

# Polijstrobot met ingebouwd afname meetsysteem

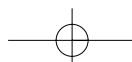
*Een nieuw type polijstmachine met daarin opgenomen een systeem om tijdens het bewerken de afname te monitoren zal besproken worden. De machine is gebaseerd op FJP: Fluid Jet Polishing, terwijl het meetsysteem gebruik maakt van shearing interferometrie. Zowel FJP als het meetsysteem zullen verklaard worden en de eerste resultaten behaald met deze nieuwe robot zullen dit artikel besluiten. De besproken opstelling, een bewerkingsapparaat met daarin opgenomen een systeem om de afname tijdens de bewerking te meten, is het resultaat van een IOP onderzoek.*

• Hedser van Brug • Michiel Dorrepaal •

## Introductie

Tijdens het aanmaken van optische componenten komt altijd het moment dat de vorm al bijna goed is maar dat de ruwheid van het werkstuk nog veel te hoog is. Op dit moment begint doorgaans het polijstproces. Tijdens het polijsten wordt op zeer gecontroleerde, ofwel trage, manier materiaal verwijderd zonder de vorm van het oppervlak veel te beïnvloeden. Veelal blijkt dat tijdens het polijsten de vorm niet helemaal behouden blijft of dat de vorm voor het polijsten nog niet geheel juist was.

Op dat moment begint het proces van correctief polijsten. Dit is een bewerking op een gepolijst oppervlak waarbij alleen daar waar het nodig is materiaal weggenomen wordt totdat de vorm aan de eisen voldoet. Een belangrijke eis bij correctief polijsten is dat de ruwheid aan de eisen blijft voldoen (deze moet voldoende laag blijven) en dat er nooit meer materiaal weggehaald wordt dan nodig. Het is altijd mogelijk materiaal weg te halen maar aanbrengen daar waar teveel verwijderd is, is aanzienlijk moeilijker. In de praktijk komt het te ver door polijsten op één positie er



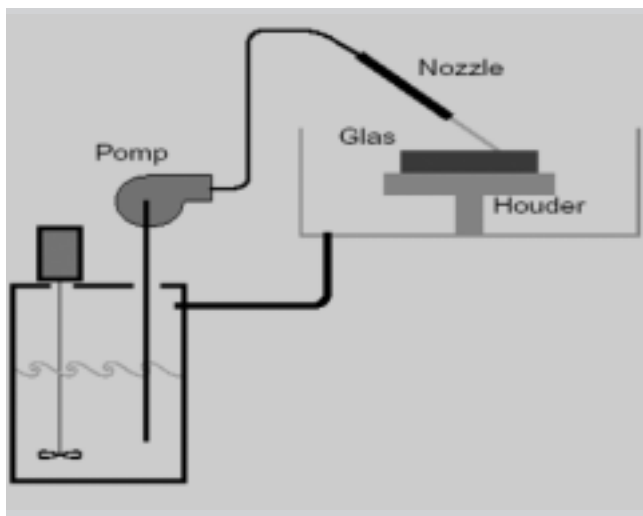
## FLUID JET POLISHING

op neer dat alle andere posities ook bewerkt moeten worden. Om er voor te zorgen dat de afname correct verloopt wordt meestal iteratief te werk gegaan. In de eerste bewerkingsslag wordt bewust te weinig afgenomen. Daarna wordt het werkstuk gemeten en vervolgens wordt het afname profiel berekend en de afname snelheid geijkt aan de eerste slag. Hierdoor kan een tweede iteratie gemaakt worden. Veelal vindt de bewerking op een andere machine plaats dan de meting, hetgeen er toe leidt dat veel tijd nodig is voor het uitlijnen van het werkstuk op de verschillende apparaten. Deze methode is erg tijdsintensief. Dit is de hoofdreden van het apparaat zoals hier beschreven. Doordat we tijdens de bewerking kunnen meten kunnen we altijd precies op tijd stoppen met de afname en is de iteratieve behandeling niet nodig.

### Fluid Jet Polijsten

Bij standaard polijst methoden worden zeer kleine deeltjes over het oppervlak heen gehaald waarbij de deeltjes in doek of pek ingevangen zitten. Een bekende alternatieve methode is bowl feed polishing waarbij de polijst deeltjes concentratie tijdens het polijsten steeds lager gemaakt wordt door ze te laten bezinken in een water bak waarbinnen gepolijst wordt.

Hoewel dit goede, en in de praktijk bewezen methodes zijn om optisch componenten te vervaardigen was er behoefte aan een alternatieve methode. Deze werd gevonden in Fluid Jet Polishing (FJP). Bij FJP wordt een slijppoeder geroerd in water en via een pomp gespoten op het te be-



Afbeelding 1: Schematische weergave van de componenten benodigd voor een FJP opstelling.

werken oppervlak. Slijppoeders worden doorgaans gebruikt tijdens het slijpen van een oppervlak. Dit zijn relatief grote en harde deeltjes die, indien gebruikt voor slijpen, veel materiaal kunnen afnemen. Door deze deeltjes via water op het oppervlak te spuiten komt slechts een zeer klein deel van de deeltjes in contact met het oppervlak doordat de deeltjes in de stroming gevangen blijven. Hierdoor wordt het afname proces dat tijdens slijpen "brittle" is, omgezet naar "ductile". De Nederlandse termen hiervoor zijn bros en taai. Bij een brose methode worden de stukken uit het oppervlak geslagen, dit gebeurt bijvoorbeeld tijdens het slijpen. Bij een taaie methode wordt materiaal er afgeschaafd en zal de overblijvende ruwheid vele malen lager zijn dan die tijdens een brose bewerking.

De deeltjes die door de waterstraal op het oppervlak gespoten worden doorlopen een baan die bij benadering tangentieel is aan het oppervlak en ze schaven dan ook als het ware materiaal weg van het oppervlak. De afname die hiermee verwezenlijkt wordt is traag maar wel zeer precies met als grote voordeel dat de oppervlakte kwaliteit vergelijkbaar is met gepolijste oppervlakken. Dit maakt FJP zeer geschikt voor het correctief polijsten van optische oppervlakken. FJP is ontdekt tijdens het promotie onderzoek van Oliver Faehnle<sup>1</sup> aan de TU Delft en verder uitgezocht door Silvia Booi<sup>2</sup> tijdens haar promotie onderzoek.

FJP is een relatief eenvoudige methode met zeer grote potentie. Doordat het afname proces "ductile" is wordt altijd een zeer glad (lage ruwheid) oppervlak verkregen. Hierdoor is het bij uitstek geschikt voor het aanpassen van de vorm van reeds gefabriceerde componenten die net niet aan de eis voldeden. Wat voor FJP benodigd is zijn de volgende bouwstenen: een vat om de slurry in te mengen (water met daarin slijp of polijst poeders), een pomp om de slurry onder relatief lage druk (1 – 10 bar) via een spuitmond (de zgn. nozzle) op het oppervlak te spuiten. De afstand tussen nozzle en het oppervlak is niet kritisch, dit in tegenstelling tot andere slijp en polijst processen waarbij de afstand instelling een maat is voor de bewerkingssnelheid (de kracht op het oppervlak). Een schets van een zeer basis FJP systeem is getoond in Fig.1. De slurry die na gebruik van het oppervlak stroomt kan opgevangen worden om vervolgens terug te leiden naar het vat waarin de slurry gemengd wordt.

Tijdens het promotie onderzoek van Silvia Booi is er binnen het IOP kader (innovatief onderzoeks programma) begonnen met een onderzoek naar het op de machine meten van de afname, ofwel de vervorming van het werkstuk door de bewerking. Binnen dit onderzoek wilden we een meetsysteem ontwikkelen waarmee we op de bewerkingsmachine de

materiaal afname zouden kunnen meten tijdens het bewerken. Dit meetsysteem is ontwikkeld en om uit te testen is een polijstrobot gemaakt die gebaseerd is op FJP. Deze robot is de eerste stap om het FJP proces beschikbaar te maken voor de markt.

### De FJP polijstrobot

In samenwerking met het Engelse Zeeko<sup>3</sup> is de op FJP gebaseerde polijstrobot gerealiseerd. Bij Zeeko is hiertoe hun bestaande 600mm machine omgebouwd, dusdanig dat de FJP spuitkop ingebouwd kon worden en dat er aansluitingen zouden zijn voor de in-situ afname monitor, zie Fig.2.

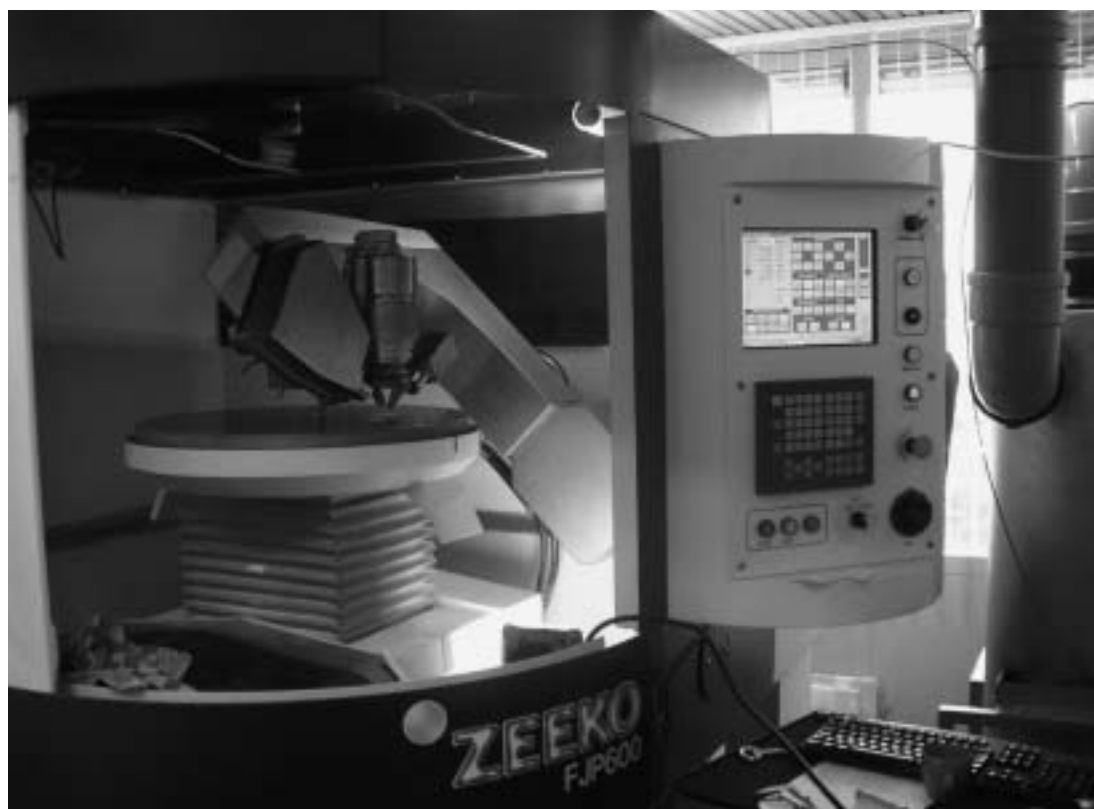
De polijstrobot bevat alle bewegingsvrijheden om ieder oppervlak te kunnen bewerken. Het werkstuk staat op een spindel (rotatie om de verticale as) die in hoogte veresteld kan worden en in de diepte kan verplaatsen. De FJP kop kan in de dwarsrichting verschuiven en om de twee orthogonaal op de spindel as staande assen roteren. De spuitmond (de nozzle) is geplaatst onder een hoek in een houder die zelf nog rond zijn eigen lengte as kan roteren. Het systeem wordt tijdens de bewerking zo uitgelijnd dat het contact punt van het water met slijpmiddelen op het oppervlak

samenvalt met de rotatie as van de spuitkop houder. Hierdoor wordt ieder punt van het oppervlak dus uit alle mogelijke richtingen bewerkt. Dit heeft een gunstig effect op de resulterende ruwheid. Door de spuitmondjes onder een andere hoek in de houder te plaatsen kan de hoek van inval t.o.v. het oppervlak nog ingesteld worden. FJP is bruikbaar voor het bewerken van alle soorten glas en keramiek, maar ook voor metalen.

### IIPM

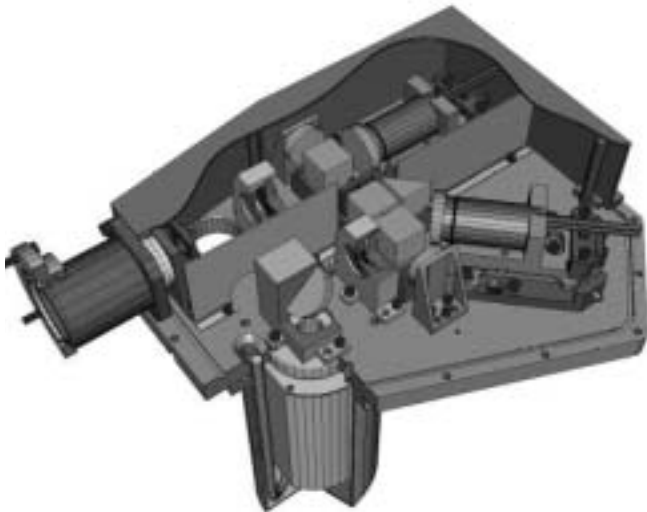
Het meetsysteem dat binnen de polijstrobot geplaatst is, is door gebrek aan een betere benaming IIPM gedoopt. IIPM staat voor Interferometrisch In-Proces Monitoring, hetgeen zoveel zegt als dat via een interferometrische meetmethode de afname van het werkstuk, tijdens de bewerking, in de gaten gehouden wordt.

IIPM is een interferometer waarbinnen gebruik gemaakt wordt van shearing. Dit is de techniek waarbij een bundel niet interfereert met een apart aangemaakte bundel (de zogenaamde referentie bundel), maar met een verschoven versie van zichzelf. Hierdoor wordt niet de echte fase van de laser bundel gemeten maar de afgeleide fase in de richting van de afschuiving. Hierdoor wordt de interfe-



Afbeelding 2:  
Overzicht van de  
ZEEKO FJP 600.  
Zichtbaar zijn de  
interferometer, de  
FJP spuitkop en de  
bedieningszuil.

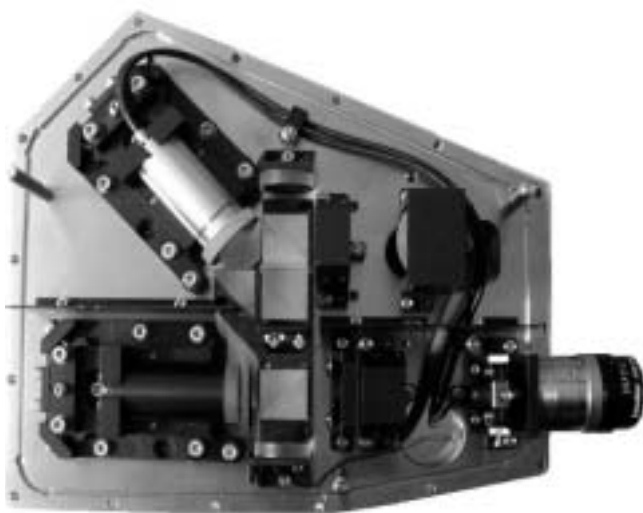
## FLUID JET POLISHING



Afbeelding 3a: Schets van het IIPM systeem.

rometer enerzijds veel minder gevoelig voor bewegingen langs de richting van de laser bundel, en is anderzijds de gevoeligheid van de meting in te stellen via een aanpassing van de shear grootte (de grootte van de afschuiving van de ene bundel t.o.v. de andere bundel). Een geschetste versie van de interferometer is getoond in Fig.3a, terwijl in Fig.3b een foto van de gefabriceerde hardware te zien is.

Binnen IIPM wordt gebruik gemaakt van TPU, temporal phase unwrapping. Dit is een techniek waarbij niet de fase zelf gemeten wordt zoals bij standaard interferometers, maar de veranderingen in de fase als functie van de tijd, ten gevolge van de bewerking. Het grote voordeel van



Afbeelding 3b: Foto van het gerealiseerde IIPM systeem.

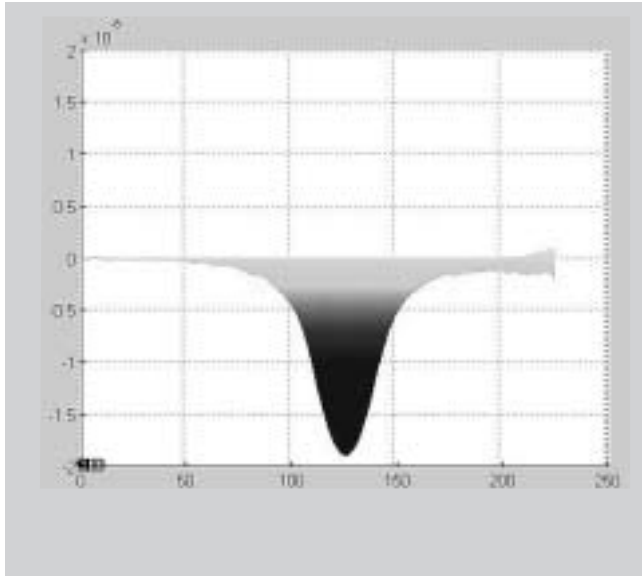
TPU is dat de eisen die aan de optiek binnen de interferometer gesteld worden veel minder streng hoeven te zijn.

Als laser gebruiken we een batterij gevoede diode laser. Hiervan is de coherentie lengte groot genoeg en is de output stabiel. De divergente bundel die uit de diode laser komt wordt gecollimeerd en gericht op het oppervlak dat bemeten wordt. De aan het oppervlak gereflecteerde bundel wordt in de interferometer ingevangen. Hiervan wordt een deel afgesplitst en verschoven (shearing). De twee bundels worden vervolgens nog een keer gesplitst dusdanig dat we twee interferogrammen tegelijkertijd kunnen creëren, zij aan zij op de kamera, een digitale CCD. Uit twee van deze interferogrammen kunnen we in principe de fase berekenen. Dit doen we echter niet. We nemen deze twee interferogrammen, bewerken het oppervlak, en nemen de volgende interferogrammen. Uit deze vier interferogrammen kunnen we nu de verandering in het oppervlak berekenen. Door al deze veranderingen op te tellen wordt de totale afname verkregen.

### Resultaten

Voordat het meetsysteem in de polijstrobot ingebouwd werd is een proefmeting verricht op een statisch testsample. Dit sample is een vlak stuk glas dat in een FJP test setup bewerkt is, dusdanig dat er een aantal losse putjes in zitten. Door afwisselend de vorm van dit sample te meten en vervolgens het sample te verschuiven, kon een film gemaakt worden van de vormverandering. Daar waar het kuiltje eerst lag werd het sample als het ware opgevuld, en waar het kuiltje heen schoof werd materiaal verwijderd. Op de positie waar het kuiltje bij aanvang aanwezig was ontstond een berg en overal waar het kuiltje lang kwam ontstond tijdelijk een dal. De vorm van de berg en het dal waren in hoge mate gelijk. De nauwkeurigheid van de berg hoogte t.o.v. de diepte van het kuiltje lag in de buurt van onze eis van 20nm absoluut. Doordat deze metingen in een schone optische ruimte uitgevoerd werden zijn de behaalde resultaten, zie bijvoorbeeld Fig.4, erg goed. De opstelling stond erg stabiel opgesteld en de optiek werd door het verschuiven niet nat en vies, hetgeen tijdens het in de robot meten wel gebeurt.

Na het inbouwen van de IIPM in de FJP-robot, zie Fig.5 zijn een groot aantal tests uitgevoerd. Tijdens deze experimenten is er telkens een opname gemaakt en vervolgens weer een korte tijd gespoten met het FJP systeem. Direct na het spuiten moesten de optische vensters schoon en droog gemaakt worden (voorlopig is dat nog handwerk) alvorens een meting gedaan kon worden.



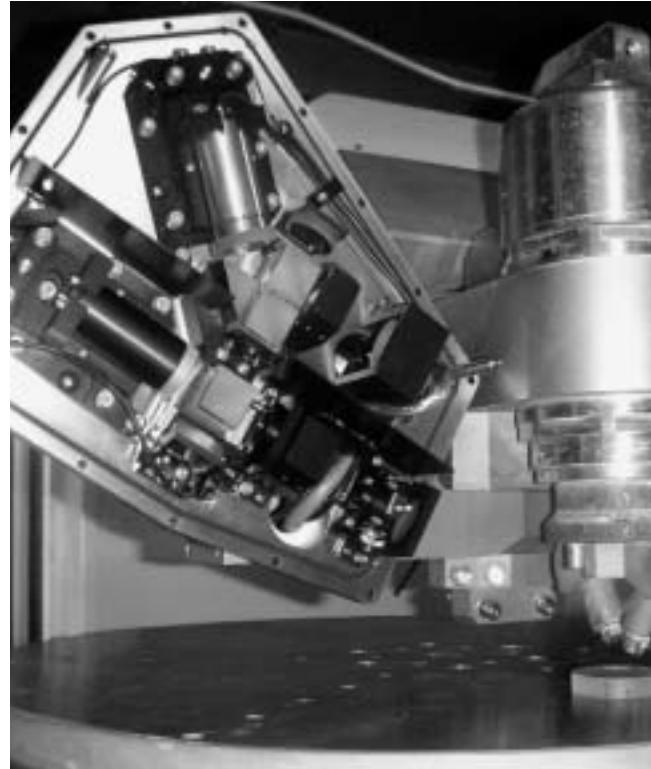
Afbeelding 4: Resultaat van de proefmeting. De ontstane berg is hier als dal getoond. Dit is met name handig voor de echte metingen. We zijn met name geïnteresseerd in de diepte van de dalen en die is beter te beoordelen als die boven het oppervlak uitsteekt. Vandaar dus dat we de afname in tegengesteld teken aangeven.

Tot op heden hebben we onderzoek gedaan naar de afname spotvorm en eerste tests om te zien of we met kennis over deze vorm een oppervlak ter grootte van 10 bij 10 spots kunnen bewerken, dusdanig dat een vlakke en gladde bodem verkregen wordt. Dit is gelukt met bewerkingsporen van ongeveer 1nm hoogte, t.g.v. de matige overlap tussen de verschillende gemaakte FJP sporen.

Het doel voor de nabije toekomst is om de aansturingsoftware aan te passen zodat we een afname profiel kunnen invoeren waarop het programma de verblijftijd voor alle punten van het te bewerken oppervlak en het bewerkingspad automatisch bepaalt. Vervolgens moet de software dan ook nog aangepast worden zodat naast elkaar liggende punten gemeten kunnen worden. Zodra dit operationeel is zullen we in staat zijn om willekeurig welk optisch oppervlak te vormen binnen de specificaties zonder het oppervlak uit zijn opspanning te halen om te meten.

## Conclusies

Als conclusie kunnen we stellen dat het meetsysteem werkt en dat de polijstrobot materiaal kan bewerken met resulterende oppervlakte ruwheden van iets boven de 1nm rms.



Afbeelding 5: Detail foto van het IIPM systeem in de FJP-robot.

Experimenteel is het aangetoond dat we tijdens de bewerking de afname kunnen meten. De zinvolle en noodzakelijke uitbreidingen aan het systeem zijn aangegeven. Deze uitbreidingen leiden tot een systeem voor het automatisch correctief polijsten van free-form oppervlakken.

## Referenties

- [1] O. W. Faehnle, "Shaping and finishing of aspherical optical surface," proefschrift TU Delft (1998)
- [2] S. M. Booiij, "Fluid Jet Polishing, possibilities and limitations of a new fabrication technique," proefschrift TU Delft (2003)
- [3] Voor informatie: [www.zeeko.co.uk](http://www.zeeko.co.uk)

TNO Industrie en Techniek  
 Stieltjesweg 1  
 2628 CK Delft  
 Voor informatie: [eddy.vanbrug@tno.nl](mailto:eddy.vanbrug@tno.nl)