

Modelvorming in de Microsysteemtechnologie

J. van Kuijk

Het ontwerpproces in de micromechanica wijkt in belangrijke mate af van het conventionele ontwerpproces. Ten eerste bestaan er nauwelijks handboeken en constructie-elementen gebaseerd op normen zijn op een hand te tellen.

Ten tweede zijn de fabricagemethoden afwijkend, bijvoorbeeld fotolithografische etsmethoden, of ze zijn nog in een experimentele fase, bijvoorbeeld het microspuitgieten.

Ten derde is er een aanzienlijke interactie tussen vakgebieden binnen een ontwerp. Dit betekent niet alleen dat de ontwerper van vele markten thuis moet zijn, maar dat de onderdelen binnen een ontwerp uit verschillende vakgebieden komen of, met andere woorden, verschillende energiedomeinen ondervinden een interactie van elkaar.

Als een representatief voorbeeld noemen we een enkelzijdig ingeklemde bladveer die elektrostatisch aangetrokken wordt [1]. Gaan we uit van de beginsituatie van 0 Volt, dan bevindt het systeem zich in de begintoestand. Voe ren we de spanning op dan ontstaat een elektrisch veld tussen de mechanische onderdelen en wordt de bladveer aangetrokken. De bladveer vervormt, hetgeen tot gevolg heeft dat de ladingsverdeling op de bladveer verandert en daarmee het elektrische veld. Het elektrische veld zorgt ervoor dat de krachtverdeling en de totale kracht op de bladveer verandert. Uiteindelijk blijkt de bladveer tot rust te komen in die toestand, uitwijking, waarbij alle krachten in evenwicht zijn; zie figuur 1.

Deze sterke interactie tussen energiedomeinen blijkt zeer vaak voor te komen in de micromechanica en kan dan ook niet zonder meer verwaarloosd worden. Uit dit voorbeeld blijkt dat het van belang is om in de ontwerpfase te kunnen voorspellen hoe het systeem zich gedraagt. Met name in de microsysteem-

technologie is de interactie tussen verschillende fysische domeinen sterk. Het modelvormingsproces voor microsysteemtechnologie vraagt om combinaties van bestaande technieken: alleen op deze wijze kunnen goede simulaties van het gedrag van het systeem worden berekend.

Het modelvormingsproces

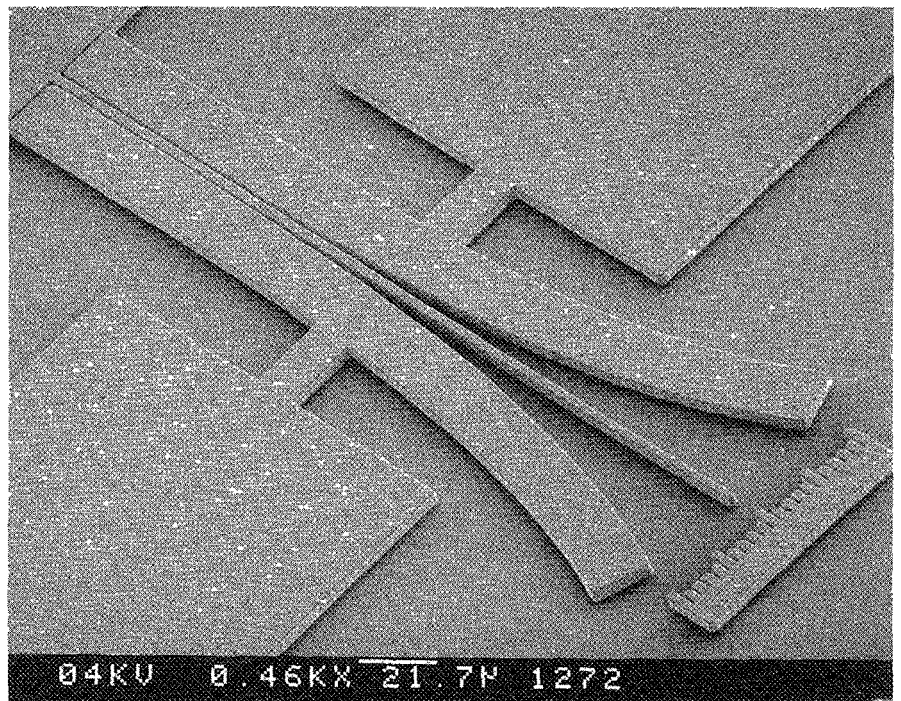
Vanwege de eerder genoemde drie redenen is de ontwerper bij het ontwerpen van micromechanische produkten vooral aangewezen op fundamentele natuurkundige wetten en niet zozeer op ontwerpregels uit het verleden. Aan de ene kant geeft dit de ontwerper de vrijheid om de constructie volledig naar zijn hand te zetten, aan de andere kant ontstaan er eenvoudige problemen die geen standaardoplossing hebben. Het verbinden van twee onderdelen met een bout en moer is er niet meer bij, in het ontwerpproces is het noodzakelijk om modellen op te stellen.

Dit modelvormingsproces kan onderverdeeld worden in vier stappen.

Als eerste stap wordt een model opgesteld, met andere woorden de juiste vragen moeten gesteld worden. Zo kan een ruimtevaartuig beschreven worden als een puntmassa wanneer het gaat om het bepalen van zijn baan terwijl de complete constructie in acht moet worden genomen wanneer het gaat om het manoeuvreren van het vaartuig.

De tweede stap is het wiskundig formuleren van het model door het toepassen van de natuurwetten. Afhankelijk van de vraagstelling kunnen verschillende formules gebruikt worden. Voor een membraan dat kleine uitwijkingen ondergaat kan met een lineaire beschrijving worden volstaan terwijl bij grotere uitwijkingen een niet-lineaire beschrijving noodzakelijk is.

De volgende stap is het kwantitatief of kwalitatief analyseren van het model. Bij de kwantitatieve analyse zijn we vooral geïnteresseerd in de exacte



Figuur 1 Foto van een uit polysilicium vervaardigde bladveer die elektrostatisch aangetrokken kan worden door de vaste elektrode

respons op ingangssignalen terwijl een kwalitatieve analyse zeer goed gebruikt kan worden om ontwerpeisen en "trends" te achterhalen. Als het model goed is opgesteld dan moet het ontwerp dezelfde respons hebben als het model. Vanzelfsprekend is dit bijna nooit het geval en moeten we binnen zekere toleranties werken.

De laatste stap in het modelvormingsproces is dan ook het aanpassen van het model en eventueel testen van het model met experimentele gegevens.

Modelvormingstechnieken in de microsysteemtechnologie

Voordat we het modelvormingsproces voor een micropomp doorlopen geven we een kleine opsomming van modelvormingstechnieken.

In de microsysteemtechnologie worden de volgende vier wiskundige technieken toegepast voor het opstellen van modellen.

- Het analytisch oplossen van differentiaalvergelijkingen. Dit wordt veelvuldig toegepast, vooral wanneer de werking van de component berust op een speciaal natuurkundig verschijnsel, bijvoorbeeld bij thermisch bimorf gedrag. Het verschijnsel wordt beschreven met differentiaalvergelijkingen. Om deze vergelijkingen op te kunnen lossen voor een bepaald ontwerp, zijn vereenvoudigingen noodzakelijk waardoor de antwoorden vaak niet binnen tientallen procenten van de gemeten waarden liggen.

- Eindige elementen berekeningen worden voornamelijk gebruikt om mechanische vervormingen uit te rekenen, ter ondersteuning van eventuele analytische oplossingen of om kwantitatieve waarden te vinden. Een praktisch probleem voor deze methode is de afhankelijkheid van materiaalgegevens van de fabricagemethode -- de inwendige spanning voor fysische gedeponeerde materialen is anders dan voor chemische gedeponeerde materialen. Bovendien zijn op micrometerschaal de materiaalparameters niet meer isotroop -- bijvoorbeeld de elasticiteitsmodulus van silicium is niet constant maar van de kristalrichting afhankelijk. Verschillende eindige elementen programma's worden gebruikt zoals ANSYS, COSMOS/M, ABAQUS, en voor vloeistof-

berekeningen FIDAP en FLOTRAN

- Eindige differentie berekeningen worden toegepast om differentiaalvergelijkingen op te lossen. Zij vinden een brede toepassing voor het berekenen van elektrostatische velden met specialistische programma's zoals Maxwell en FastCap.

- De bondgraafmethode is een relatief nieuwe methode in de microsysteemtechnologie. Deze methode berust erop dat het componentgedrag in termen van energie beschreven wordt. Het grote voordeel dat vaak genoemd wordt is, dat berekeningen uit verschillende energiegebieden eenvoudig aan elkaar gekoppeld kunnen worden, terwijl dit bij andere methoden vaak moeilijk is omdat die energiegebied-gebonden zijn. Een programma dat deze bondgraafberekeningen uitvoert is CAMAS. Voor meer informatie over CAMAS verwijzen wij naar de rubriek "Productinfo" in dit nummer van Mikroniek.

Deze vier technieken worden zowel gebruikt voor het opstellen van een compleet model of voor het opstellen van submodellen voor de verschillende componenten. Voor het opstellen van de componentmodellen kan het modelvormingsproces op dezelfde manier doorlopen worden als voor het complete systeem.

Macromodellering

Een term die sinds kort steeds vaker wordt gebruikt bij het modelleren is macromodelleren. Deze techniek maakt het mogelijk om alle bovenstaande wiskundige beschrijvingen te combineren waarbij de natuurkundige relevantie van componentengedrag niet verloren gaat. Zoals de naam al zegt, gaat het om het opstellen van modellen met behulp van macro's zoals we die kennen uit de tekstverwerkers van tegenwoordig. Als voorbeeld nemen we de uitwijking van een membraan onder een bepaalde drukverdeling. Door het analytisch oplossen van de differentiaalvergelijking worden de afhankelijkheden bij de uitwijking van het membraan duidelijk. De onderstaande vergelijking geeft een analytische oplossing voor een rond membraan:

$$\Delta P = C_1 w + C_2 s_1 w + C_3 w^3.$$

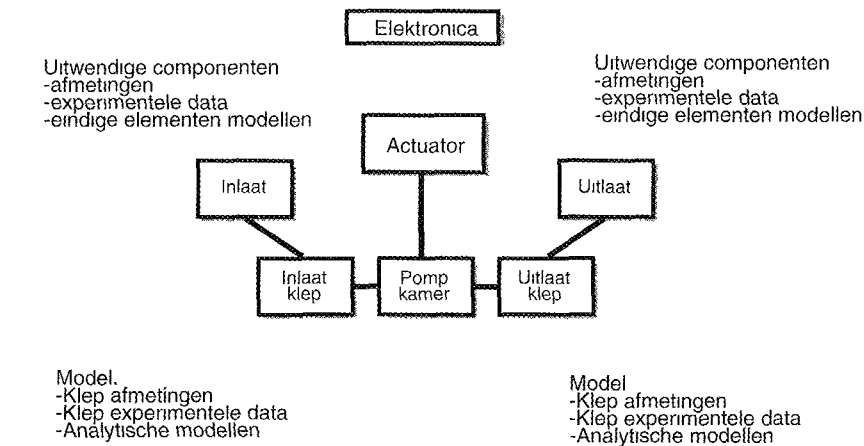
De absolute waarden van de coëfficiënten $C_{1,3}$ in het model zijn normaal gesproken niet met de experimenten in overeenstemming, maar dat maakt dit model niet compleet waardeloos. Zo blijkt de doorbuiging w van het membraan te bestaan uit twee lineaire termen, één voor de buiging en één voor de voorspanning, en er blijkt nog een derde term belangrijk welke een derde macht vormt en verantwoordelijk is voor het niet-lineaire gedrag. Alle klassieke boeken over membraanberekeningen geven deze oplossing voor specifieke gevallen, met name een constante druk over het membraan. Deze beschrijving kunnen we betitelen als trends. De coëfficiënten van deze trends zijn echter afhankelijk van de vorm en de drukverdeling over het membraan. Door nu deze coëfficiënten met behulp van metingen, of andere modelleer technieken zoals de eindige elementen methode te bepalen, kunnen we toch een wiskundige beschrijving vinden welke in het systeemmodel gebruikt kan worden. Deze vergelijkingen kunnen dan weer als "macro" gebruikt worden in het systeem model. Het macromodelleren opent de mogelijkheid om verschillende modelleertechnieken te combineren.

Het complete model voor micropompen

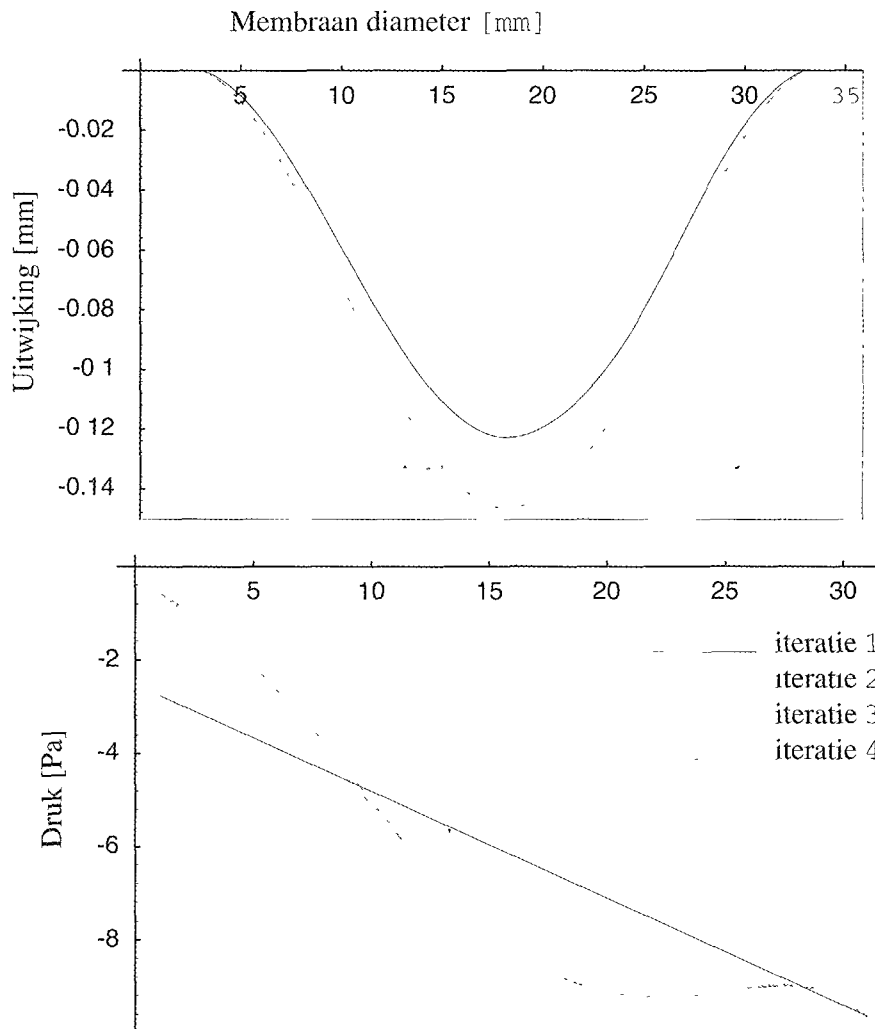
In het volgende wordt een model opgesteld van een micropomp. De hoofdvraag is natuurlijk een ontwerp dat een bepaalde hoeveelheid vloeistof in een bepaalde tijd tegen een druk in kan pompen. Voor ons wetenschappelijk onderzoek echter zijn wij op zoek naar het maximaal haalbare van bepaalde pompen. Het pompmodel wordt daarom opgesteld door naar de geometrie van de pomp te kijken. Later komen we dan terug op de hoofdvraag van zojuist. Het gevaar sluipt nu in dat we een model opstellen vanuit één gezichtspunt en andere vragen gaan beantwoorden dan waarvoor het model bedoeld is. Het is aan de ontwerper om te beoordelen of het model rechtmatig gebruikt wordt. Het verifiëren van het model met experimenten geeft een goede indicatie maar hier zijn geen harde regels voor te vinden.

De onderdelen van de pomp kunnen we

Modelvorming in de Microsysteemtechnologie



Figuur 2 Alle relevante componenten van het hydraulische model van de pomp. Deze componenten kunnen wiskundig geformuleerd worden.



Figuur 3 Membraanuitwijking en drukverdeling tijdens een aantal iteraties in een domein-gekoppelde berekening

eenvoudig opsommen. De pomp bevat een actuator die de vloeistof uiteindelijk moet gaan verplaatsen. Wij kiezen hier voor een actuator die een druk oplegt maar dit zou net zo goed een verplaatsing kunnen zijn. Naast dit drukgenererend element zijn er elementen nodig die de vloeistof in gewenste banen leidt: de in- en uitlaatklep. De vloeistofleidingen aan de inlaat en uitlaat alsmede die tussen de kleppen moeten ook meegemodelleerd worden. Het model ziet er dan uit zoals in figuur 2 wordt getoond.

Voordat we met het wiskundig formuleren beginnen kunnen we al enkele keuzen maken over hoe iets geformuleerd gaat worden. We willen hier het hydraulische gedeelte van de pomp bestuderen. Eén van de uitwendige componenten aan de inlaat bestaat bijvoorbeeld uit een voorraadvat met een vaste hoeveelheid vloeistof bij een bepaalde druk, of uit een vaste druk onafhankelijk van de hoeveelheid vloeistof. Daarnaast zorgen de inlaat en leidingen voor een zekere traagheid in het systeem en natuurlijk een drukval over de leiding. Deze twee termen gelden voor alle leidingen in het systeem.

De inlaat en uitlaatklep fungeren als schakelaars die wel of geen vloeistof doorlaten afhankelijk van de stand van de klep. De stand van de klep wordt door verschillende oorzaken bepaald. Bij kleppen met een eigen aandrijving is de positie redelijk onafhankelijk van de systeemdruk. In dit voorbeeld zijn de kleppen passief, waarbij de stand van de kleppen wel afhankelijk is van de druk over de klep. De pompkamer is onderdeel van de interne leidingen in het systeem maar heeft als extra eigenschap dat het volume van de kamer kan veranderen afhankelijk van de actuatordruk. De druk uit de actuator zelf wordt overgebracht naar een druk in de pompkamer door middel van een membraan. We laten in figuur 3 wel zien dat de drukverdeling op het membraan en de uitwijking van het membraan met een energiedomein-gekoppelde simulatie uitgerekend kan worden.

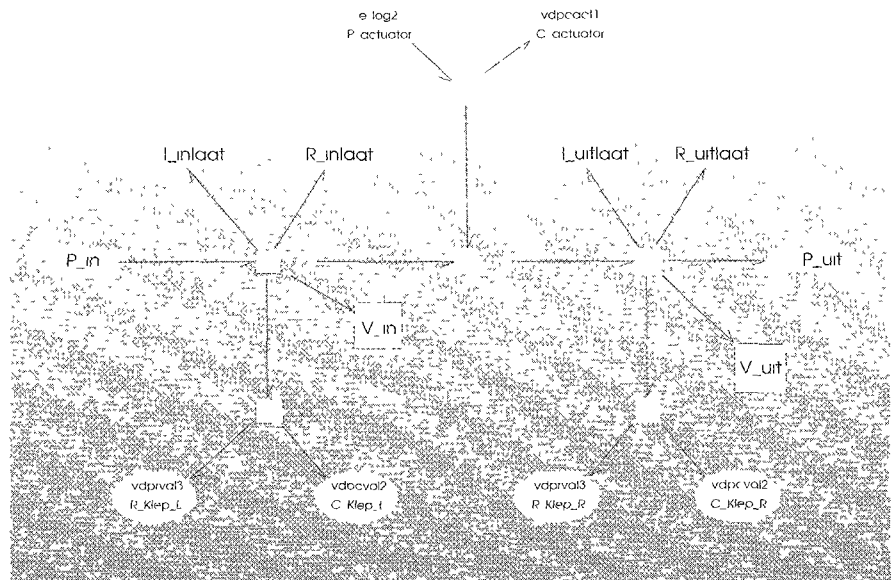
In deze simulaties laten we het effect zien van de druk die veroorzaakt wordt door de stroming onder het membraan. Hier is gebruik gemaakt van een eindi-

ge differentie berekening om de membraandoorbuiing uit te rekenen. Voor de stromingsberekening onder het membraan is gebruik gemaakt van het eindige elementen pakket FIDAP.

De gekoppelde simulaties gaan als volgt. Eerst wordt het stromingsprofiel onder het membraan uitgerekend. Met deze informatie wordt het drukprofiel op het membraan berekend, inclusief een eventuele druk uit de drukkamer van de actuator, waarna de doorbuiing van het membraan berekend wordt. Deze simulatiecyclus wordt herhaald totdat het antwoord niet meer verandert. In figuur 3 is dit na ongeveer vier iteratiestappen. Een softwarepakket dat op dit moment beschikbaar is om dergelijke berekeningen uit te voeren is MEM-CAD, ontwikkeld door het MIT in Boston [2].

Systemmodellering

Als alle submodellen, of onderdelen van de pomp, wiskundig beschreven zijn, moeten deze gecombineerd worden om het totale systeem te kunnen simuleren. Alle beschreven modelleertechnieken kunnen worden gecombineerd door van te voren af te spreken hoe de relaties geformuleerd worden. We hebben gekozen voor een beschrijving met behulp van drukken en debieten; dit komt overeen met een beschrijving in termen van energie, daar het produkt van druk en debiet gelijk is aan energie. De aangegeven bondgraaftechniek is een uitstekende kandidaat om het hele systeem te modelleren. Het is nu eenvoudig om het model uit figuur 2 om te zetten naar een zogenaamde woordbondgraaf-notatie waarin de energierelaties tussen de verschillende onderdelen zijn vastgelegd. Figuur 4 geeft de complete pomp weer in termen van bondgraafen.



Figuur 4 Bondgraaf van een micropomp met twee membraankleppen en een actuorkamer

Alle ovals zijn submodellen, beschreven door de besproken modelleertechnieken. Zij kunnen zelf ook weer uit een bondgraafmodel bestaan. De rechte hoeken in de bondgraaf stellen wiskundige relaties voor welke fysisch "correct" zijn. Bijvoorbeeld een weerstand R stelt een lineaire relatie voor tussen druk en vloeistofstroom, waarin de vloeistofeigenschappen en afmetingen van een kanaal zitten, de zogenaamde standaardnotatie. In principe is het mogelijk om tot op het laagste niveau door te gaan totdat men alleen nog maar elementen heeft welke bestaan uit de standaardelementen uit de bondgraafnotatie. Bij sommige modellen wordt dit ook gedaan maar aangezien er andere modelleertechnieken soms beter toegepast kunnen worden -- ik denk dan met name aan de eindige elementen methode voor mechanische vervormingen --

is het duidelijk dat ook andere modelleertechnieken in de bondgraaf geïntegreerd kunnen worden. In de praktijk wordt dit vaak bepaald door de bekendheid van de ontwerper met verschillende modelleertechnieken. Het bovenstaande model is geanalyseerd en blijkt het gedrag van micropompen te kunnen beschrijven. Op de kwantitatieve analyse van het model, de experimenten aan een pomp, en het verfijnen van het model komen we in een vervolgartikel op terug.

Auteursnoot

Joost van Kuik is afgestudeerd bij de sectie Microtechniek (fac Wtb) aan de universiteit Delft en heeft daarna een ontwerpersopleiding bij het MESA instituut in Twente voltooid. Momenteel specialiseert hij zich in het modelleren en simuleren van micromechanische vloeistofmechanische elementen bij het thema Micromechanica van het MESA Research Instituut. Voor meer gedetailleerde informatie kunt u contact met hem opnemen: tel. 053-4892811, fax 053-4309547, e-mail jvk@el.utwente.nl

Met adverteren in **Mikroniek** bereikt u de
Fijnmechanische bedrijven en produktontwikkelaars