

## IOP Precisietechnologie

Tender 2004



in opdracht van



Ministerie van Economische Zaken

90°



# **IOP Precisietechnologie**

***Tender 2004***



# Voorwoord



Geachte collega,

Dit boekje – het derde in een geplande serie van vier – beschrijft kennis, verzameld in het kader van het IOP Precisietechnologie. Onderzoekers van Nederlandse universiteiten en kennisinstellingen hebben deze kennis opgedaan ten behoeve van de Nederlandse wetenschap en industrie. Elk van de vijf projecten van de tender 2004 is hier kort beschreven in 4 of 5 pagina's met enkele karakteristieke foto's.

U kunt aan de hand van deze samenvattingen inschatten of u in meer detail geïnteresseerd bent in het beschreven onderzoek of in het betreffende onderzoeksgebied. Want als u kennis zoekt, past de vraag meestal niet precies bij wat hier aangeboden wordt.

Om u daarbij verder op weg te helpen is er veel zorg besteed aan een lijst van publicaties waarin meer achtergrondinformatie te vinden is en aan een verzameling adressen waar u met technische of wetenschappelijke vragen terecht kunt. Deze informatie vindt u op de website [www.precisieportaal.nl](http://www.precisieportaal.nl).

Hoewel de onderzoekers in de meeste gevallen zijn uitgevlogen om aan een volgende uitdaging te beginnen, is in de universiteiten en bij instituten als TNO, ECN en NMI in alle gevallen de voedingsbodem achtergebleven waarin het beschreven onderzoek geworteld is.

Een speciaal woord van dank is op z'n plaats voor wetenschapsjournalist Daphne Rixsen, die behoorlijk diepgravende materie wist samen te vatten in artikelen, die leesbaar zijn voor een breed-technisch georiënteerde doelgroep.

**Dr. Lou Hulst,**

*voorzitter van het IOP Precisietechnologie*



# Inhoud

<b>1</b>	<b>Adaptieve optiek</b>	6
	<i>Een grote stap voorwaarts</i>	
<b>2</b>	<b>NANOMEFOS</b>	10
	<i>Een revolutie op het gebied van meettechniek</i>	
<b>3</b>	<b>Microfrezen van matrijzen</b>	14
	<i>Fundamentele proceskennis en nieuwe frees geometrieën</i>	
<b>4</b>	<b>Smartmounts</b>	18
	<i>Drie oplossingsrichtingen voor trillingsisolatie</i>	
<b>5</b>	<b>Microfluidic jet systems</b>	22
	<i>Slimme spuitmondjes</i>	

Een grote stap voorwaarts

# 1 Adaptieve optiek

In optische telescopen gebruikt men deformeerbare spiegels om verstoring door atmosferische turbulentie te corrigeren. In dit IOP-project ontwikkelden onderzoekers van de TU Delft, TU/e en TNO Industrie en Techniek een adaptieve spiegel waarvan zowel het mechanische ontwerp als de elektronica en de aansturing modulair zijn opgebouwd. Deze technologie is een grote stap voorwaarts voor adaptieve optiek-systemen, ook buiten het toepassingsgebied van de astronomie.

Het licht afkomstig van sterren die zich op grote afstand van de aarde bevinden, bereikt de atmosfeer in parallelle bundels zonder onderlinge tijdvertraging. Het licht heeft een vlak golffront, waarvan de vorm echter verandert door atmosferische turbulentie en optische systeemaberraties. Om die verstoring te corrigeren wordt in optische telescopen gebruik gemaakt van adaptieve optiek. Daarbij vervormt een regelsysteem op basis van sensorinformatie een spiegelend

oppervlak zodanig, dat de afwijkingen gecompenseerd worden. Bestaande telescopen gebruiken een adaptieve spiegel met een diameter van vijftien centimeter en enkele honderden actuatoren. Om de resolutie en het contrast te verbeteren, is er behoefte aan een groter spiegeloppervlak met duizenden actuatoren. Dat stelt ook hogere eisen aan de elektronica en het regelsysteem.

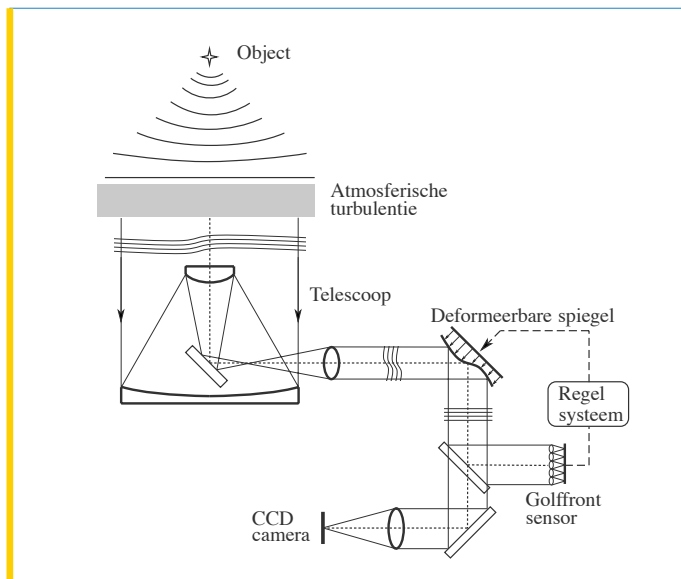
Roger Hamelinck werkte als promovendus in de Eindhovense Dynamics and Control Technology groep aan het ontwerp van de hardware. "Ik heb een zeshoekig standaardbouw-element ontwikkeld, dat 61 elektromagnetische push-pull actuatoren bevat. Die actuatoren bevinden zich op 6 millimeter afstand van elkaar en kunnen het spiegelende oppervlak erboven lokaal op en neer laten bewegen. Door de zeshoekige elementen te combineren, kun je ook veel grotere spiegels vervormen. We hebben zowel een prototype gemaakt met een diameter van 50 millimeter, als één met zeven elementen voor een spiegel met een diameter van 150 millimeter." Door de grote actuatoordichtheid kan de 0,1 millimeter dunne gecoate glazen spiegel een betere fit maken op het binnenkomende golffront. Met behulp van zogenoemde Zernike-polynomen is aangetoond dat de spiegel de benodigde vervormingen werkelijk kan aannemen.



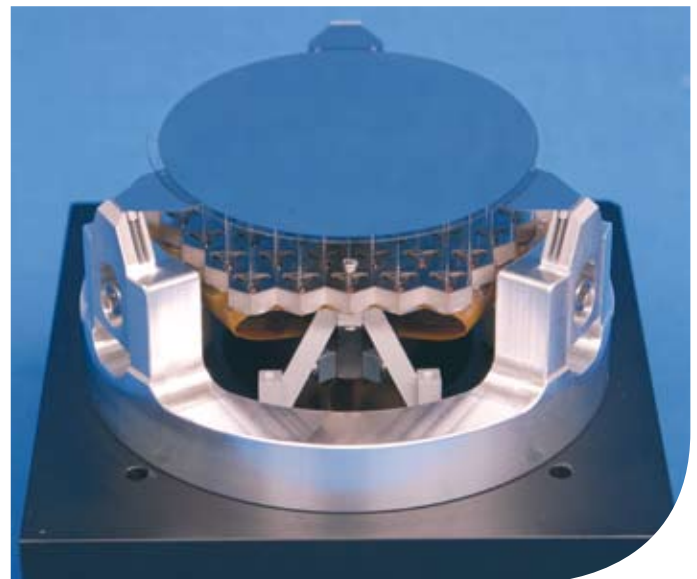
De tweede promovendus, Rogier Ellenbroek, voerde zijn onderzoek naar de benodigde regeltechniek uit in het Delft Center for Systems and Control. Hij vertelt: "Net als bij de hardware wilden we ook het regelsysteem modulair opzetten. Op termijn willen we daarmee 5.000 actuatoren snel genoeg aan kunnen sturen. Dat doe je op basis van de input van de sensoren die de verstoring meten. In bestaande adaptieve optiekssystemen berekent een centrale controller het stuursignaal voor iedere individuele actuator op basis van de signalen van alle sensoren. Maar in het geval van duizenden actuatoren stijgt de hoeveelheid berekeningen dan onaanvaardbaar." Vandaar dat is gekozen voor een oplossing waarbij het regelwerk wordt verdeeld. In plaats van één centrale computer te gebruiken, heeft iedere actuator zijn eigen regelaar, die alleen met regelaars in de buurt communiceert en zo de voor hem meest

relevante informatie binnenkrijgt. Rogier Ellenbroek ontwikkelde en simuleerde daarvoor een aantal regelalgoritmes. "De kunst is om in een gedistribueerde omgeving de prestaties van één centrale regelaar te benaderen. Maar de wiskundige theorie ontbreekt om te kunnen bepalen waar het optimum ligt. Daardoor weten we nu niet hoe ver we met onze algoritmes daarvan verwijderd zijn. Het zoeken naar de beste regelaar is dus nog niet geëindigd." Naast het bedenken en simuleren van de benodigde regelalgoritmes heeft Rogier Ellenbroek samen met Roger Hamelinck veel tijd besteed

*"We gaan nu aan de slag om de technologie te vermarkten, om te beginnen in de astronomie"*



Het principe van adaptieve optiek voor het corrigeren van atmosferische turbulentie in een telescoop



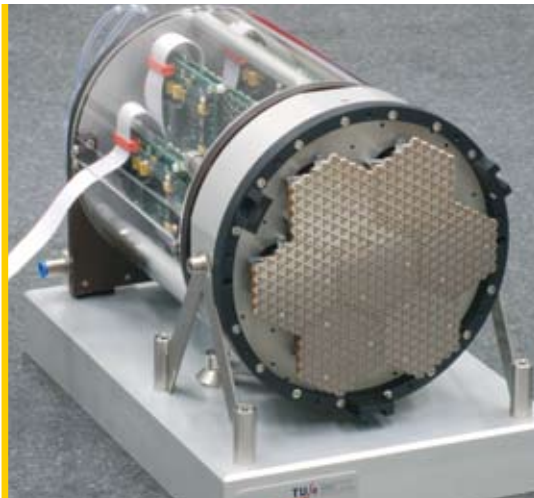
Prototype met een diameter van 50 mm. De spiegel is 0,1 mm dik; eronder is het zeshoekige actuatorgrid te zien dat 61 actuatoren bevat

aan het specificeren, ontwikkelen en testen van de benodigde elektronica. Dat resulteerde in enkele volledig functionele prototypes.

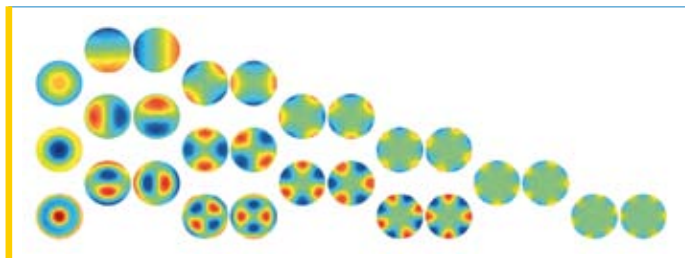
Voor TNO Industrie en Techniek is de ontwikkelde modulaire technologie een grote stap voorwaarts, vertelt senior onderzoeker Niek Doelman. "We hebben een lange historie op het gebied van optomechanische instrumenten voor ruimtevaart en industrie, en adaptieve optiek past daar goed in. We zijn erg tevreden over wat er in dit project is bereikt. De technologie is een grote stap voorwaarts gebracht door een combinatie van factoren: er is door de lage vermogensdissipatie geen koelsysteem nodig, de elektromagnetische actuatoren zijn relatief goedkoop ten opzichte van piëzoactuatoren en we hebben gezien dat alle verstoringen ermee kunnen worden opgeheven. Omdat met dit actuatorontwerp de tussenruimte tussen de actuatoren instelbaar is van 3 tot 30 millimeter heb je ook nog eens een heel schaalbare oplossing.

Nu gaan we aan de slag om de technologie te vermarkten. In eerste instantie richten we ons op de astronomie, van waar we al veel belangstelling hebben gehad."

Ook Nederlands grootste ruimtevaartonderneming Dutch Space heeft met veel belangstelling de voortgang van het project gevolgd, vertelt senior functioneel specialist Marcel Ellenbroek. "Wij schrijven in op projecten van grote spelers zoals de Europese ruimtevaartorganisatie ESA en zijn betrokken bij astronomische projecten van de European Southern Observatory (ESO). Aanleiding om dit project van dichtbij te volgen was onze bijdrage aan de Very Large Telescope van de ESO in Chili en optische instrumenten op satellieten." Adaptieve optiek zou daar een mogelijkheid zijn om nauwkeuriger metingen te kunnen verrichten. Omdat DutchSpace voor dergelijke instrumenten niet zelf de optica ontwikkelt, is TNO een belangrijke partner. "Maar we moeten natuurlijk wel de mogelijkheden kennen, en om die reden zijn de resultaten van dit onderzoek voor ons zeker interessant."

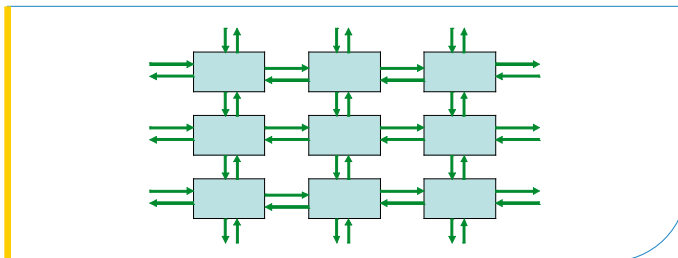


*Prototype met zeven actuatorgrids, in totaal 427 actuatoren, voor een spiegel van 150 mm in diameter*



De vormen die de spiegel aan kan nemen, zoals beschreven door de zogenoemde Zernike-polynomen

Behalve voor astronomie en ruimtevaart is adaptieve optiek ook geschikt voor andere toepassingsgebieden waar vervormingen moeten worden opgeheven, zoals in hightech laserapparatuur, microscopie en oogonderzoek. Ook ASML raakte in het onderwerp geïnteresseerd. Senior scientist Rob Munnig Schmidt, tevens hoogleraar Mechatronic System Design aan de TU Delft, vertelt: “De benadering van de vervormbare spiegel van gecoat glas is voor licht met ultrakorte golflengtes, waar wij in onze lithografiemachines mee te maken hebben, niet geschikt. Daarvoor is de nauwkeurigheid onvoldoende. Maar de algoritmes voor distributed control zijn wél interessant. Adaptieve optiek zit overal in de apparatuur van ASML. En hoewel we nu nog met een relatief klein aantal actuatoren het lenzen- en spiegelstelsel aansturen, zal een gedistribueerde aanpak in de toekomst zeker nodig zijn.” Vandaar dat ASML ook betrokken is bij andere projecten op dit gebied, zoals “Adaptieve optiek, hoge resolutie optica in EUV-projectielenzen” van Pieken in de Delta, en een onderzoek van het STW-programma Smart Optics Systems.



Principe van gedistribueerde regeltechniek, waarbij het regelwerk wordt verdeeld

## PROJECTINFORMATIE

**Project:** Adaptieve optiek

**Doelstelling:** Het ontwikkelen en realiseren van een deformeerbare membraanspiegel met hoge actuatordichtheid en gedistribueerde regeltechniek. Zowel het mechanische ontwerp als de aansturing zijn modulair en uitbreidbaar tot duizenden actuatoren. De actuatoren positioneren het oppervlak van de spiegel met nanometerresolutie, met een geringe warmteproductie en tegen redelijk lage kosten

**Resultaten:** Prototypes met spiegel diameters van 50 mm en 150 mm. Een octrooi en een groot aantal wetenschappelijke publicaties, presentaties op conferenties en vakbeurzen

**Publicaties en meer informatie:** [www.precisieportaal.nl](http://www.precisieportaal.nl), disciplines Control, Optica, Mechanica

**Contactpersoon:** Niek Doelman, [niek.doelman@tno.nl](mailto:niek.doelman@tno.nl), telefoon (015) 269 24 10

Een revolutie op het gebied van meettechniek

## 2 NANOMEFOS

Om de absolute vorm van freeform en asferische optische oppervlakken te kunnen verifiëren, is een systeem nodig dat deze nauwkeurig kan meten.

In deze lacune is voorzien door het IOP-project NANOMEFOS (Nanometer Accuracy NON-contact MEasurement of Freeform Optical Surfaces). TNO heeft de gelijknamige meetmachine inmiddels in gebruik genomen en een commercialisatietraject gestart.

Klassieke sferische lenzen hebben last van ongewenste optische afwijkingen (aberraties). Om de beeldkwaliteit te verbeteren bestaan de meeste optische systemen daarom uit meerdere lenzen en spiegels. Deze afwijkingen kunnen ook worden gecompenseerd door gebruik te maken van freeform of asferische componenten. Dat heeft als voordeel dat het benodigde aantal componenten, de massa en de afmetingen van het systeem omlaag kunnen. Met name voor toepassingen in ruimtevaart, astronomie en lithografie is dat zeer belangrijk.

Het ontwerpen en bewerken van freeform oppervlakken gaat steeds beter, maar het nauwkeurig nameten ervan was tot voor kort een probleem. Vandaar dat de Technische Universiteit Eindhoven samen met TNO Industrie en Techniek en het Nederlands Meetinstituut een machine ontwikkelden, die werkstukken tot een diameter van 500 millimeter met een nauwkeurigheid van 30 nanometer kan meten. Promovendus Rens Henselmans van de TU/e-groep Constructies en Mechanismen onder leiding van Nick Rosielle, vergelijkt de machine met een reusachtige cd-speler: “Het werkstuk dat je wilt meten, een freeform lens of spiegel die zowel hol als bol kan zijn, ligt op een tafel die met een constant toerental ronddraait. Een contactloze sensor wordt hierboven gepositioneerd en bepaalt het hoogteprofiel. Het profiel van een freeform oppervlak kan tot enkele millimeters afwijken van een rotatiesymmetrisch oppervlak.” Hiertoe heeft de sensor een bereik van 5 mm, wat voor de meeste optische oppervlakken voor hoognauwkeurige toepassingsgebieden ruim voldoende is.

Een deel van de vernieuwing zit in het metrologiesysteem waarmee de positie van de sensor wordt bepaald, vertelt Rens Henselmans. Meten ten opzichte van (bewegende) sledes en het machineframe introduceert meetfouten die

vermeden kunnen worden door gebruik te maken van een apart metrologieframe. Voor het metrologiesysteem en bijbehorend interferometriesysteem is een octrooi aangevraagd en toegekend. Een ander vernieuwend element is de optische sensor die voor het project is ontwikkeld door Lennino Cacace (AC Optomechanix). De sensor focuseert een laserbundel op het werkstukoppervlak en meet aan het gereflecteerde licht wat de afstand tot het oppervlak is. "Om zowel holle als bolle oppervlakken te kunnen meten zonder

al te scheef op het te meten oppervlak te staan, kan de sensor van min 45 tot plus 45 graden georiënteerd worden", legt Lennino Cacace uit. "Desondanks moet de sensor ook goed functioneren tot 5 graden scheefstand, omdat bij een freeform oppervlak de lokale hoek over een omwenteling varieert. Voor het compenseren van de meetfouten die daardoor geïntroduceerd worden, hebben we een oplossing bedacht. Gecombineerd met een nieuwe kalibratiemethode is de meetonzekerheid van de sensor extreem laag."



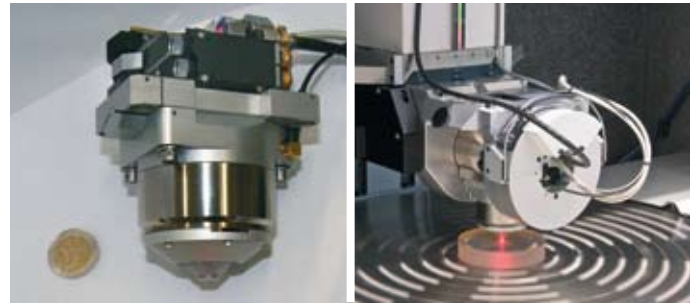
*Het principe van poederstralen*

Dit gedeelte van het onderzoek leidde tot een tweede octrooi en een tweede proefschrift, waarop Lennino Cacace in 2009 hoopt te promoveren.

Maarten Steinbuch, hoogleraar Regeltechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven, vindt het een bijzonder project dat een unieke machine heeft opgeleverd: "De vergelijking met een enorme cd-speler is juist, maar dan wel één met de nauwkeurigheid van een blu-rayspeler. Het ontwikkelen daarvan bleek meer werk dan gedacht, dus we hebben er samen met TNO extra geld in gestoken. Overigens vind ik het die investering meer dan waard. Het belangrijkste resultaat is natuurlijk de meetmachine. Daarnaast is het proefschrift van Rens Henselmans een prachtig naslagwerk waarin het hele mechatronische ontwerptraject is vastgelegd, inclusief een wetenschappelijk verantwoorde onderbouwing van alle ontwerpkeuzes. We gebruiken dat nu in het onderwijs aan alle derdejaars werktuigbouwstudenten. Ook verwacht ik een mooi proefschrift van Lennino Cacace."

Wim van Amstel van WimOptik was lid van de Begeleidingscommissie en is als consultant van dichtbij bij de ontwikkeling van de NANOMEFOS betrokken geweest. "Ik werkte voorheen bij Philips aan het ontwikkelen van sensoren, onder meer voor het meten van asferen", vertelt hij. "Er was in dit IOP-project behoefte aan iemand die met een 'optisch oog' het hele machineconcept nog eens kritisch bekeek. Daar kwam uit dat de oorspronkelijk beoogde sensor de eisen niet zou kunnen halen en dat er een wezenlijk nieuw concept nodig was. Vervolgens heeft Lennino Cacace de sensor ontwikkeld. Om iets met de opgedane kennis en vinding te kunnen

*"Het machineconcept is mechatronisch elegant en het apparaat is volgens de specificaties opgeleverd"*



*De optische sensor*

*Het opmeten van een optisch vlak werkstuk*

doen, hebben we een octrooiaanvraag ingediend." Voor het verder uitontwikkelen en marktrijp maken van de sensor wordt nu samenwerking gezocht met bedrijven die sensoren op de markt brengen. Over de resultaten van het project is Wim van Amstel zeer te spreken: "Het machineconcept van Rens Henselmans is mechatronisch elegant en het apparaat is volgens de specificaties opgeleverd. Dat ook de sensor een octrooi en een proefschrift waard bleek, is een ongepland en bijzonder neveneffect."

Ook Stefan Bäumer, optisch systeemontwerper bij Philips Applied Technologies, heeft aan de Begeleidingscommissie deelgenomen. Hij legt uit: "We ontwikkelen onder andere spuitgietsystemen voor gebruik in verlichtingssystemen of voor camera's van mobiele telefoons. Vooral in LED-verlichting gaat het vaak om asferische of zelfs freeform lenzen. Wij geven aan welke parameters bij de productie kritisch zijn en hoe die gemeten kunnen worden.

Wanneer we ingewikkelde vormen ontwerpen, kunnen we vanaf nu dus doorverwijzen naar NANOMEFOS. Het leuke van dit project is dat het een werkend prototype heeft opgeleverd van een cilindrisch

meetsysteem. Daar zijn er niet veel van, terwijl het voor optische toepassingen veel voordeliger – want nauwkeuriger – is dan een carthesisch systeem. Het aantal toepassingen waarvoor NANOMEFOS gebruikt kan worden, neemt alleen maar toe.”

Het bijzondere aan de NANOMEFOS is dat hij vijf eigenschappen weet te combineren, vertelt promovendus Rens Henselmans die inmiddels voor TNO werkt. “Hij is universeel, je kunt er grote complexe oppervlakken mee meten, met grote nauwkeurigheid, contactloos en snel. Die combinatie is revolutionair. Bestaande meetmethoden zijn gericht op een bepaald type oppervlak of ze gebruiken een fysieke taster. Los van het risico op beschadigingen doen die er vele malen langer over om een werkstuk van deze omvang te meten. Met de NANOMEFOS hebben we die tijd teruggebracht van enkele uren tot een kwartier, en de nauwkeurigheid flink verhoogd.” Het apparaat is intussen verhuisd van de TU/e naar Delft, waar het in het NanoLab een plaats heeft gevonden. Daar gebruikt TNO het bij de fabricage van optische componenten. TNO heeft een commercialisatietraject gestart, en er is een voorstudie gepland om te onderzoeken of een grotere uitvoering van de NANOMEFOS gebruikt kan worden bij de bouw van een 42 meter telescoop door ESO, een Europese organisatie voor astronomisch onderzoek. Die telescoop zal zijn opgebouwd uit 1.100 zeskantige spiegelsegmenten van 1.20 meter in doorsnede. “Het gaat om 150 verschillende asferische vormen. Die zou je met een grotere versie van onze universele meetmachine uitstekend met de gewenste nauwkeurigheid kunnen meten.”



*Het opmeten van een bolle lens. Hier is duidelijk te zien dat de sensor, om loodrecht op het lensoppervlak te kunnen meten, onder een hoek staat*

## PROJECTINFORMATIE

**Project:** NANOMEFOS

**Doelstelling:** Het ontwerpen, bouwen en testen van een universele contactloze meetmachine voor free-form optische oppervlakken tot 500 mm diameter met een meetonzekerheid van 30 nanometer (NANOMEFOS staat voor Nanometer Accuracy NON-contact Measurement of Freeform Optical Surfaces)

**Resultaten:** Een meetmachine met een contactloze optische sensor die aan de specificaties voldoet. Twee octrooien, twee proefschriften, diverse publicaties in wetenschappelijke tijdschriften en presentaties op congressen

**Publicaties en meer informatie:** [www.precisieportaal.nl](http://www.precisieportaal.nl), discipline Optica

**Contactpersoon:** Rens Henselmans, [rens.henselmans@tno.nl](mailto:rens.henselmans@tno.nl), telefoon (015) 269 27 68, Nick Rosielle, [p.c.j.n.rosielle@tue.nl](mailto:p.c.j.n.rosielle@tue.nl), telefoon (040) 247 45 80

Fundamentele proceskennis en nieuwe frees geometrieën

## 3 Microfreesen van matrijzen

Om in spuitgietmatrijzen van gehard staal kleine details aan te brengen, wordt gebruik gemaakt van vonkverspanen. Microfreesen kan de maaktijd en de doorlooptijd aanzienlijk verkorten, maar bij het bewerken van gehard staal is dit een slecht voorspelbaar proces. De freesjes breken snel en de oppervlaktekwaliteit van de matrijs is soms onvoldoende. De onderzoekers van het IOP-project “Microfreesen van matrijzen” onderzochten welke gebruikscondities een optimaal resultaat leveren en ontwikkelden nieuwe freesgeometrieën.

Het probleem bij microfreesen van gehard staal is dat de frees – als de diameter tussen 0,5 en 0,1 millimeter is – snel slijt of zelfs afbreekt. Als gevolg daarvan laat de oppervlaktekwaliteit van het werkstuk sterk te wensen over, legt promovendus Peiyuan Li van de Technische Universiteit Delft uit. “Uit mijn onderzoek is gebleken dat de frees zelf de grootste bottleneck vormt. Ik heb gezocht naar de redenen voor die

slechte performance en mijn veronderstellingen experimenteel getoetst. Vervolgens heb ik oplossingen ontwikkeld om te komen tot een langere standtijd en een hogere oppervlaktekwaliteit.”

Een van de oplossingen is om de freesgeometrie te verbeteren. Voor bestaande microfreesen wordt gebruik gemaakt van dezelfde geometrie als bij gewone frezen. Vooral de punt is dan vrij kwetsbaar. Een stompere hoek (negatieve spaanhoek) resulteert in een aanmerkelijk langere standtijd. Door de frees te voorzien van vier tanden in plaats van twee kan bovendien in dezelfde tijd aanmerkelijk meer materiaal worden verspaand. In dit deel van het project is samengewerkt met freesproducent Van Hoorn Carbide. Het bedrijf leverde de frezen voor het onderzoek en ondersteunde Peiyuan Li bij het ontwikkelen en realiseren van nieuwe freesgeometrieën.

“Vervolgens wil je zo’n frees natuurlijk zo efficiënt mogelijk inzetten”, vertelt Peiyuan Li. “Om tot een goede snijstrategie te komen, heb ik onderzocht welke parameters het snijresultaat beïnvloeden en hoe de freesmachine moet worden ingesteld om de levensduur van de frees te verlengen. In het geval van microfreesen is weinig tot niets bekend over de optimale combinatie van bijvoorbeeld toerental, aanzetsnelheid en



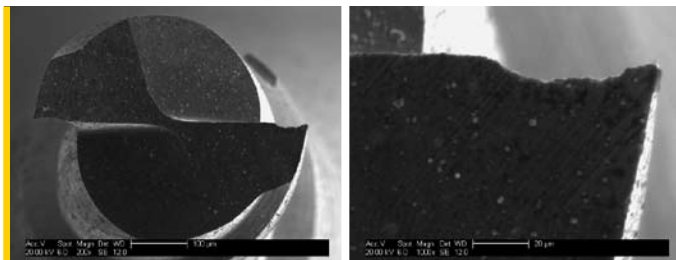
snedediepte. Conventionele verspaningsmodellen gaan uit van aannames die in het microdomein niet gelden. Vandaar dat ik nieuwe modellen heb ontwikkeld voor zowel het gereedschap als het proces.”

Peiyuan Li paste eind 2008 zijn kennis toe tijdens een stage van drie maanden aan de Engelse Cranfield University. Daar freesde hij onder meer werkstukken met *thin ribs*, opstaande randen van 15 micron dik en 800 micron hoog. Ter vergelijking: een menselijke haar is ongeveer drie keer zo dik als zo'n rib. Peiyuan Li vertelt: “Het was erg leuk om een concreet product te bewerken en te laten zien wat er mogelijk is. Thin ribs worden nu zelden mechanisch gemaakt vanwege de grote bewerkingskrachten van de frees op de rib. Daarom was dit een mooie demonstrator.”

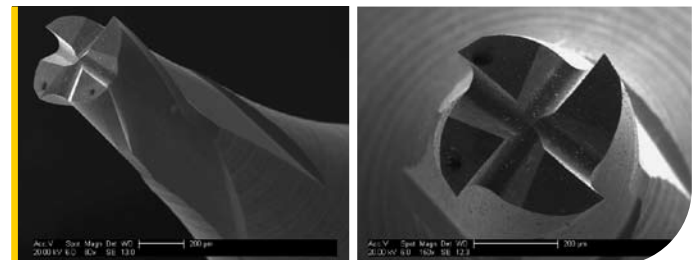
Het project was een samenwerkingsverband tussen de TU Delft en TNO Industrie en Techniek. Han Oosterling van TNO legt uit waarom: “We verrichten veel onderzoek naar het verkorten van de doorlooptijd bij het maken van matrijzen. Daar kan microfreesen goed bij van pas komen. Want wanneer je kleine details kunt microfreesen in plaats van vonkverspanen, hoeft je het werkstuk niet opnieuw op te spannen en hoeft je geen elektrodes te maken. Maar over microfreesen van gehard staal was nog weinig bekend; de vraag was of het industrieel toepasbaar zou kunnen zijn.”



“We weten nu waar de beperkingen liggen en welke parameters van invloed zijn op de performance van het gereedschap en de kwaliteit van het product”, vervolgt Han Oosterling. “TNO heeft een systeem dat programma's genereert voor het aansturen van NC-machines, waarin kennis over microfreesen ontbrak. Die lacune is gevuld.” Maar ook voor hoognauwkeurig frezen buiten het microdomein is de opgedane kennis toepasbaar, vindt hij. “Dat is een ander onderzoeksthema waar we aan werken. Door het IOP-project is



Beschadigde microfrees (bestaande geometrie)



Nieuwe ontwerp van de microfrees (viernslijder)

duidelijk geworden welke eisen je bijvoorbeeld aan de freesmachine moet stellen, en hoe belangrijk het is om de rondloopnauwkeurigheid van de spindel en de aansturing van de assen te beheersen.”

Senior researchmedewerker Lex Westland van Océ Technologies was voorzitter van de Begeleidingscommissie. Hij legt uit: “Bepaalde componenten van inkjet printkoppen zijn gemaakt van grafiet, omdat dit corrosiebestendig is en goede thermische eigenschappen heeft. Voor het bewerken van grafiet is microfreen een prima oplossing, maar wij lopen daarbij tegen vergelijkbare problemen aan als bij gehard staal: de freesjes slijten snel en de maatnauwkeurigheid van

het ontwerp in de nieuwe catalogus worden opgenomen. “Maar niet alleen die nieuwe geometrie is interessant voor ons”, benadrukt Stefan van Weert. “Ook de andere onderzoeksresultaten zijn bijzonder interessant. We nemen ze mee bij de ontwikkeling en verbetering van ons freesassortiment.”

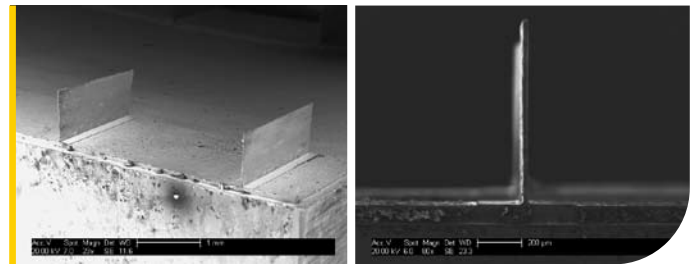
Een van Nederlands oudste machinefabrieken, Hembrug, was eveneens lid van de Begeleidingscommissie. Area sales manager Etienne Catoire vertelt: “Voor Philips hebben we begin jaren 70 een hydrostatisch gelagerde, ultraprecieze draaimachine ontwikkeld voor het verspanen van computergeheugenschijven. Daarna

## *“De frees zelf vormt de grootste bottleneck om tot een langere standtijd en een hogere oppervlaktekwaliteit te komen”*

het werkstuk is soms onvoldoende. Daarom was Océ geïnteresseerd in dit project. We hebben grote behoefte aan fundamentele proceskennis. Vergeet niet dat microfreen, in tegenstelling tot gewoon frezen, pas sinds enkele jaren wordt toegepast. Dat is relatief kort. Door fundamenteel onderzoek als dit weten we nu veel beter waar we op moeten letten.”

Stefan van Weert, R&D-medewerker bij Van Hoorn Carbide, bevestigt ook voor dat bedrijf het belang van de onderzoeksresultaten. “Als producent van hardmetalen frezen willen we op alle fronten onze voorsprong behouden. Microfreen is een relatief nieuwe markt, en dit soort onderzoek helpt ons om in dit topsegment mee te kunnen doen. Vooral in de viersnijder zien we potentie. Niet alleen kun je er sneller mee frezen, deze geometrie reduceert ook de slingering van de frees, zo blijkt uit de experimenten.” Momenteel wordt de nieuwe geometrie verder onderzocht. Bij voldoende positief resultaat zal

besloten we te gaan werken aan de meest nauwkeurige 5-assige freesmachine ter wereld. De eerste serie daarvan met een product nauwkeurigheid van 5 micron wordt nu beproefd bij TNO en het Fraunhofer Instituut. Proeven met gewone frezen wijzen uit dat er door de hydrostatische geleiding beduidend minder nabewerking nodig is en dat de standtijd van frees en matrijs 50 tot 80 procent



*In gehard staal gefreesde thin ribs van 15 micron dik en 800 micron hoog. Ter vergelijking: een menselijke haar is ongeveer drie keer zo dik als deze rib*

hoger is. In combinatie met de geoptimaliseerde freesgeometrie en de kennis van dit onderzoeksproject hopen we nog betere resultaten te bereiken. Microfrezen staat nog echt in de kinderschoenen. Door projecten als deze kunnen de eerste veelbelovende resultaten alleen maar verder verbeteren.”

## PROJECTINFORMATIE

**Project:** *Microfrezen van matrijzen*

**Doelstelling:** *het ontwikkelen van een industrieel betrouwbaar proces voor het microfrezen van gehard stalen matrijzen*

**Resultaten:** *fundamentele proceskennis over microfrezen, nieuwe freesgeometrieën die resulteren in een langere standtijd en een hogere oppervlaktekwaliteit, proefschrift, publicaties in wetenschappelijke tijdschriften, presentaties op conferenties*

**Publicaties en meer informatie:** *www.precisieportaal.nl, discipline Bewerken*

**Contactpersoon:** *Han Oosterling, han.oosterling@tno.nl, telefoon (040) 265 05 51*

Drie oplossingsrichtingen voor trillingsisolatie

## 4 Smartmounts

Elke industrietak heeft last van trillingen. Vooral in de precisietechnologie is dat een groot probleem, want trillingen beperken de nauwkeurigheid van de apparatuur. Terwijl juist aan die nauwkeurigheid steeds hogere eisen worden gesteld. Onderzoekers van drie kennisinstituten – Universiteit Twente, Technische Universiteit Delft en TNO Industrie en Techniek – hebben voor het trillingsprobleem ieder een andere oplossingsrichting uitgewerkt.

Precisieapparaten zoals wafersteppers, elektronen-microscopen en plaatsingsmachines voor elektronische onderdelen hebben last van trillingen. Om machines zo goed mogelijk van vloertrillingen te isoleren wordt de machine zacht afgeveerd met behulp van soft mounts. Dat werkt goed voor het isoleren van zulke indirecte verstoringen, maar niet voor directe verstoringen. Die ontstaan wanneer onderdelen van een machine – het lenzenstelsel van een waferstepper bijvoorbeeld – door omgevingsgeluid gaan trillen ten opzichte van het machineframe. “Tegen zulke directe verstoringen heb je

juist een stijve ondersteuning van de machine nodig, hard mounts dus”, vertelt Tjeerd van der Poel van de Universiteit Twente. “Wij hebben in ons deel van dit project geprobeerd om uitgaande van zo’n stijve ondersteuning, de vloertrillingen toch zo goed mogelijk te isoleren. Daarvoor is een actief systeem nodig.”

De Twentse promovendus nam als basis een statisch bepaalde verbinding tussen vloer en machine met een hoge stijfheid in één richting, en combineerde dit met een regelstrategie. “Die regelstrategie kent twee onderdelen: een feedbackregeling om de resonanties in het systeem te dempen, en een feedforwardregeling om via antikrachten de vloertrillingen te compenseren. De gecombineerde regeling blijkt aardig te werken, maar de performance is nog niet zo goed als die van een soft mount. Een van de beperkingen is de beschikbaarheid van de juiste sensoren: die moeten gevoelig zijn voor een groot frequentiegebied en tegelijkertijd klein in omvang zijn. Die haal je niet zomaar uit de kast.”

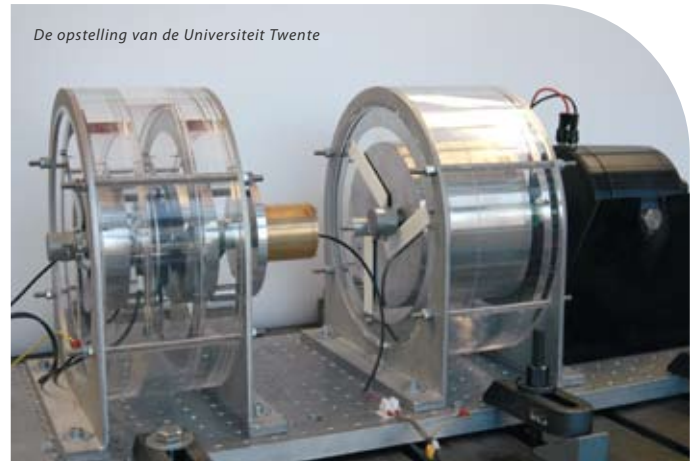
De feedforwardregeling is ontwikkeld op basis van een adaptief regelsysteem met zelflerend vermogen, dat verschillende soorten verstoringen moet kunnen opheffen. Een acceleratiesensor meet de verstoringen, waarna er in de machineondersteuning krachten worden gegenereerd

waardoor de machine niet merkt dat de vloer trilt. Voor het tegengaan van hoogfrequente trillingen bleek de tijdsvertraging tussen het meten en het regelen echter een beperking. “Zelfs in de gerealiseerde demonstrator die in één bewegingsrichting trillingen onderdrukt, kost dat veel rekentijd”, legt Tjeerd van der Poel uit. “Dat wordt echt een probleem in een 3D-opstelling, met zes graden van vrijheid en dus voorzien van zes vloersensoren, zes machinesensoren en zes actuatoren.” In het Smart Mix-programma SMARTPIE (SMART systems based on integrated PIEzo) dat in 2008 van start is gegaan, werkt de Universiteit Twente hieraan verder.

### *“Zo’n project geeft veel inzicht in de machinedynamica en hoe je die kunt manipuleren”*

Waar Tjeerd van der Poel zijn onderzoek baseerde op een hard mount, nam Michiel Vervoordeldonk aan de TU Delft een actieve soft mount als uitgangspunt. Hij vertelt: “Een soft mount is sterk in het isoleren van de machine voor vloertrillingen, ofwel de indirecte verstoringen. Wanneer echt hoge nauwkeurigheid wordt vereist, wordt daaraan een systeem toegevoegd van bewegingssensoren, controllers, versterkers en Lorentz-actuators, waarmee het systeem van actieve demping wordt voorzien. De sensoren van dit regelsysteem pikken echter ook – onbedoeld – de interne resonanties van de machine op. Wat ik heb geprobeerd is om hier nu juist gebruik van te maken, en dat systeem uit te breiden met functionaliteit waarmee ook de interne resonanties gedempt worden. Daardoor wordt de gevoeligheid voor directe verstoringen gereduceerd.”

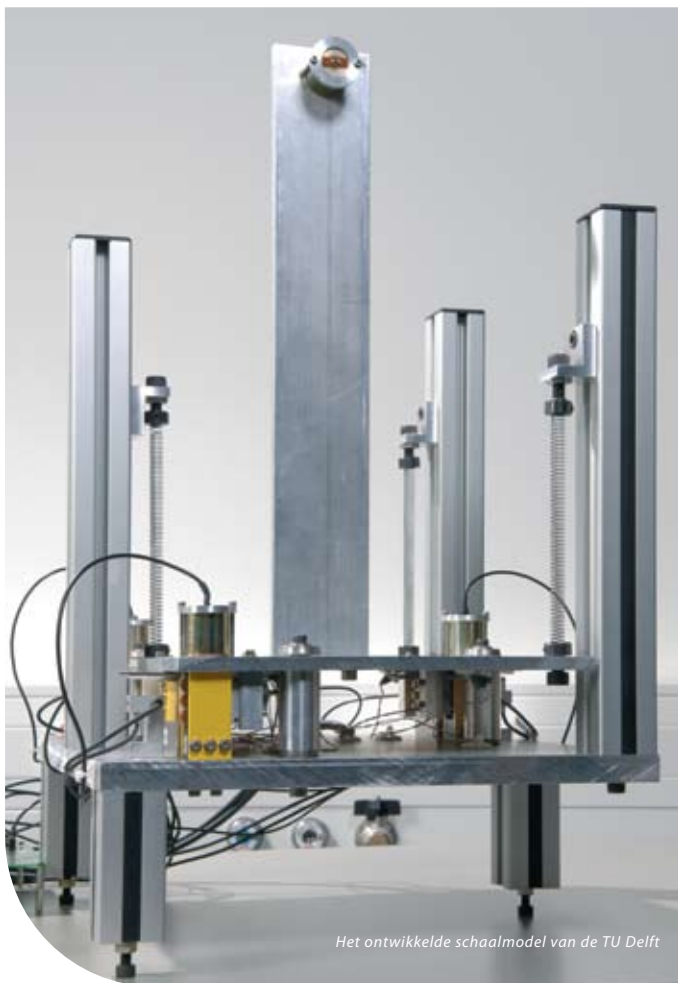
Michiel Vervoordeldonk ontwikkelde in het twee jaar durende Delftse deelproject algoritmes om interne resonanties te dempen.



De gevonden inzichten testte hij met behulp van een realistisch 3D-schaalmodel met een 5 kilo payload, dat het dynamisch gedrag van een werkelijk systeem met een payload van, zeg, 1.000 kilo goed blijkt te vertegenwoordigen. “Er is nu duidelijkheid in welke gevallen het wel werkt en waar juist niet. Met de opgestelde richtlijnen kun je aan de slag om gericht de juiste regelstructuur te implementeren, of om de dynamica van het systeem, zoals de regelaar het ziet, aan te passen.”

Het derde deelproject, dat ook twee jaar in beslag nam, vond plaats bij TNO Industrie en Techniek. Daar ontwikkelde Tom Basten met zijn collega’s van de afdeling Akoestiek een concept om directe trillingen afkomstig van een vacuümpomp te reduceren. Hij vertelt: “Voor precisietoepassingen in vacuüm is een turbovacüümpomp meestal rechtstreeks en star aan het apparaat verbonden. Rondraaiende onderdelen introduceren daar trillingen op de flensverbinding. We hebben onderzocht of je die trillingen kunt reduceren met shakers, een soort luidsprekers die tegenkrachten kunnen uitoefenen. Die sturen we aan met een regelalgoritme dat

heel snel reageert op de trillingen en dan antitrillingen ontwikkelt.” Dat blijkt te werken: met behulp van een demonstratieopstelling is aangetoond dat de trillingen met een factor 5 worden gereduceerd. Of dat voldoende is hangt af van de toepassing, zegt Tom Basten. Het was voor het eerst dat TNO antikrachten toepaste om trillingen in precisieapparatuur te verminderen. Tot nu toe werkte de afdeling

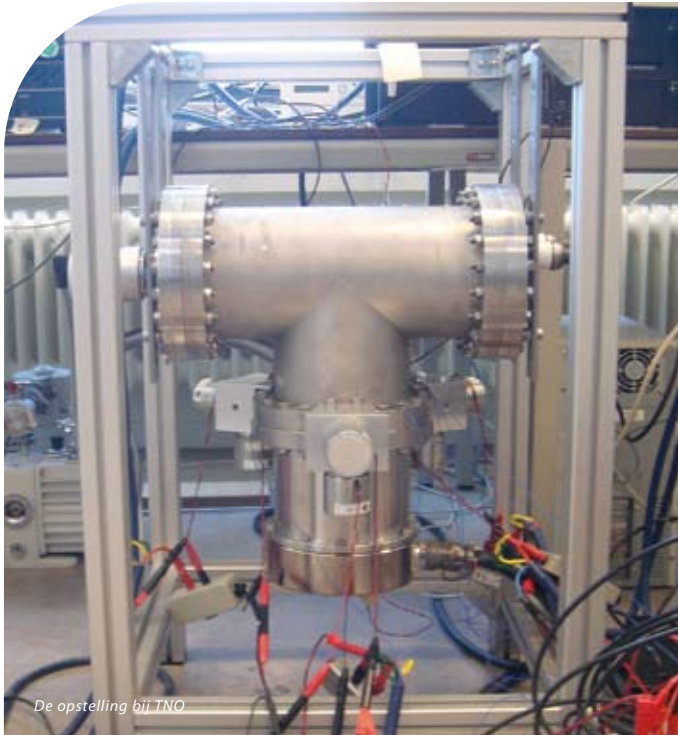


*Het ontwikkelde schaalmodel van de TU Delft*

Akoestiek aan geluid- en trillingsreductie in andere toepassingsgebieden, zoals ventilatiesystemen, scheepsmotoren en geluidsoverlast in de omgeving van Schiphol. De resultaten van dit IOP-project zullen dan ook in die gebieden worden ingezet. Collega's van de afdeling Mechatronica Equipment gaan daarnaast verder met actieve oplossingen voor trillingsreductie in precisieapparatuur.

Zowel Tom Basten als Michiel Vervoordeldonk verrichtten hun onderzoek tijdens de eerste twee jaar van het deelproject van Tjeerd van der Poel. Voor hen had de samenwerking allerlei voordelen. Michiel Vervoordeldonk: “Het was leuk om met elkaar te sparren en werkervaring en inzichten te kunnen uitwisselen. Daar krijg je ook iets voor terug: de mening van anderen over je aanpak en ideeën. Ik combineerde in die tijd mijn promotie-onderzoek met mijn werk bij Philips Applied Technologies en voer nu nog experimenten uit samen met een afstudeerder. Daarna hoop ik te kunnen promoveren.” Ook voor Tom Basten had de samenwerking voordelen: “De interesse van de bedrijven in de Begeleidingscommissie heeft mij duidelijk gemaakt hoe belangrijk dit onderwerp is. Zij gaan met de bestaande oplossingen echt tegen grenzen aanlopen. Zulke bijeenkomsten zijn voor alle deelnemers trouwens een unieke gelegenheid om van gedachten te wisselen.”

Dat vindt ook Ab Visscher, senior consultant bij FEI Electron Optics. Voor hem zijn de vakinhoudelijke contacten tijdens de bijeenkomsten van de Begeleidingscommissie zeer waardevol, vertelt hij. “Het is een ideale gelegenheid om met vakspecialisten van andere bedrijven en van de kennisinstellingen te discussiëren. Bijvoorbeeld over vloertrillingen bij zeer lage frequenties, ver onder 1Hz. Een capacitieve versnellingssensor die wij ook zelf overwogen voor een toepassing, werd eens echt op zijn merites van signaal-ruisverhouding over het hele frequentiebereik beoordeeld. Buiten de concrete



De opstelling bij TNO

resultaten die geboekt zijn in de drie deelprojecten hebben die gesprekken ook meer kennis opgeleverd over de methoden en de complexiteit van trillingsdemping. FEI gebruikt zelf soft mounts voor trillingsdemping van elektronenmicroscopen. Als technicus vond ik de discussies over actieve hard mounts daarom erg interessant. Het gebruik van antkrachten zou verder moeten worden doorontwikkeld, om ook de bredere ruis bij lagere frequenties te kunnen onderdrukken waar wij last van hebben. Ook de prijs zou voor ons een flink stuk omlaag moeten, voordat dit concept levensvatbaar is.”

Voorzitter van de Begeleidingscommissie Jos Gunsing werkt als technologiemanager bij NTS Mechatronics. Dit bedrijf ontwerpt en

bouwt mechatronische systemen en modules die derden op de markt brengen, zoals pick & place machines voor de halfgeleiderindustrie en grote inkjetprinters. “Zo’n project geeft ons veel inzicht in de machinedynamica en hoe je die kunt manipuleren”, licht hij toe. “Het hier verrichte onderzoek is trouwens niet alleen interessant voor ultraprecisietoepassingen, maar ook voor gebruik in bijvoorbeeld grote inkjetprinters. Hoewel de nauwkeurigheid daar van een andere orde grootte is dan bij elektronenmicroscopie, wil je ook hier actief trillingen onderdrukken. Ik zie bijvoorbeeld mogelijkheden voor hoog kwaliteit/groot formaat inkjetprinters in een gebouw naast een drukke snelweg. Door in de toekomst actieve mounts te gebruiken in plaats van dure ingrepen aan het gebouw, kun je veel geld besparen.”

## PROJECTINFORMATIE

**Project:** Smartmounts

**Doelstelling:** Het ontwikkelen van strategieën en ontwerpprincipes om de isolatieperformance van de ondersteuning van apparaten (mounts) te verbeteren, gebruikmakend van verschillende concepten voor vibratie-isolatie en demping

**Resultaten:** 1D-demonstrator van een hard mount met actieve trillingsisolatie, vervolgproject in SMARTPIE-programma. Duidelijkheid over de toepasbaarheid van actieve soft mounts, richtlijnen en een schaalmodel. Algoritmen en richtlijnen voor het gebruik van antkrachten op de starre verbinding tussen vacuümpomp en precisie-apparaat. 1 (op termijn 2) proefschrift(en).

**Publicaties en meer informatie:** [www.precisieportaal.nl](http://www.precisieportaal.nl), disciplines Elektronica, Mechanica, Sensoren, Control

**Contactpersoon:** Johannes van Dijk, [j.vandijk@utwente.nl](mailto:j.vandijk@utwente.nl), telefoon (053) 489 26 01

Slimme spuitmondjes

## 5 Microfluidic jet systems

In steeds meer industriële toepassingen wordt inkjet-technologie gebruikt om vloeistof te verspuiten, zoals bij de productie van OLED-displays of in apparatuur voor medische analyse. De eisen aan de betrouwbaarheid van de printkop zijn hier extreem hoog. Om daaraan tegemoet te komen, hebben onderzoekers van de TU Delft een slimme spuitmond ontwikkeld, voorzien van een sensor. Deze kan realtime informatie verschaffen over de gegenereerde druppel.

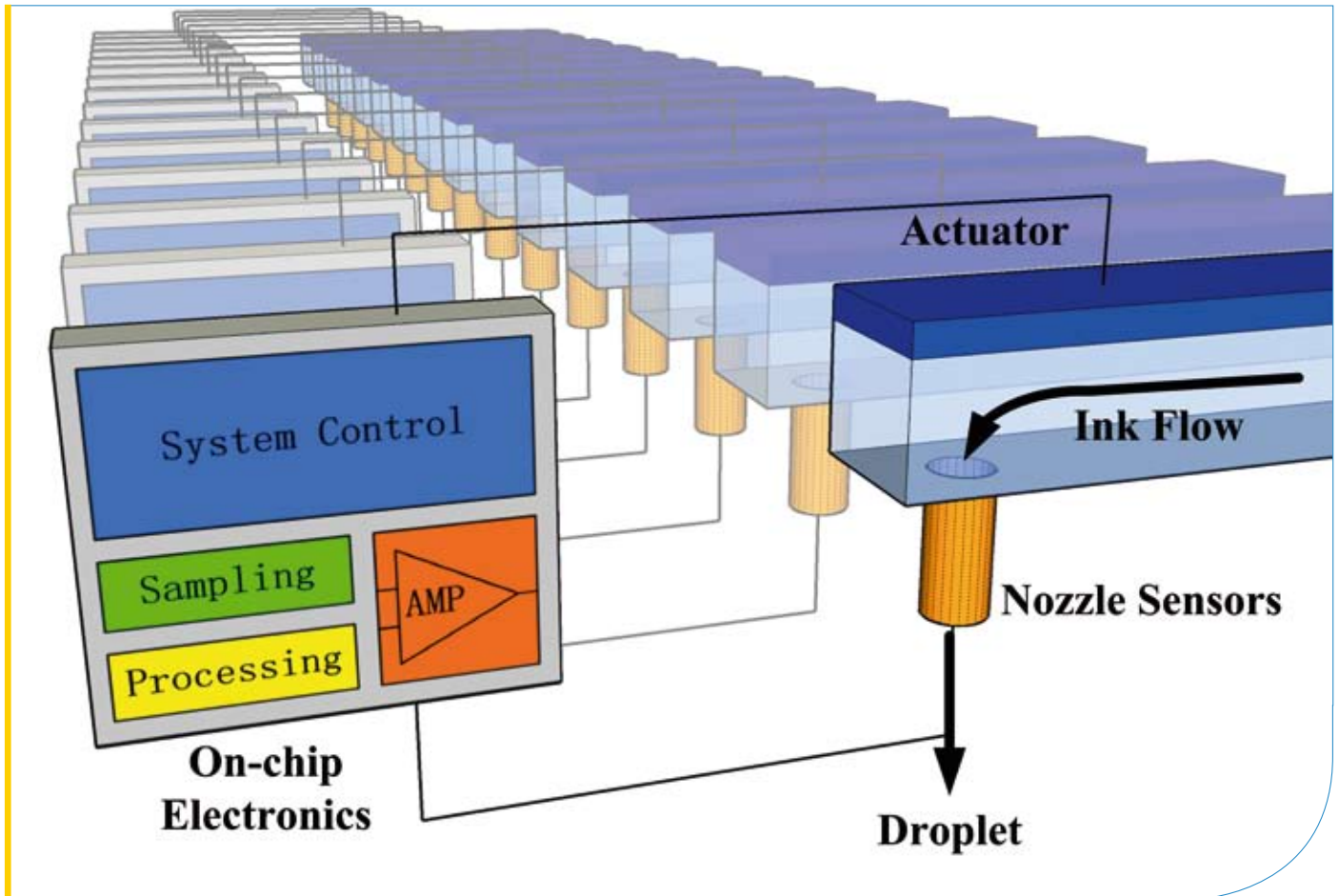
Wanneer een thuisprinter bij het afdrukken van een document per ongeluk een druppel inkt te weinig verspuit, is dat geen ramp. Maar wanneer eenzelfde druppelsysteem een druppel vloeistof mist bij DNA-onderzoek of biochemische tests dan zijn de resultaten niet betrouwbaar. Een OLED display met één niet goed functionerende pixel (van de paar miljoen pixels) wordt onmiddellijk afgekeurd. Bij dergelijke toepassingen moeten microfluidic jet systems, zoals deze druppelsystemen heten, uiterst nauwkeurig de juiste hoeveelheid vloeistof verspuiten, met een constante hoeveelheid vloeistof per druppel en met dezelfde snelheid en richting als zijn voorganger.

Zo'n druppelsysteem – ook wel printkop genoemd – bestaat uit een vloeistofreservoir, een actuator en een of meerdere spuitmondjes. Wanneer de actuator een drukgolf in de vloeistof veroorzaakt, wordt deze door de spuitmond geperst en ontstaan er druppels. Om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de printkop te verhogen, is feedback nodig: is de druppel werkelijk aangemaakt en is de juiste hoeveelheid vloeistof met de juiste snelheid in de juiste richting verstuurd?

“Bestaande printersystemen zijn *open loop*. Je kunt daarmee het systeem voorafgaand aan een printjob kalibreren, maar daarna kun je het proces niet meer beïnvloeden”, vertelt Lina Sarro, hoogleraar bij het Delft Institute of Microsystems and Nanoelectronics (DIMES), waar het IOP-project Microfluidic jet systems plaatsvindt. “Met behulp van een gesloten meet- en regelsysteem kun je wel ingrijpen tijdens het druppelen, maar daarvoor heb je een sensor nodig die realtime informatie verschaft over de gegenereerde druppel. We hebben onderzocht welke sensingprincipes je daarvoor zou kunnen gebruiken. Daarnaast hebben we onszelf tot doel gesteld de sensoroplossing met behulp van microsteemtechnologie in de printkop te integreren.”

Promovendus Jia Wei: “We hebben gekozen voor een capacitatieve sensor waarbij elektrodes de stroming van



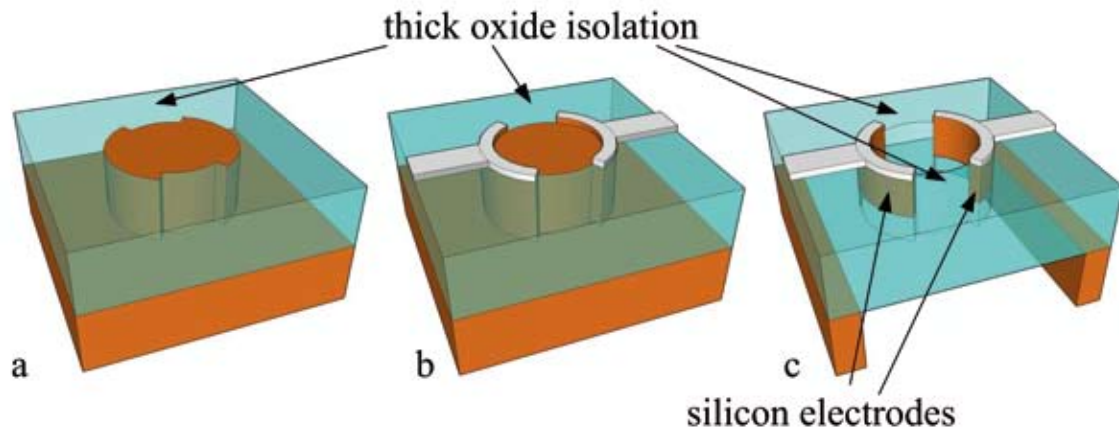


*Principe van een geïntegreerd gesloten meet- en regelsysteem in een inkjetprintkop*

de vloeistof in de spuitmond meten. Zo kunnen we de beweging van de vloeistofmeniscus monitoren. Omdat de technologie simpel moet zijn en de sensor klein om de werking van het systeem niet te beïnvloeden, zijn de elektrodes opgenomen in de wand van het spuitmondje. Het spuitmondje laat dus niet langer alleen inkt door, maar is door de toevoeging van de sensor 'slim' geworden." Om de

elektrodes in de wand te integreren, wordt gebruik gemaakt van hetzelfde fabricageproces als in de chipindustrie: de structuur wordt met behulp van lithografie aangebracht in silicium.

"Dat was niet eenvoudig", zegt Jia Wei, "want de diameter van zo'n spuitmondje is slechts 20 tot 40 micron en de elektrodes staan loodrecht op de siliciumwafer."



*Fabricage van de elektrodes in de spuitmond met behulp van IC-technologie*

Een andere uitdaging was het meten van de uiterst kleine signalen afkomstig van de sensor. Daarvoor werkte Jia Wei intensief samen met een Masterstudent. “Niet alleen wil je met de capacitatieve elektrodes die signalen zelf meten, je wilt ook de nog veel kleinere variaties ertussen – in de orde van grootte van enkele femtofarad – kunnen bepalen”, legt Jia Wei uit. “Je moet dan de ruis weten te scheiden van het echte signaal, en dat echte signaal weten te versterken zonder de ruis te versterken. Toen we eraan begonnen, hadden we eerlijk gezegd geen idee hoe moeilijk het was.”

Om te onderzoeken of de opgezette meetstrategie werkt, is een teststructuur gemaakt waarbij de positie van een minuscuul klein silicium staafje in de spuitmond wordt bepaald in plaats van de positie van de vloeistofmeniscus te meten. Jia Wei: “Het grote voordeel is dat je dat staafje zelf kunt bewegen. Zo kun je de capacitatief gemeten positie vergelijken met de fysieke positie, die je immers

zelf hebt ingesteld. Dat was heel leerzaam. Daarna hebben we ook proeven gedaan met vloeistof.” Er zijn nog experimenten gepland bij Philips Research, om te bepalen hoe de spuitmond zich in een echte spuitkop gedraagt.

Het onderzoek heeft DIMES twee dingen opgeleverd, zegt Lina Sarro. “We hebben veel kennis en ervaring opgedaan met de benodigde fabricagetechnologie voor het aanbrengen van de verticale elektrodes in silicium, en met het meten van kleine capaciteiten. We gaan daarom zeker met dit onderzoek verder. In 2010 zal een post doc uitgebreider testen en voor verschillende soorten toepassingen aanbevelingen opstellen.” De ontwikkelde elektronica voor dit meetsysteem is overigens breder toepasbaar dan alleen voor het meten van vloeistof in een spuitmond: “Je kunt het gebruiken in allerlei systemen waarin je kleine variaties in kleine capaciteiten wilt monitoren. Dat was een onverwachte bonus.”

Océ-Technologies B.V. is één van de bedrijven die via de Begeleidingscommissie bij het project betrokken waren. Die bedrijven hielpen bij het bepalen van de randvoorwaarden en gaven feedback op de oplossingen. Marcel Slot, VP Development van Océ R&D, legt uit waarom Océ geïnteresseerd is in dit onderzoek: “Het is voor zowel de grafische industrie als voor industriële inkjettoepassingen belangrijk om betrouwbaar druppels te kunnen jetten. In de grafische industrie wil je een goede printkwaliteit op zeer hoge snelheid zonder storende strepen door falende spuitmondjes in inkjetkoppen. In een aantal industriële toepassingen is

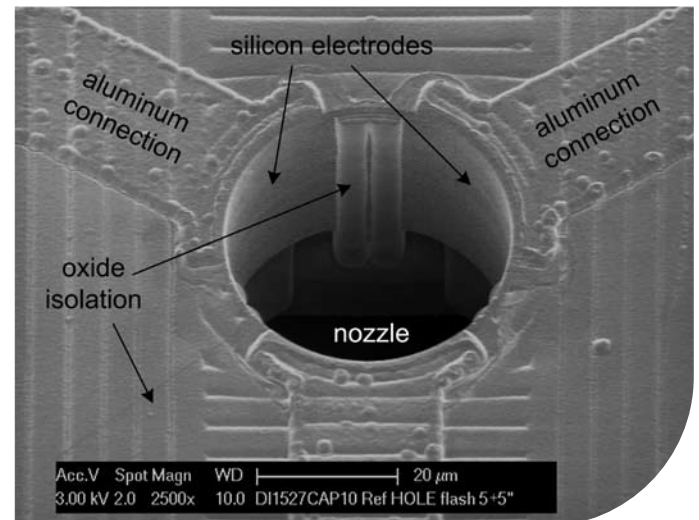
### “Het principe van deze nieuwe en unieke aanpak is nu aangetoond”

het soms zelfs zo dat iedere druppel telt.” Jev Kuznetsov is onderzoeker bij de afdeling Research van Océ. Hij voegt toe: “We hebben daarvoor een eigen *closed loop* systeem ontwikkeld, waarbij de piëzoactuatoren die drukgolven in de vloeistofreservoirs veroorzaken, ook als minuscule microfoontjes ‘luisteren’ naar de terugkaatsende akoestische golven. Op basis van die signalen kunnen we voorspellen of ergens een spuitmondje gaat uitvallen, door bijvoorbeeld luchtbellens of vuil. Vervolgens kun je proactief ingrijpen. Wij meten relatief ver van de spuitmond; het Delftse onderzoek maakt het mogelijk in de spuitmond zelf te meten. De combinatie lijkt erg interessant.”

Voor Océ is het IOP-onderzoek aanvullend op hun eigen onderzoek. “We willen ons op basis van betrouwbaarheid onderscheiden van andere spelers in de inkjetmarkt”, zegt Marcel Slot. “Eén van de mogelijkheden om die betrouwbaarheid verder op te voeren zou gebaseerd kunnen zijn op deze technologie. We willen daarom met

onze eigen printkoppen de slimme spuitmondjes gaan testen en meten, en blijven graag betrokken bij het vervolg.”

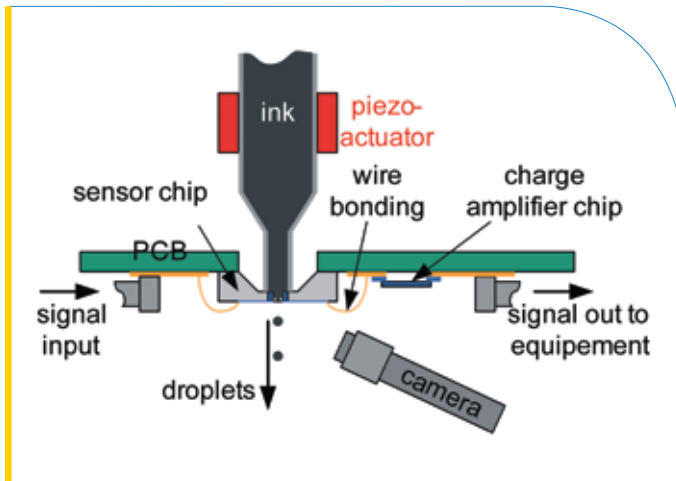
Ook Frits Dijkman, senior director in het Healthcare-programma van Philips Research, was lid van de Begeleidingscommissie. Hij licht toe: “In apparatuur voor DNA-onderzoek of medische diagnostiek wordt inkjetprinting gebruikt om verschillende stoffjes aan te brengen op een plaatje (microarray). Met die stoffjes reageren analieten uit een te onderzoeken sample wel of niet, waardoor je weet of iemand een bepaalde besmetting heeft opgelopen of gevoelig is voor een ziekte. Zo’n systeem moet waterdicht zijn: je wilt zeker weten dat het juiste materiaal op de juiste plek is terechtgekomen. Vandaar dat je een *closed loop* regeling nodig hebt.” Waar Océ voor feedback gebruik maakt van een akoestisch systeem, richt Philips een camera op iedere spuitmond. “Dan zie je elke druppel voorbijkomen en weet je zeker dat het stofje daadwerkelijk is aangebracht. Het bezwaar hiervan is dat je bij



Opname van de spuitmond, uitgevoerd in silicium en voorzien van elektrodes

relatief lage snelheid moet printen. In R&D-omgevingen is dat acceptabel, maar in een ziekenhuis of een pathologisch laboratorium wil je veel hogere snelheden halen.”

De aanpak met een sensor in de spuitmond noemt Frits Dijkman dan ook nieuw en uniek: “Je meet ter plekke, je hebt een supersnelle responstijd en dus realtime informatie over de werking van je apparaat, en je kunt ook bij hoge printfrequenties volgen wat er gebeurt. Het principe daarvan is nu aangetoond.” Op dit moment is alleen de sensor met behulp van IC-technologie aangebracht in de spuitmond. De volgende stap is om ook de benodigde schakelingen te integreren op hetzelfde stukje silicium en dit in te bouwen in een spuitkop.



Testopstelling van de slimme spuitmond in een spuitkop, voorzien van een camera

## PROJECTINFORMATIE

**Project:** Microfluidic jet systems

**Doelstelling:** ontwerp en realisatie van een betrouwbaar en robuust microfluidic jet systeem met een nauwkeurig druppelvolumen van 1 tot 10 pL, grote plaatsingsprecisie en een spuitfrequentie van 40 kHz

**Resultaten:** een slim spuitmondje voorzien van een capacitatieve sensor, geïntegreerd met behulp van microsysteemtechnologie, kennis over het meten van kleine capaciteitvariaties, en diverse publicaties in wetenschappelijke tijdschriften en presentaties op congressen

**Publicaties en meer informatie:** [www.precisieportaal.nl](http://www.precisieportaal.nl), discipline Microsysteemtechnologie

**Contactpersoon:** Lina Sarro, [p.m.sarro@tudelft.nl](mailto:p.m.sarro@tudelft.nl), telefoon (015) 278 77 08







## Programmainformatie

Precisietechnologie is nodig om producten te maken, die een hoge vorm- of maatnauwkeurigheid moeten hebben, of om producten of onderdelen snel en zeer precies te positioneren. De technologie is van toenemend belang voor uiteenlopende producten en apparaten, zoals microsystemen, gsm-telefoons, wafersteppers, apparaten voor massa-opslag van data, kopieerapparaten, optische instrumenten, medische apparaten en instrumenten voor sterrenkundigen en ruimtevaart.

### **SenterNovem, voor innovatie en duurzaamheid**

*Een sterk innovatief bedrijfsleven in een leefbare, duurzame samenleving. SenterNovem stimuleert duurzame economische groei door een brug te slaan tussen markt en overheid, nationaal en internationaal. Bedrijven, (kennis)instellingen en overheden kunnen bij SenterNovem terecht voor advies, kennis en financiële ondersteuning. Wij verbinden partijen die met passie en gedrevenheid willen werken aan een duurzame en innovatieve samenleving. SenterNovem is een agentschap van Economische Zaken en realiseert beleid in opdracht van de Rijksoverheid op een professionele, effectieve en inspirerende wijze. Meer informatie: [www.senternovem.nl](http://www.senternovem.nl), [informatiepunt@senternovem.nl](mailto:informatiepunt@senternovem.nl) of telefoon (030) 239 35 33.*

Juliana van Stolberglaan 3  
Postbus 93144  
2509 AC Den Haag  
Telefoon (070) 373 53 41  
Telefax (070) 373 51 00

[www.senternovem.nl/iopprecisietechnologie](http://www.senternovem.nl/iopprecisietechnologie)  
[kennisinfrastructuur@senternovem.nl](mailto:kennisinfrastructuur@senternovem.nl)

11OPPrec0901

Hoewel deze publicatie met de grootst mogelijke zorg is samengesteld, kan SenterNovem geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten. Bij publicaties van SenterNovem die informeren over subsidieregelingen geldt dat de beoordeling van subsidieaanvragen uitsluitend plaatsvindt aan de hand van de officiële publicatie van het besluit in de Staatscourant.

The logo for SenterNovem features the company name in a blue, sans-serif font. A blue curved line arches over the text, starting under 'S' and ending under 'm'. A horizontal blue line is positioned below the text.

**SenterNovem**