demping wordt toegepast door de huls waarop de spoel gewikkeld is geleidend te maken. De spoel heeft dan een kortsluitwinding in het magneetveld waarin wervelstromen gaan lopen als de huls beweegt ten opzichte van het magneetveld. Hierdoor ontstaat volgens Lorentz een tegengestelde kracht evenredig met de bewegingssnelheid.

Snelheidssterugkoppeling kan bereikt worden door terug te koppelen op het gedifferentieerde positie-sig-naal (D-actie). Bij een differentiatie wordt de hoogfrequente ruis in het sig-naal echter veel versterkt waardoor de bandbreedte beperkt blijft

In dit geval is daarom gekozen voor snelheidssterugkoppeling met behulp van een extra snelheidsmeetspoel. Deze spoel werkt in analogie met de tacho bij rotatiemotoren.

Hiermee is een regeling bereikt met een bandbreedte van 1000 Hz en met een voldoende hoge stijfheid om een goed bewegingsverloop te garanderen bij het afbrokkelen van een stuk van een deeltje.



Figuur 5 Vereenvoudigd mechanisch model

Om de statische positioneerfout te verkleinen kan een integrator in de terugkoppellus worden gebruikt. De I-actie of integratie kan in dit geval achterwege gelaten worden omdat een lage statische positiefout niet vereist is.

### Literatuur

- [1] Constructieprincipes, dictaat 4007, Technische Universiteit Eindhoven 1990  
 [2] Dynamisch gedrag van constructies en mechanismen, dictaat 4627, Technische Universiteit Eindhoven 1987

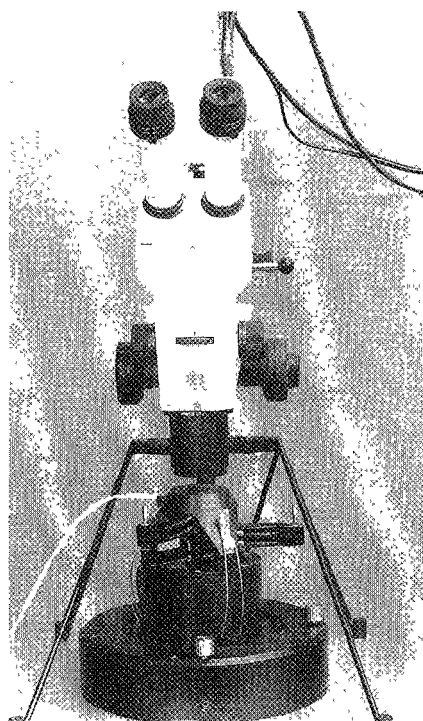
### Noot

De Centrale Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven heeft een jarenlange ervaring met het toepassen van nieuwe technieken en materialen. Die ervaring is opgebouwd doordat het wetenschappelijk onderzoek steeds nieuw eisen stelt voor het bouwen van speciale apparatuur en systemen. Om deze eisen te halen moeten functionele en grensverleggende oplossingen geboden worden. In het algemeen zijn meerdere vakgebieden betrokken bij het realiseren van deze apparatuur. Daarom wordt veelal op projectmatige basis gewerkt. De CTD beschikt voor projectactiviteiten over de stafgroepen

- Constructie en Technologie,
- Elektronica en Elektrotechniek,
- Fysische Techniek en Glastechniek

Afhankelijk van het soort project wordt het ontwerp op fundamentele ofwel op experimentele basis tot stand gebracht. Iedere stafgroep beschikt daarvoor over ontwerp- en realisatiegroepen.  
 Ir. Erwin Dekkers is medewerker van de Technische Universiteit Eindhoven afdeling CTD

Reacties op dit artikel zijn welkom bij  
 Erwin Dekkers  
 Technische Universiteit Eindhoven afdeling CTD  
 Postbus 513  
 5600 MB Eindhoven  
 Telefoon 040-473 356



Figuur 4 De particle crusher