

Vakblad voor precisietechnologie en fijnmechanische techniek en orgaan van de NVPT. Mikroniek geeft actuele informatie over technische ontwikkelingen op het gebied van mechanica, optica en elektronica. Het blad wordt gelezen door functionarissen die verantwoordelijk zijn voor ontwikkeling en fabricage van geavanceerde fijnmechanische apparatuur voor professioneel gebruik, maar ook van consumentenproducten.

Uitgave:

Twin Design bv
Postbus 317
4100 AH Culemborg
Telefoon: 0345-519525
Fax: 0345-513480
E-mail: mikroniek@twindesign.nl

Uitgever:

Andries Harshagen / Renate Mouton

Abonnementen:

Twin Design bv, Culemborg

Abonnementkosten:

Nederland: € 55,- per jaar ex BTW
Buitenland: € 70,- per jaar ex BTW

Hoofredactie

Renate Mouton
E-mail: mikroniek@twindesign.nl

Redactiesecretariaat/eindredactie

Mikroniek / Judith Das en Renate Mouton
Twin Design bv
E-mail: redactie@twindesign.nl

Advertentie-acquisitie:

Waterfront media
Henk van der Brugge
Tel: 06-29574666 of 078-30 5500

Secretariaat NVPT

Parallelweg 30
Postbus 70577
5201 CZ Den Bosch
Tel: 073-6233562
Fax: 073-6441949
E-mail: office@NVPT.nl

Vormgeving en realisatie:

Twin Design bv, Culemborg

Mikroniek verschijnt zes maal per jaar
© Niets van deze uitgave mag overgenomen of vermenigvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de redactie.

ISSN 0026-3699

Coverfoto: Frencken Group, Eindhoven

In dit nummer

4 Editorial

5 Keramische precisiekogels

Keramische precisiekogels hebben zeer specifieke eigenschappen. De auteurs Bruggeman en Janssen zetten in dit artikel die eigenschappen uiteen en gaan daarnaast ook in op het nut en de toepassingen van deze kogels.

8 Prijs voor Frencken Group

Beste toeleverancier van Nederland

Op 22 februari 2002 is de Frencken Group bv te Eindhoven verkozen tot beste toeleverancier van Nederland. Een mooie onderscheiding... Frans Zuurveen vertelt u onder andere waarom de jury de Frencken Group tot winnaar heeft uitgeroepen.

10 Een omhullingsproces voor geavanceerde en standaard IC-producten

Een overzicht van een nieuwe omhullingsmethode met gebruik van film in de matrix

Arnold Bos en Ton van Weelden introduceren de FAM-technologie en zetten de mogelijkheden en voordelen van FAM voor de halfgeleider industrie uiteen.

14 Schilderijen gecontroleerd schoonmaken met lasers

De schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering

Het concept van reiniging van kunstwerken met behulp van lasers wordt al langere tijd toegepast op 'harde' beeldhouwwerken. Het reinigen van 'zachte' schilderijen met laserstralen is echter een geheel nieuwe uitdaging. Onlangs is daarvoor een laser cleaning station ontwikkeld volgens de mechatronische ontwerpaanpak. De auteurs Van Eerden, Scholten en Schipper lichten in dit artikel deze aanpak nader toe.



30 Productinfo

31 Actueel

Van de voorzitter

De Rien Koster prijs

Bij zijn afscheid van het Philips Centrum voor Fabricage Technologie, heeft Rien Koster een prijs aangeboden gekregen voor zijn oeuvre dat hij bij deze multinational en op vele andere plekken heeft achtergelaten. De mensen van Philips vinden het leuk om deze geste om te zetten in een traditie, maar dan niet beperkt tot Philips alleen. Daarom heeft Precisie technologie Nederland besloten een oeuvre-prijs voor precisietechnologie in Nederland in te stellen. De NVPT neemt de regie van deze prijsuitreiking op zich. De prijs zal worden uitgereikt tijdens de Precisiebeurs, die dit jaar weer in oktober zal plaatsvinden in Veldhoven. Eenieder die kandidaten wil voordragen kan zich melden bij het secretariaat van de NVPT. Mocht u kandidaten willen voorstellen voor de nominatiecommissie, dan kan dat natuurlijk ook.

De Algemene Ledenvergadering

Een jaar gaat snel. Medio mei is er alweer een ledenvergadering van de NVPT. De leden zullen via een schrijven worden uitgenodigd voor de bijeenkomst.

EUSPEN

Bent u niet vergeten dat in mei de European Society for Precision ENgineering haar congres houdt in Nederland? De Technische Universiteit Eindhoven is gastheer van het gebeuren. Veel staaltjes van precisietechnologie zullen getoond worden en u kunt weer van harte genieten van de hobby die feitelijk uw werk geworden is.

Veel genoeg met het lezen van deze *Mikroniek*.

Hans Krikhaar
Voorzitter NVPT

KERAMISCHE PRECISIEKOGELS

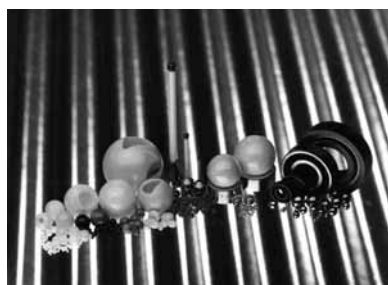


Foto 1. Producten met keramische kogels.

*Keramische precisiekogels hebben zeer specifieke eigenschappen. Vooral de hoge druksterkte, goede chemische bestendigheid, hoge hardheid en de lage wrijvingscoëfficiënt zijn kenmerkend. Bovendien zijn zeer nauwkeurige toleranties haalbaar (tot $\pm 0,08$ micron op de diameter). Keramische precisiekogels worden zowel in gangbare standaardproducten (tasters, kogellagers, heupkogels) als in speciale producten toegepast (lageringen in vacuüm, microdoseer-
klepjes en afsluiters).*

• *H.J. Bruggeman en B. Janssen, Ceratec Technical Ceramics BV* •

Precisiekogels worden in de industrie veelvuldig toegepast. Veel toepassingen zijn bekend, denk aan precisiekogels in kogellagers en kogelventieltjes. Steeds vaker worden keramische precisiekogels ingezet. Door keramiek toe te passen in plaats van andere hoogwaardige materialen verkrijgt men een hogere standtijd, of zijn processen mogelijk die eerder niet mogelijk waren. Er zijn diverse soorten keramiek met zeer uiteenlopende eigenschappen. Dit artikel geeft een overzicht van eigenschappen van diverse keramieksoorten en een overzicht van producten met keramische precisiekogels.

Het nut van keramische precisiekogels

Ten opzichte van andere hoogwaardige materialen zoals hardmetaal en chroomstaal hebben keramische precisiekogels zeer specifieke eigenschappen:

- Hoge hardheid, druksterkte en stijfheid.
Een hoge hardheid geeft voor veel toepassingen een hoge slijtbestendigheid. Er zijn relatief hoge belastingen mogelijk waarbij de kogel relatief lang vormvast blijft.

- Keramiek is in vele media bestendig of wordt nauwelijks aangetast.
- Eenvoudige reiniging.
Het oppervlak is zeer glad afgewerkt (tot 0,012 micron Ra) waardoor vuil zich niet kan hechten.
- Lage wrijvingscoëfficiënt.
Voor lageringen is dit een belangrijke eigenschap.
- Lage dichtheid.
De dichtheid is de helft van de dichtheid van staal. Constructies worden hierdoor lichter en er is sprake van minder massatraagheid.
- Keramiek is niet giftig, is geurloos en ontgast niet.
Ook bij hogere temperaturen en in vacuüm is keramiek stabiel.
- Niet-magnetisch.
Voor veel industriële toepassingen interessant (denk aan magneetgestuurde klepjes).
- Elektrische isolator.
Keramiek is een zeer goede elektrische isolator. Galvanische corrosie kan niet plaatsvinden.

Tabel 1. Overzichtstabel met materiaaleigenschappen van gangbare keramieksorten.

Eigenschappen	Eenheid	Silicium-nitride	Aluminium-oxide	Zirkonium Oxide	Saffier	Robijn
Chemische formule		Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	ZrO ₂ -MgO	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ +Cr ₂ O ₃
Dichtheid	g/cm ³	3.16	3.90	6.0	3.99	3.99
Kleur		grijs/zwart	Wit	Wit	Transparant	Rood
Hardheid	HV 0,5	1750	1900	1200	2300	2300
Buigsterkte 4 pt	MPa	>750	470	820	390	390
E-modulus	GPa	320	380	205	430	430
Druksterkte	MPa	>2500	2400	1990	2100	2100
Breuktaaiheid	MPa√m	6.0	4	12	1	1
Thermische geleiding	W/m.K	35	29	3	36	36
Elektrische weerstand	Ω.cm	10 ¹²	10 ¹⁴	>10 ⁸	10 ¹⁶	10 ¹⁶
Uitzettingscoëfficiënt	10 ⁻⁶ /K	3.5	8	10	5.3/4.5	5.3/4.5
Maximale temperatuur	°C	1000	1800	900	2000	2000

Tevens is het mogelijk bijvoorbeeld vonkmachines elektrisch te isoleren door kogellagers toe te passen met keramische kogels.

- Hoge temperatuurbestendigheid.

Keramiek is tot 2000 °C inzetbaar. Er zijn geen hoge temperatuurverschijnselen, zoals uitgloeien of korrelgroei.

Deze eigenschappen resulteren bij toepassing van keramiek in plaats van andere materialen tot hogere standtijden (dus langere onderhoudsintervallen). Ook zijn processen mogelijk die normaliter niet mogelijk zijn. Denk daarbij aan hoge temperaturen of een bepaalde combinatie van

eigenschappen zoals een combinatie van elektrische isolatie, een goede chemische bestendigheid en een hoge temperatuurbestendigheid. Deze combinatie is met kunststof of metaal niet mogelijk.

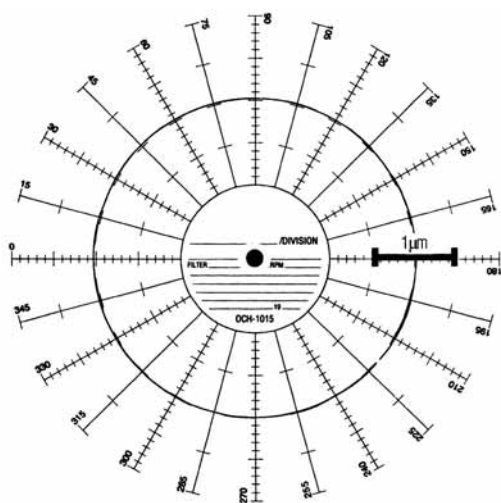
Bovenstaande eigenschappen zijn niet voor alle keramieken identiek. Tabel 1 geeft een overzicht van eigenschappen van gangbare keramieksorten.

Afmetingen, afwerking en toleranties

Tabel 2. Overzicht leverbare grades van keramische precisiekogels

Grade	Tolerantie diameter	Onrondheid	Oppervlakte ruwheid (Ra)
3	0.08 µm	0.08 µm	0.012 µm
5	0.13 µm	0.13 µm	0.020 µm
10	0.25 µm	0.25 µm	0.025 µm
16	0.40 µm	0.40 µm	0.025 µm

Keramische precisiekogels zijn leverbaar vanaf diameters ≥ 0.2 mm. De maximaal leverbare afmetingen voor siliciumnitride, aluminiumoxide en zirkoonoxide zijn 100 mm. Voor saffier en robijn is de maximaal leverbare afmeting respectievelijk 35 mm en 12.7 mm. Analoog aan de precisiekogels uit andere hoogwaardige materialen zijn keramische precisiekogels leverbaar in verschillende grades. Onderstaande tabel geeft een overzicht van



Figuur 1. Onrondheidsmeting precisiekogel, de maximale onrondheid is hier 0,015 micron.

grades (volgens AFBMA 1975 and ISO 3290).

Toepassingen

Keramische precisiekogels zijn een begrip in de industrie. Er zijn globaal twee groepen waarin de kogels toegepast worden:

1. In gangbare standaardproducten.

Standaardproducten zijn producten die in grote aantallen voor zeer uiteenlopende toepassingen worden gebruikt. Deze producten worden in de meeste gevallen in standaard afmetingen geleverd en staan in een catalogus vermeld.

Typische voorbeelden van standaardproducten met keramische precisiekogels zijn:

- Meettasters voor 3D-meetmachines.
Meettasters hebben een robijn kogel. Robijn is rood van kleur en dus duidelijk waarneembaar. Bovendien zijn de eigenschappen zeer stabiel (éénkristal) en is het oppervlak zeer slijtvast. Keramische precisiekogels worden tevens gebruikt voor ijken en kalibreren van meetmachines.
- Kogellagers.
Kogellagers kunnen zowel volkeramisch als hybridisch uitgevoerd zijn. Een hybride kogellager heeft keramische kogels, de lagerschalen en kooi zijn gemaakt uit conventionele materialen.
Keramische kogellagers kunnen hoger in temperatuur belast worden, de smering wordt minder kritisch (maar nog wel in enige mate noodzakelijk!).
- Heupkogels.
Keramik (zirkoonoxide) wordt als heupkogel al zeer lang toegepast. Zirkoonoxide is slijtvast, kan tegen een stootje en is lichaamsvriendelijk.
- Afstandhouders.
Om een zeer gedefinieerde lijmspleet te verkrijgen gebruikt men zeer kleine keramische precisiekogeltjes van bijvoorbeeld 0.3 mm. Keramik wordt toegepast omdat keramik inert is in de chemisch agressieve

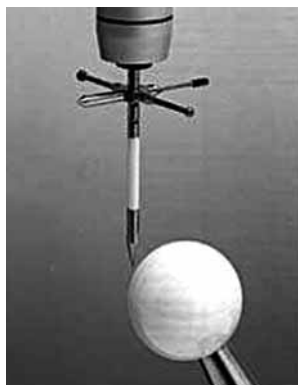


Foto 2. Ijken van meettasters.

lijm, er geen contactcorrosie mag zijn tussen de twee te verbinden oppervlakken en de verbinding tijdens het lijmen zwaar belast wordt (stalen kogeltjes zijn dan niet vormvast genoeg).

2. In speciale producten (maatwerk).

Speciale producten worden voor een bepaalde toepassing ontwikkeld. Voorbeelden van maatwerkproducten zijn:

- Microdoseerklepjes.
Het klepje is vaak opgebouwd uit een anker met keramische kogel die afdicht in een keramische zitting. Met microdoseerklepjes kan men snel en nauwkeurig doseren. Veel toegepast zijn ventielklepjes voor het doseren van chemisch agressieve en abrasieve vloeistoffen.
- Speciale lageringen.
In de halfgeleiderindustrie en in andere precisietoepassingen is er een stijgende behoefte aan zeer nauwkeurige lageringen. Keramik heeft als constructiemateriaal in lageringen zeer veel voordelen.
Keramik is relatief licht, heeft een lage uitzettingcoëfficiënt (er zijn zelfs keramische materialen met uitzetting nul), is slijtvast, geeft niet af en ontgast niet (geeft dus geen vervuiling), is chemisch en temperatuurbestendig, heeft een zeer hoge stijfheid (buigt dus onder belasting niet snel door) en heeft uitste-



Foto 3. Microdoseerklepjes.

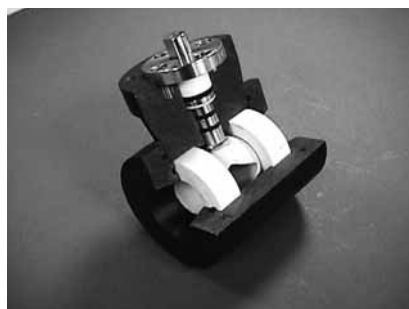


Foto 4. Doorsnede kogelafsluiter.

Beste toeleverancier

De Frencken Group bv te Eindhoven is op 22 februari jl. verkozen tot beste toeleverancier van Nederland. Directeur Jack van Sprang kreeg ter gelegenheid van de ESEF in de Utrechtse Jaarbeurs die eervolle onderscheiding uit handen van mevrouw Hennie de Ruyter, uitgeefster van het tijdschrift Link Magazine, dat de wedstrijd organiseerde. Juryvoorzitter was Theo Boshuizen, oud-directeur van TNO Industrie en deeltijdhoogleraar Technische Bedrijfsvoering aan de TUE. De jury bestond verder uit Paul Gosselink van IPL-Consultants, Albert de Jong (inkoopmanager van Philips Medical Systems), Bert van der Loo (inkoopexpert van ODME), Jan Raijmakers (vroeger inkoopmanager bij Stork en nu partner van MP-M Business Navigator), Daan Kersten (oprichter van Co-makers.com) en Ton van Zwam (tot voor kort vice-president Procurement van ASML en nu werkzaam bij laserproducent Lambda in Göttingen).

• *Frans Zuurveen* •

De jury oordeelde dat Frencken er het best in geslaagd is een klantenbestand uit verschillende marktsegmenten op te bouwen. Het Eindhovense bedrijf stemt zijn producten af op wensen van klanten en levert toegevoegde waarde door creatief mee te denken. Frencken schrikt er niet voor terug activiteiten en processen die niet behoren tot de kernexpertise, op zijn beurt uit te besteden aan derden. 'Wie zaken doet met Frencken, haalt een stuk ketenverlenging in huis', aldus de jury.

De groei van Frencken

Nog niet zo lang geleden was Frencken een 'gewone' machinefabriek, die zich gespecialiseerd had in het leveren van fijnmechanische componenten. Vandaag de dag bestaat de Frencken Group uit een internationaal opererende organisatie van toeleve-

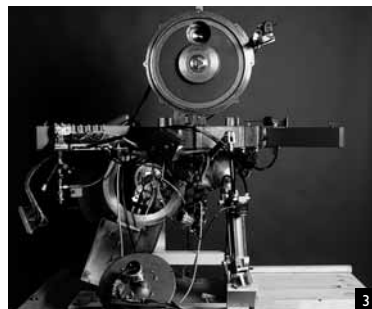
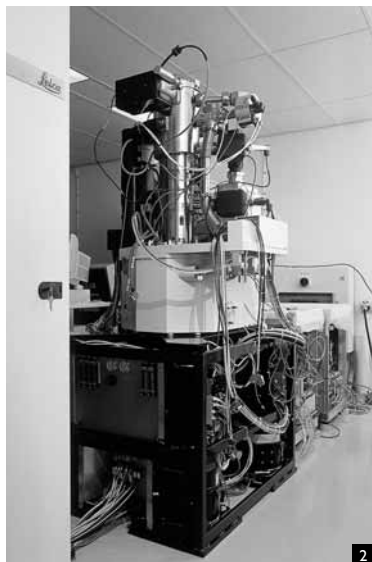
ranciers met ieder een eigen specialisme. Frencken is op zijn beurt onderdeel van de holding ElectroTech Investments in Australië.

Tot de Frencken Group behoren Frencken Mechatronics in Eindhoven, gespecialiseerd in het ontwerpen, vervaardigen en testen van hoogwaardige complexe samenstellingen, en Machinefabriek Gebrs. Frencken, eveneens in Eindhoven en gespecialiseerd in kleine series onderdelen, prototypes en plaatwerk. Verder behoren tot het bedrijvenconglomeraat de firma Optiwa in Reuver voor de productie van zeer nauwkeurige en hoogwaardige onderdelen in wat grotere series, Frencken Brno in Tsjechië voor de productie van onderdelen en samenstellingen met lagere kostprijs en Frencken Malaysia in Penang (Maleisië), voor onderdelen en assemblages met een seriekarakter.

Prijs voor Frencken Group van Nederland



1 Jack van Sprang, directeur van de Frencken Group, in de assembleruimte van Frencken Mechatronics.



2 De EBPG-lithografie-machine van Leica Microsystems Lithography.

3 Een submodule voor de nieuwe spectrometer PW 240X van Philips Analytical.

4 Een vacuümsluis voor het systeem Altura 800 van Philips-FEI.

Doelstellingen

Jack van Sprang, zie afbeelding 1, stelt dat groei geen doel op zich is voor de Frencken Group. Belangrijker zijn de doelstellingen die per bedrijf zijn geformuleerd om een goede marktpositie te verkrijgen en te behouden. Dat wil zeggen dat er flink wordt geïnvesteerd in de opleiding van gemotiveerde medewerkers. De aandacht voor de klanten en het begeleiden van hun veranderingen van inzicht wat betreft beleid en strategie, staan daarbij centraal.

De Frencken Group levert totaaloplossingen, met de bedoeling een belangrijk deel van de besturingslast van klanten over te nemen. Het bedrijf produceert dus niet zomaar onderdelen of samenstellingen volgens tekening, maar ontwikkelt samen met de klant zelfstandig werkende functies. Dat zijn complete machinemodules en -systemen, die kunnen bestaan uit mechanische onderdelen, precisieplaatwerk, pneumatiek en hydrauliek, elektronica, elektromechanische onderdelen, software en/of optische samenstellingen.

Voorbeelden

Afbeelding 2 laat een EBPG-lithografie-machine

(Electron Beam Pattern Generator) van Leica Microsystems Lithography zien. Leica heeft in 1990 de bijbehorende activiteit van Philips overgenomen. De machine is ontworpen voor het schrijven van IC-patronen op een siliciumplak met behulp van een elektronenbundel. In 1997 is het ontwerp van de machine aangepast, waarbij deze ook geschikt werd gemaakt voor plakken van 5", met een tot 150 mm vergroot bereik van de preparaattafel.

Frencken Mechatronics heeft daarbij de gehele ontwikkeling van een nieuwe vacuümsluis en de bijbehorende preparaat-vacuümkamer voor zijn rekening genomen. In de toekomst zal Frencken ook het ontwerp, de onderdelenvervaardiging en de assemblage van de kolom en de preparaattafel gaan verzorgen.

Interessant is ook de samenwerking van Philips Analytical in Almelo, Fijnmechanische Industrie Nijdra bv in Midden-Beemster en Frencken Mechatronics in het project röntgenspectrometer PW 240X. Deze nieuwe spectrometer van Philips Analytical is bedoeld voor de kwalitatieve en kwantitatieve elementaire analyse van vaste stoffen – bijvoorbeeld cement en staal – en zelfs vloeistoffen. In dit project levert Nijdra submodules voor deze spectrometer, zie afbeelding 3. De module

wordt vervolgens bij Frencken Mechatronics ingebouwd en op eindniveau getest.

Tot slot laat afbeelding 4 een vacuümsluis zien die Frencken compleet voor Philips-FEI in Eindhoven Acht levert. De module zorgt voor het transport en de positionering van 8"-siliciumplakken via de wand van de vacuümkamer van het systeem Altura 800. Dat is een serie van omvangrijke apparaten voor de analyse en correctie van siliciumplakken met geïntegreerde schakelingen oftewel IC's.

Voor meer informatie:

Frencken Mechatronics bv, tel: 040-2507507

Een omhullingsproces

Bij het omhullen van IC's met een epoxy compound wordt steeds meer gebruikgemaakt van een film in de matrijs om te voorkomen dat de epoxy compound na het uitharden hecht aan het metaal van de matrijs. Een ander voordeel van het gebruik van film is dat delen van het IC vrijgehouden kunnen worden van compound.

Het toenemende gebruik van Film Assisted Molding (FAM)-technologie bevestigt de belangrijkheid van dit nieuwe omhullingsproces voor de halfgeleider industrie. De FAM-technologie is gepatenteerd door Boschman Technologies en wordt ook door dit bedrijf gelicenseerd. De ontwerpers van de IC's worden geconfronteerd met IC's die steeds complexer worden. Daarnaast worden de omhullingen steeds kleiner en dunner met steeds beter hechtende moulding compounds.

FAM-technologie is een procestechnologie die deze uitdagingen aangaat. Door gebruik te maken van de FAM-technologie is het mogelijk om geavanceerde IC's in hoge volumes te produceren met een zeer hoge productbetrouwbaarheid.

Dit artikel zal de lezer inzicht geven in de films die gebruikt worden en geeft een introductie van de FAM-technologie. Verder worden de mogelijkheden en voordelen verduidelijkt die FAM voor de halfgeleider industrie heeft.

• *Arnold Bos en Ton van Weelden, Boschman Technologies B.V.* •

BGA- en uBGA-producten omhuld met behulp van een niet hechtende ETFE-film

Film Technologie zorgt ervoor dat het matrijsoppervlak, daar waar de folie wordt toegepast, niet in contact kan komen met de moulding compound. Bovendien maakt Film Technologie matrijsontwerpen mogelijk zonder uitstoot-

pennen aan de filmzijde van de matrijs. Het uitnemen van de gemoulde producten kan zelfs met zeer kleverige moulding compounds moeiteloos plaatsvinden. Tijdens het omhullen wordt gebruikgemaakt van een ETFE film. Het gebruik van deze folie voorkomt slijtage van het matrijsoppervlak. De normale slijtage is het

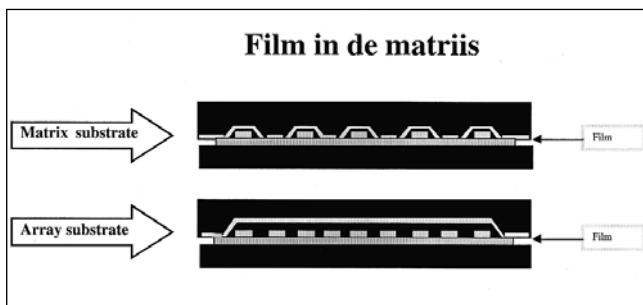
voor geavanceerde en standaard IC-producten

Een overzicht van een nieuwe omhullingsmethode met gebruik van film in de matrijs

gevolg van het contact tussen de met anorganisch mineraal gevulde moulding compounds en het matrijsoppervlak.

Door het gebruik van FAM-technologie tijdens het omhullen, kleeft de moulding compound niet meer aan de matrijs (zie afbeelding 1).

Ultradunne producten op substraat en folie lossen eenvoudig uit de matrijs. De producten

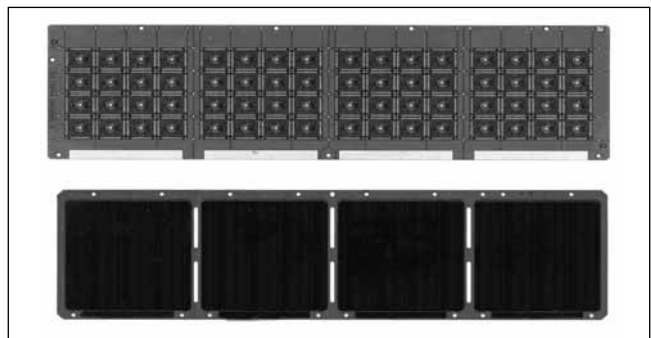


worden daardoor niet beschadigd gedurende het lossingproces.

De film wordt vacuüm gezogen in de caviteiten voordat de leadframes of substraten worden geladen in de matrijs. Eerst wordt een vacuüm geactiveerd om de film op het oppervlak te fixeren en daarna wordt het vacuüm binnenin de matrijs geactiveerd met als resultaat dat de film de exacte driedimensionale vormen van de caviteiten aanneemt.

De ETFE-folie heeft een zeer hoge rek en kan gebruikt worden bij temperaturen tot 200 graden Celsius. Na het laden van leadframes of sub-

straten in de matrijs, begint het omhullen en uitharden. Vervolgens wordt de matrijs geopend en de leadframes of substraten worden uit de matrijs genomen. Voordat de volgende cyclus begint, wordt het vacuüm uitgeschakeld en een



nieuwe film in de matrijs getransporteerd. Dunne producten, zoals Mini of Matrix BGA's (zie afbeelding 2) en Flip Chip in Package, kunnen op deze wijze betrouwbaar gemaakt worden.

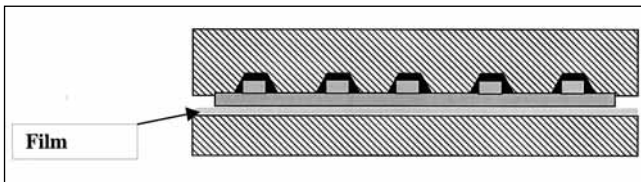
De voordelen van deze Film Technologie zijn onder andere:

- Geen matrijsslijtage op de foliezijde van het matrijsoppervlak.
- Geen uitstoters op het product.
- Een hogere productieopbrengst voor dunne BGA-producten.

FilmTechnologie voor Touch Chip, Optical Sensors en Bare Die: een andere toepassing

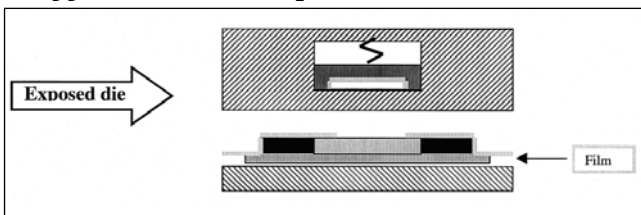
van de ETFE film

Film Technologie geeft de productontwerper de mogelijkheid om 'bleed' en 'flash' vrij te omhullen, dat wil zeggen: zonder braamvorming. LLP's (Lead Less Product) en QFN's (Quart Flat No lead) in matrix leadframes worden omhuld met film aan de onderzijde van het leadframe. Deze film zorgt ervoor dat de contactpunten (leads) en eventueel de die-pads worden vrijgehouden van moulding compound. De film functioneert als een afdichting tussen het leadframe en de matrix en beschermt het



leadframe-oppervlak op de klemvlakken tegen braamvorming van de compound (zie afbeelding 3). Ook hier wordt de ETFE-film door middel van vacuüm vastgezogen op het matrijsoppervlak.

ETFE-Film kan ook gebruikt worden bij het inkapselen van IC's, die (partieel) worden vrijgehouden van compound.

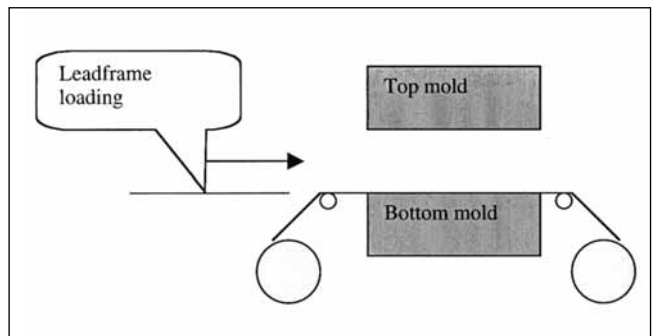


Toepassingsgebieden zijn optische sensoren, druksensoren en fingerprintsensoren. Omdat tijdens het omhullingsproces de folie rondom het vrij te houden gebied van de IC wordt geklemd, wordt het IC beschermd tegen de moulding compound en zal braam (flash) uitblijven (zie afbeelding 4).

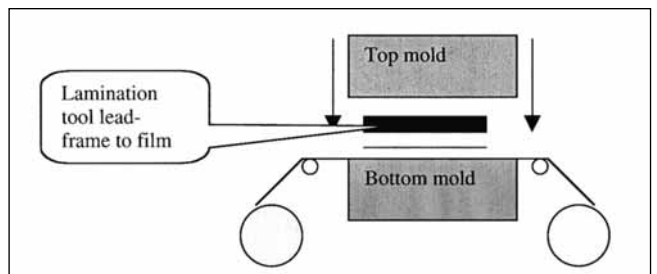
Adhesieve Film Technologie voor LLP's en QFN-producten

Adhesieve Film Technologie is een toepassing van film in de matrix waarbij de film is voorzien van een dunne plaklaag. Deze plaklaag zorgt ervoor dat gedurende het omhullen de

producten aan de filmzijde vrij blijven van compound en de leads na het omhullen vertind kunnen worden zonder dat deze eerst gereinigd moeten worden. De toepassing van deze film is voor LLP- en QFN-producten een veel beter en goedkoper alternatief dan het van te voren aanbrengen van een tape, het zogenaamde pre-



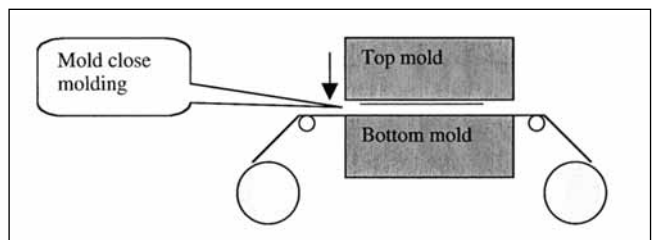
tapen van leadframes. Het gepatenteerde Adhesieve Film Technologie (AFT)-proces biedt de gebruiker een oplossing voor een hoge volumeproductie met perfecte kwaliteit en lage



kosten.

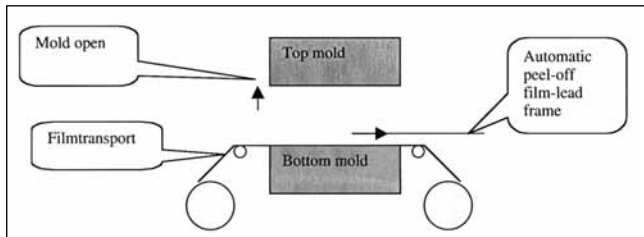
De folie wordt in de matrix op de 'die and wire bonded' leadframes gelamineerd

De eerste stap is het laden van het leadframe in de matrix en het plaatsen van het leadframe op de film (stap 1).



De volgende stap is dat door middel van een

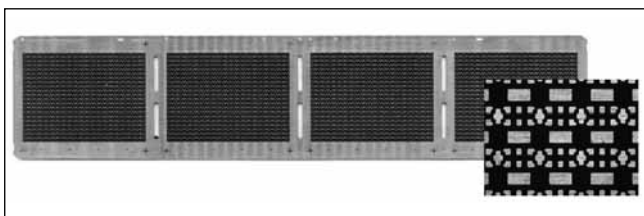
productspecifiek lamineergereedschap het leadframe in de hechtingslaag van de folie wordt gedrukt (stap 2).



Na het terugtrekken van het laminieregereedschap sluit de matrijs en vindt het omhullen plaats (stap 3). Voor dit laminatieproces zijn maar vier seconden nodig. Na het omhullen wordt de compound uitgehard en gaat de matrijs open.

De folie komt samen met de leadframes los van de matrijs en de film transporteert het leadframe uit de matrijs. Tijdens dit transport worden de leadframes automatisch van de folie gepeld (stap 4).

Met behulp van onze kennis en ervaring op filmgebied hebben wij een PET-folie ontwikkeld die bij hoge temperaturen een dunne warmtegevoelige plaklaag heeft. Deze hechtlaag heeft een zeer hoge hechting op het leadframe, waardoor de compound niet onder het leadframe komt en de aansluitingen (leads) schoon blijven. In samenwerking met



de foliefabrikant is een standaard polymeer gekozen als draagfolie en een speciale warmhechtende laag ontwikkeld met specifieke hechtingskarakteristieken, zoals een gedefinieerde laagdikte voor een goede adhesie en afdichting, residuvrije afpeileigenschappen van de leadframes en moulding compound en geen

siliciumresidu op het leadframe.

Adhesieve Film Technologie is ontwikkeld om de grote oppervlaktes van Molded Array Packages schoon te houden. Het is bovendien een betrouwbare en goedkope oplossing voor het lamineren van folie op leadframes.

Typische applicaties zijn producten van 2 tot 80 aansluitingen, zoals de CSP, SOT-23 of andere discrete LLP-producten (zie afbeelding 5).

De indrukking van de folie tussen de aansluitingen (leads) is verwaarloosbaar. De adhesieve laag van de AFT-folie is zeer dun en de PET-folie heeft een veel hogere E-modulus dan Polyamide type folies die gebruikt worden voor 'pre-plated' leadframes. Tijdens het lamineren is de indrukking van deze AFT-folie tussen de aansluitingen (leads) minder dan 4 μm en wordt teniet gedaan door persdruk tijdens het uithardingproces.

Kosten van AFT

De voordelen van het AFT-proces zijn niet alleen kwalitatief. AFT-folie wordt automatisch toegevoerd tijdens het inkapselingproces en automatisch losgepeld tijdens het ontladen van de matrijs. De Boschman Flexstar/FAM-pers (zie afbeelding 6) is voorzien van een filmtransportsysteem en het lamineren en delamineren zijn geïntegreerd. Polijsten of oppoetsen van de leadframes voor het vertinningsproces is niet nodig.



De PET-folie met zijn warm klevende laag is een zeer goedkope oplossing. De filmprijs is een zesde van de kosten van de Polyamidefolies die momenteel gebruikt worden in de pre-taped technologie. In vergelijking met concurrerende technologieën zijn de kosten van AFT de laagste. Een besparing op jaarbasis alleen op de kosten van de film bedraagt 225.000 euro.

De FAM-Technologie maakt het mogelijk nieuwe wegen in te slaan voor het omhullen van IC's.

Dunnere en kleinere componenten worden mede mogelijk gemaakt door gebruik te maken van de filmtechniek. Speciale toepassingen van sensortechniek in IC's kunnen alleen met filmtechniek op een betrouwbare en kostengunstige manier gemaakt worden.

De Adhesive Film Techniek biedt de mogelijkheid om goedkope en betrouwbare, uiterst dunne componenten te realiseren voor bijvoorbeeld mobiele telefoons.

Schilderijen gecontroleerd schoonmaken met lasers

De schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering

Het concept van reiniging van kunstwerken met behulp van lasers wordt al langere tijd toegepast op 'harde' beeldhouwwerken. Het reinigen van 'zachte' schilderijen met laserstralen vormt echter een geheel nieuwe uitdaging. Onlangs is daarvoor een laser cleaning station ontwikkeld volgens de mechatronische ontwerpaanpak. De ontwerpgegevens lagen met name bij de optische arm voor de geleiding van de laserbundel en de xy-manipulator voor het nauwkeurig scannen van het te reinigen oppervlak. Continue monitoring zorgt voor een gecontroleerde reiniging. Dankzij de combinatie van disciplines als optica, mechanica, elektronica en regeltechniek is het mogelijk schilderijen grondig en toch veilig schoon te maken. Inmiddels komen uit de kunstwereld enthousiaste reacties op deze revolutionaire techniek. De case van het laser cleaning station illustreert eens te meer de schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering.

• **Hans van Eerden, Hans Scholten en Dennis Schipper** •

Kunstwerken zoals schilderijen belichamen bij uitstek menselijke ideeën over schoonheid. Op enig moment moeten deze kunstwerken ook letterlijk schoon worden gemaakt, vanwege verkleuring van het vernis, overschilderingen en aanslag van schimmels en ander vuil. Restaurateurs hebben een grote expertise voor dat delicate schoonmaakwerk, het originele kunstwerk mag immers niet worden aangetast. Maar ook zij staan machteloos met hun handwerk als de aanslag of overschilderingen te sterk hechten aan de onderliggende verflaag of als het vernis zodanig is uitgehard dat oplosmiddelen niets kunnen uitrichten. Op dat moment biedt moderne techniek een oplossing. Uit Griekenland, een land vol beelden uit de oudheid, is het reinigen van beelden met laserstralen bekend. Dat roept de vraag op of deze techniek ook voor de reiniging van schilderijen, wandschilderingen en fresco's kan worden ingezet. Met de ontwikkeling van een laser cleaning station is daarop een bevestigend antwoord gekomen (zie kader). Na een korte ver-

Ontwikkeling van een laser cleaning station

Het Hengelose bedrijf Art Innovation, spin-off van mechatronisch ontwerp bureau Demcon, heeft een laser cleaning station voor het reinigen van schilderijen ontwikkeld. Voorafgaand onderzoek vond plaats in samenwerking met de Foundation for Research and Technology – Hellas, die laserreiniging van kunstwerken al langer toepast. Daarbij waren tevens restauratieateliers uit Portugal, Spanje en Nederland betrokken en het FOM-instituut voor Atoom- en Molecuulfysica in Amsterdam, dat onderzoek deed naar onder meer moleculaire veranderingen van verflagen.

De internationale samenwerking kreeg vorm in het project 'Advanced workstation for controlled laser cleaning of artworks', met subsidie van CRAFT, een Europese regeling voor onderzoeksprojecten van het midden- en kleinbedrijf. Inmiddels bezoeken restaurateurs het laboratorium van Art Innovation om proef te draaien en zijn de eerste betaalde opdrachten voor het reinigen van schilderijen uitgevoerd. De kunstwereld reageert enthousiast en contacten zijn gelegd met onder meer het Mauritshuis in Den Haag en het Guggenheim in New York.

kenning van de toepassing van lasers voor het reinigen van schilderijen (afbeelding 1), gaat dit artikel dieper in op het mechatronische ontwerp



van het laser cleaning station (afbeelding 2). De specifieke gegevens zijn ontleend aan [Scholten].

Afbeelding 1. Voorbeeld van laserreiniging van een door brand zwaar beschadigd schilderij.

Jan van Vuuren, 1925, met dank aan A.L. Verheij, De Manenstegell, Bathmen. Een schoonmaakbeurt met de laser kan tot spectacu-



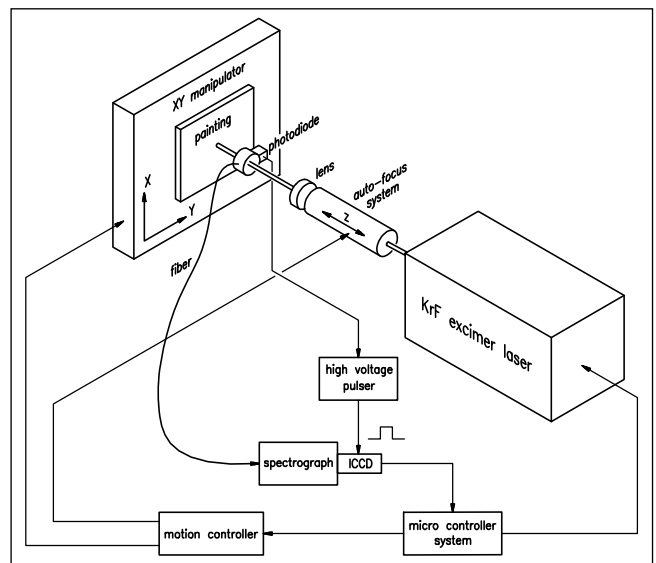
laire 'onthullingen' leiden.

Afbeelding 2. Het laser cleaning station in het laboratorium van Art Innovation.

Concept

Een schilderij met laserstralen reinigen is niet een kwestie van even een laser op het kunstwerk richten en het vuil eraf schieten. Zo werkt het, simpel gezegd, wel bij 'harde' kunstwerken zoals beelden. Het vuil absorbeert (een deel van) de straling terwijl het materiaal van het beeld zelf, bijvoorbeeld steen of marmer, de straling reflecteert. Het kunstwerk heeft dus niet te lijden van een flinke dosis laserstraling. Bij 'zachte' kunstwerken is dat beslist anders. Zowel de verfpigmenten als het doek van een schilderij zijn gevoelig voor beschadiging door laserstraling. Dus moet laserreiniging van schilderijen gecontroleerd gebeuren, met een laserbundel die beheerst en nauwkeurig het te reinigen oppervlak scant. Bovendien moet continu het effect van de laserreiniging worden gemonitord, zodat de laserbundel op tijd wordt verplaatst en alleen de bovenste (verontreinigings)lagen van het doek worden verwijderd.

Het concept voor laserreiniging van schilderijen



Afbeelding 3. Het concept van een laser cleaning station: cleaning (laser met optica), monitoring (spectrograph) en scanning (xy-manipulator aangestuurd door motion controller). Het micro controller system verzorgt de besturing van het station.

omvat derhalve drie aspecten (zie ook afbeelding 3):

- laser cleaning: bepalen van de geschikte laser-configuratie voor het reinigen;
- monitoring: controleren dat alleen de bedoelde verontreiniging wordt verwijderd;
- scanning: bestrijken van het gehele te reinigen oppervlak.

De mogelijkheden en beperkingen van laser cleaning en monitoring leggen de randvoorwaarden op aan het ontwerp van het scanningsysteem.

Globale specificaties

De specificaties voor een laser cleaning station omvatten naast de technische specificaties ook de specificaties van de te reinigen kunstwerken en de gebruikersspecificaties. De gebruiker, de restaurateur, blijft immers het uitgangspunt. Ter vergelijking: de resolutie die met handwerk kan worden gehaald ligt in de orde van $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$. Met een automatisch reinigingssysteem moet een veel betere resolutie kunnen worden behaald. Om de restaurateur te ondersteunen bij zijn reinigingswerk moet het station zijn uitgerust met gereedschappen zoals een microscoop en UV- en IR-spectrometers. De specificaties van het kunstwerk betreffen de aard en de dikte van de verschillende lagen op het doek [Teule]. Verflagen zijn 20-50 μm dik en een typische vernislaag is 20-80 μm dik. Met laserreiniging blijkt een diepteresolutie van 0,1-1 μm per puls te kunnen worden bereikt. De maximale afmeting van een te behandelen schilderij is typisch op $1,4 \times 2,2 \text{ m}^2$ vastgesteld.

De technische specificaties betreffen de snelheid van het scanningsysteem en de resolutie van het reinigingsproces, zie [Scholten]. Uitgaande van een bewerkingstijd van 0,2-1 s per positie (spot) ligt een optimale tijdstap van het scanningsysteem (van spot tot spot) in de orde van 0,1 s. De laterale resolutie (stapfout) van het reinigingsproces volgt uit de maximaal aanvaardbare positioneringsfout van de laserbundel op het doek. In een haalbaarheidsstudie [Scholten] is deze vastgesteld op 40 μm .

Laser cleaning

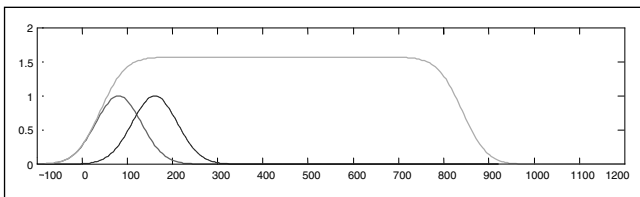
Een excimeerlaser zendt niet continu straling uit, maar geeft pulsen af van een extreem korte duur (nanosecondes). Dat zorgt telkens voor een korte interactietijd met het oppervlak, waardoor beschadiging kan worden voorkomen. Het maakt de excimeerlaser geschikt voor het delicate reinigen van schilderijen. Belangrijk pluspunt is tevens de mogelijkheid van automatisering van zowel de laserreiniging als de monitoring, zodat het resultaat niet afhangt van de handvaardigheid en de subjectieve waarneming van de restaurateur. Doordat per puls slechts zeer weinig materiaal wordt verwijderd, kan op deze manier beter doseerbaar worden gereinigd dan met chemische reiniging of een mechanische aanpak.

Bij laserablatie, het reinigen van een oppervlak met behulp van laserstraling, spelen drie mechanismen een rol:

- foto-chemisch: vrijkomen van molecuulfragmenten na het verbreken van de chemische bindingen in organische moleculen door absorptie van de energie van laserfotonen;
- foto-mechanisch: wegschieten van deeltjes ten gevolge van schokgolven veroorzaakt door een invallende laserbundel;
- foto-thermisch: verdampen van deeltjes door absorptie van met name infraroodstraling.

Foto-thermische effecten moeten zoveel mogelijk worden vermeden; een infraroodlaser bijvoorbeeld zal op schilderijen lokaal een smeltbadje van verontreiniging én verf creëren. Hetzelfde geldt voor foto-mechanische effecten, die de kwetsbare samenhang tussen verschillende verflagen onderling en met het doek kunnen verstoren. Dus moet reiniging vooral volgens het foto-chemische mechanisme plaatsvinden, met een laser die in het UV-spectrum opereert. Want het gaat om voornamelijk organische verontreiniging op het oppervlak, dus moet de laserstraling een geringe indringdiepte hebben en de energie leveren voor het verbreken van covalente bindingen. De energie van deze bindingen ligt tussen 3,5 eV (C-H) en 6,29 eV (C-C). Volgens de formule voor de fotonenergie, $E = hc/\lambda$ met h de constante van Planck, c de lichtsnelheid en λ de golflengte, ligt de benodigde golflengte tussen 200 en 350 nm. De kryptonfluoride (KrF) excimeerlaser met $\lambda = 248 \text{ nm}$ is dan een geschikte kandidaat.

De bundel van een KrF-laser heeft typisch een rechthoekige doorsnede, met in de breedterichting bij benadering een Gaussisch profiel en in de hoogterichting een profiel in de vorm van een plateau met 'Gaussische' flanken. Het Gaussische



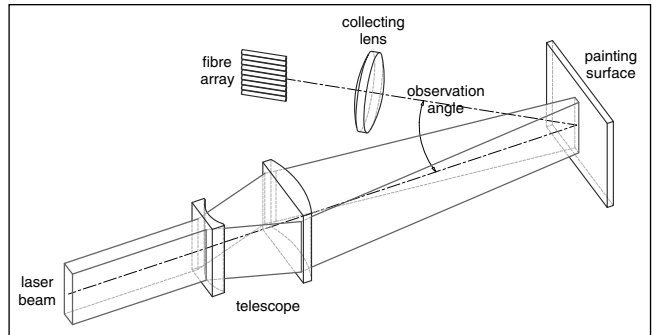
karakter is van belang voor een gelijkmatige bestraling van het oppervlak op opeenvolgende posities. De overlap van Gaussische profielen leidt bij geschikt gekozen instellingen tot een uniforme intensiteit van de bestraling; zie afbeelding 4. Daarbij is de mate van overlap niet zeer kritisch; tussen 50% en 80% overlap is het resultaat bij een uniforme bestraling. Uniforme bestraling leidt tot een uniforme ablatiediepte en voorkomt daarmee het ontstaan van een zichtbaar 'ablatierooster'.

Om de maximale resolutie bij de reiniging te verkrijgen wordt de bundel in de hoogterichting opgedeeld in meerdere bundels door een tralie in de bundel te plaatsen. De overlap van deze afzonderlijke bundels is zodanig dat ook in de hoogterichting een uniforme bestraling wordt gerealiseerd. Het effect van elke bundel kan afzonderlijk gemonitord worden en elke bundel kan afzonderlijk met een sluiters worden afgestopt. Het maximum aantal bundels wordt bepaald door de capaciteit van de multi-kanaalsspectrometer (zie verderop).

Afbeelding 4. Totale intensiteit van bestraling (willekeurige eenheid) ten gevolge van overlappende Gaussische profielen, bij een spotbreedte van 200 (willekeurige eenheid) en een verschuiving van opeenvolgende profielen van 80 (willekeurige eenheid), wat overeenkomt met 60% overlap.

De energie van een laserpuls is typisch 600 mJ, wat bij een puls frequentie van 10 Hz lokaal op het schilderij blijkt te leiden tot een (acceptabele) temperatuurstijging van 30-40 °C. De pulsduur is typisch 10-25 ns. Deze korte pulstijd heeft als voordeel dat de bundel nauwelijks in contact komt met de pluim die

zich als gevolg van de 'beschieting' boven het doek ontwikkelt. Bij langere pulsduur kan deze pluim de laserbundel afschermen van het doek, waardoor de reinigende werking verloren gaat



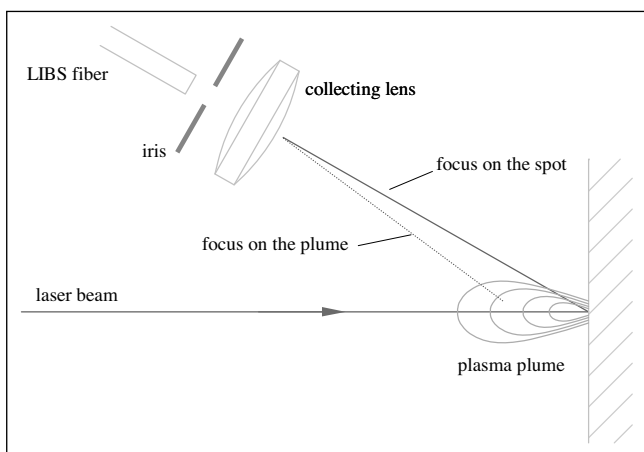
en bovendien kan interactie van de laserbundel met de pluim leiden tot schokgolven die het doek kunnen beschadigen.

De laserbundel heeft typisch een divergentie van 1 tot 3 mrad in breedte-, respectievelijk hoogterichting. Bij uittreden heeft de bundel typisch een dwarsdoorsnede van 10 x 24 mm². Vanwege de divergentie wordt een lens toegepast om de bundel te focuseren tot een spot op het doek, zie afbeelding 5. Om het Gaussische profiel te behouden wordt een cilindrische lens gebruikt. Naarmate de spot kleiner is zal de energiedichtheid ter plekke groter zijn, waardoor per puls een grotere ablatiediepte wordt bereikt. Daar staat tegenover dat een kleiner oppervlak wordt bewerkt. Combinatie van de effecten op ablatiediepte en bewerkte oppervlakte leidt tot een optimum in de energiedichtheid ('optimal ablation fluence'), afhankelijk van het bestraalde materiaal. Gegeven de energie-inhoud van een puls kan daaruit een optimale breedte van de spot worden bepaald. Voor vernis blijkt deze in de orde van 8 mm te liggen en een wat harder materiaal als pleisterwerk vraagt een hogere energiedichtheid en dus een kleinere spot, met een breedte in de orde van 2,5 mm. De scherptediepte ligt in de orde van 1 mm, afhankelijk van de spotgrootte.

Afbeelding 5. De invallende laserstraling (in verticale richting opgedeeld in meerdere bundels) wordt gefocuseerd door een cilindrische lens. Door de foto-chemische werking van de laserbundel ontstaat een plasma, dat fluorescentiestraling uitzendt die onder een bepaalde observatiehoek wordt opgevangen door een array van glasfibers, een voor elke bundel.

Monitoring

Bij laserablatie waar fotochemische effecten overheersen, ontstaat boven de laserspot op het schilderij een plasma bestaande uit molecuulfragmenten in aangeslagen toestand. Bij terugvallen naar hun grondtoestand zenden ze fluorescentiestraling uit die met behulp van spectroscopie (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) kan worden bestudeerd. De emissie van het plasma is karakteristiek voor het verwijderde materiaal, dus als de laserbundel dieper in een laag een andere samenstelling van materiaal



tegenkomt, zal de emissie ook veranderen. Bij de continue monitoring richt de aandacht zich op relevante emissiepieken van te verwijderen materiaal en te behouden pigmenten. Met een bepaald algoritme voor de relatieve intensiteiten van pieken, kan het reinigingsproces bewaakt worden. Als het algoritme een uitkomst geeft die buiten een veilige range valt, zal de reiniging op dat punt worden gestopt en de laserbundel worden verplaatst.

Een LIBS-spectrograaf bevat typisch 9 kanalen, die elk via een aparte fiber het fluorescentiesignaal van een spot afbeelden op een CCD-sensor, met negen aparte tracks. De uitleesfrequentie van de CCD-sensor moet groter zijn dan de puls-frequentie, want het afvuren van een volgende puls is afhankelijk van het meetresultaat na de voorafgaande puls. In een eerste uitvoering is de uitleesfrequentie van een 1024x256 CCD-array, opgedeeld in 9 tracks, typisch 50 Hz. Inmiddels zijn al uitleesfrequenties tot 500 Hz gereali-

seerd.

Het ruimtelijk oplossend vermogen van het monitoringsysteem is getest voor een loodwit/titaniumwit overgang, door een bundel deze overgang te laten passeren en de beide gemeten piekintensiteiten te vergelijken. Een orde verschil in piekintensiteit bepaalt dan de grens van het oplossend vermogen. Het blijkt dat door toepassing van een geschikt diafragma om strooi-licht af te schermen, door signaalbewerking met aftrek van 'organische' achtergrondemissie en door het focuseren van de collimatorlens op de spot en niet op het plasma erboven, een oplossend vermogen van 0,4 mm haalbaar is (zie afbeelding 6).

Afbeelding 6. Het oplossend vermogen van het LIBS-monitoringsysteem wordt verbeterd door focussing op de spot in plaats van op de plasmaplum erboven en door toepassing van een diafragma (iris).

Scanning

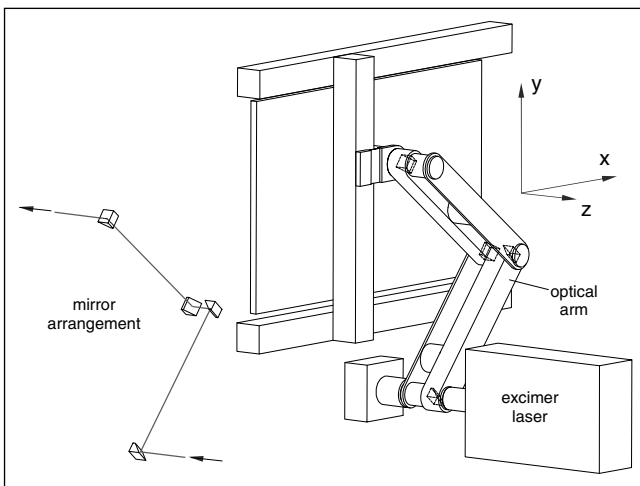
Het scanningsysteem voor een laser cleaning station moet laserstraling over grotere afstanden veilig transporteren naar elke gewenste positie op het oppervlak van een schilderij – met voldoende nauwkeurigheid en met behoud van bundelprofiel en -intensiteit.

Voor het scannen van een schilderij met een laserbundel zijn in principe verschillende oplossingen mogelijk die in de praktijk grote bezwaren hebben:

- Het schilderij staat vast en de laser met uit-tredende bundel beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote massa van de laser en de koppeling met waterkoeling en gastoevoer.
- De laser staat vast en het schilderij beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote variatie in ophanging, afmetingen en materialen van schilderijen. De meeste ophangingsconstructies lenen zich niet voor inklemming. Een lage stijfheid van het (bewegende) schilderij kan leiden tot schadelijke trillingen. Om dit te voorkomen is een zwaar inklemmechanisme vereist. Verder vraagt deze oplossing een grote werkruimte, namelijk in zowel de x- als de y-richting het dubbele van de maximale afmeting van een te behandelen schilderij.
- Zowel het schilderij als de laser bewegen, elk in een andere richting. Deze optie valt uiteraard ook af.

Scanning zal derhalve moeten gebeuren door alleen de laserbundel, toegevoerd vanaf een gefixeerde laser, te verplaatsen over het schilderij. Daarvoor zijn weer oplossingen denkbaar die niet voldoen:

- Fiber optics. Door interne reflecties in een glasfiber gaat het Gaussische bundelprofiel verloren, waardoor de overlap op naastliggende posities niet tot uniforme bestraling van het



oppervlak leidt.

- Flying optics met verplaatsbare of draaibare spiegels die de bundel over het schilderij laten lopen.

Door de relatief hoge divergentie van de excimerlaserbundel zal de afmeting van de spot, en dus de intensiteit van de bestraling, over het oppervlak variëren met de posities van de spiegels.

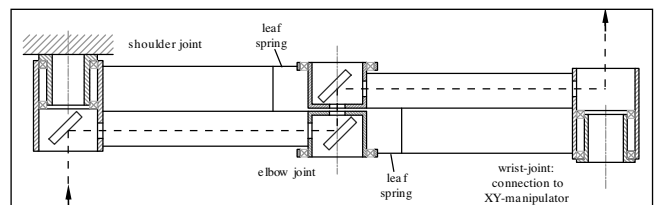
De uiteindelijke oplossing ligt in een variant op bovengenoemde flying optics, namelijk een optische arm die werkt volgens het principe van een periscoop (zie afbeelding 7). Deze oplossing heeft twee sterke punten: de optische weglengte van de laserbundel is constant en de spiegelconfiguratie zorgt ervoor dat het bundelprofiel behouden blijft. Daardoor levert deze optische arm overal op het te scannen oppervlak een bundel met gelijke eigenschappen af. De ontwerpogave die dan nog rest is de nauwkeurigheid waarmee het oppervlak wordt gescand. Als die voldoende is, dan is een uniforme bestraling van het oppervlak gegarandeerd.

Het scannen van het oppervlak moet gebeuren

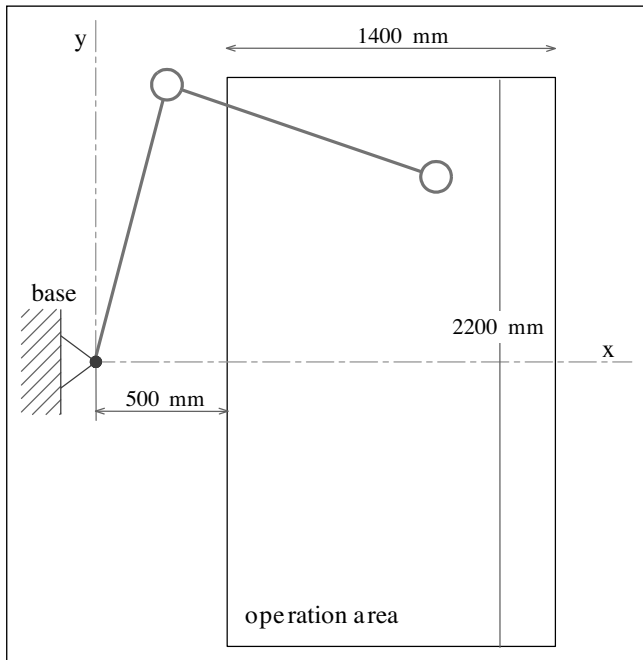
door de kop, daar waar de bundel uit de optische arm treedt. Dat kan actief, met een (antropomorfe) arm die is uitgerust met motoren in de gewrichten en die in polaire coördinaten opereert, zoals de menselijke arm. Het kan echter ook passief, met een manipulator die een beweging aan de kop voorschrijft (zie afbeelding 7). Deze laatste oplossing ligt voor de hand: het scannen van het oppervlak vindt, gezien het rechthoekige profiel van de laserbundel, bij voorkeur plaats langs rechte (horizontale) lijnen. Dit is eenvoudig te realiseren met een xy-manipulator, waarbij de bewegingen in de x- en de y-richting zijn ontkoppeld. Voor het ontwerp is dat gunstig omdat aan de beweging in de x-richting, met veel snelle opeenvolgende bewegingen, andere eisen worden gesteld dan aan de beweging in de y-richting, een enkele stap aan het eind van een x-scan. Bovendien ondersteunt de manipulator de kop aan het uiteinde van de optische arm, op het punt waar de scanning plaatsvindt, hetgeen resulteert in de grootst mogelijke nauwkeurigheid en stijfheid van het scannersysteem.

Het scannersysteem met optische arm en xy-manipulator. Links een schematische weergave van de positionering van de spiegels in de optische arm, volgens het principe van de periscoop.

Vrijheidsgraden



Ontwerpen voor grote nauwkeurigheid kan volgens een mechanische benadering, waarbij een ontwerp moet worden gefabriceerd, gepositioneerd en gecalibreerd met grote precisie. Dit vraagt met name veel van de positionering van de spiegels in de arm. De mechatronische ontwerpbenadering gaat uit van een minder extreme mechanische precisie en brengt daar vervolgens verbetering in door voorspelbare fouten, bijvoorbeeld een systematische drift afhankelijk van de positie, in een nauwkeurige calibratie vooraf te bepalen en daarvoor vervolgens te corrigeren in de besturing van het systeem. Met minder investering in de mechanische nauwkeurigheid wordt zo toch een beter resultaat



De optische arm kent drie gewrichten: schouder, elleboog en pols (zie afbeelding 8). Bij de schouder is de arm bevestigd aan een frame, de elleboog maakt een draaiing mogelijk met behoud van bundeleigenschappen en bij de pols is de scanningkop losjes bevestigd aan de xy-manipulator. Bij het ontwerp van de optische arm wordt de uiteindelijke onnauwkeurigheid in de positionering van de laserspot bepaald door de stijfheid van de arm, de lagering in de gewrichten en de uitlijning van de spiegels.

Afbeelding 8. Bovenaanzicht van de optische arm in doorsnede.

bereikt.

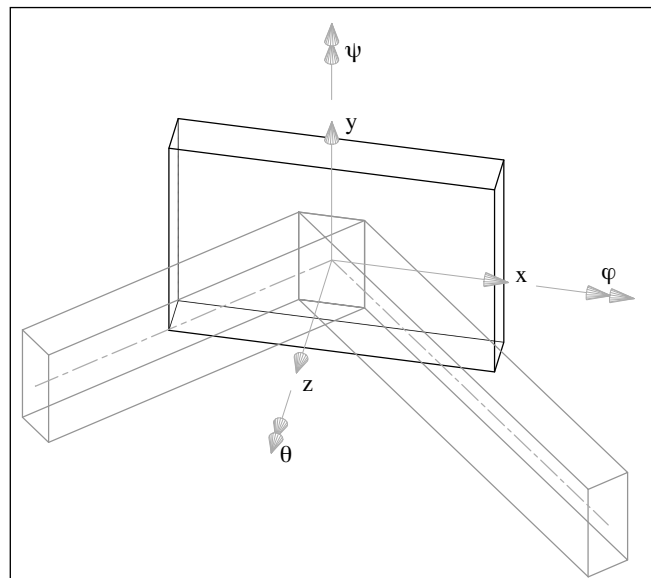
Nauwkeurigheid vraagt om het elimineren van speling en terugslag in draaiverbindingen, door lageringen voor te spannen, en om een hoge mechanische stijfheid. Deze stijfheid mag echter niet door overbepaling worden gerealiseerd. Want die leidt tot onvoorspelbare interne krachten, derhalve onvoorspelbare wrijving en daardoor, ten slotte, tot onvoorspelbare positiefouten. Dit kan alleen worden voorkomen als de vrijheidsgraden correct zijn bepaald en het ontwerp daadwerkelijk het juiste aantal coördinaten vastlegt. In de praktijk schort het hier nog wel eens aan, wanneer ontwerpers voor een overbepaald ontwerp kiezen, om met de stijfheid aan de veilige kant te blijven.

Een beschouwing over de scanningkop kan dit illustreren. De afstand van de kop tot het oppervlak van het schilderij moet constant blijven. Dit betekent dat de z-coördinaat, loodrecht op dat oppervlak, moet worden vastgelegd. Dit is mogelijk door een hoge stijfheid van de optische arm te realiseren of door de kop vast aan de xy-manipulator te bevestigen, maar niet door beide acties tegelijk. In het ontwerp is gekozen voor een stijve arm en een 'losse' verbinding van de kop aan de xy-manipulator door middel van een bladveer.

Optische arm

Stijfheid

Extra buizen zorgen voor de buig- en torsiestijfheid van de arm, waarbij bladveerverbindingen overbepaling in het systeem voorkomen. Uit een beschouwing van de stijfheid van de optische arm valt af te leiden dat deze maximaal is voor een arm met twee ledematen van gelijke lengte. Bij een te bewerken oppervlak van $1400 \times 2200 \text{ mm}^2$ is een lengte van 1200 mm voor een ledemaat



volgende om het gehele oppervlak te bestrijken, zonder dat extreme standen (zoals de gestrekte) voorkomen, waarin grote versnellingen van met name het ellebooggewricht kunnen optreden (zie afbeelding 9).

Afbeelding 9. Bereik van de optische arm.

Lagering

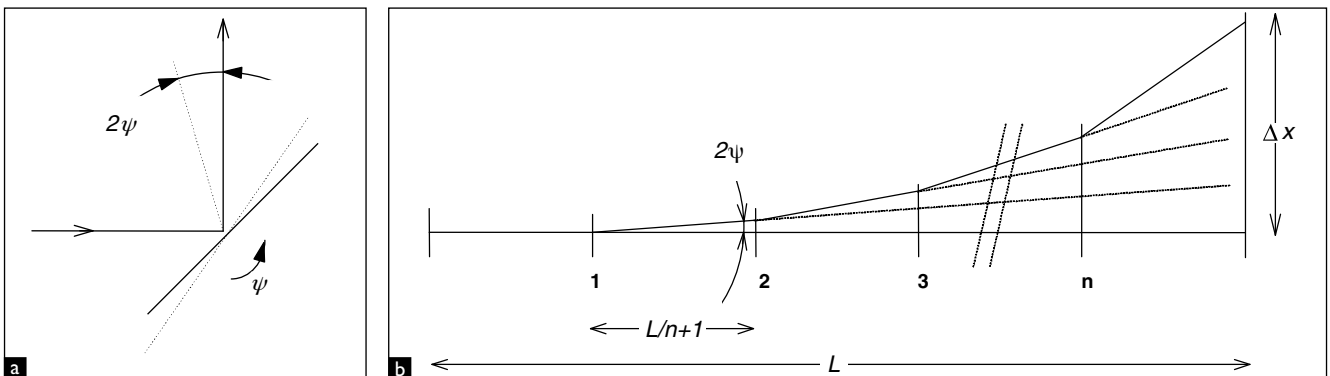
De lagering in de gewrichten is met name kritisch in het ellebooggewricht, waar de rotatie-as van dat gewricht moet samenvallen met de optische weg van de laserbundel. De oplossing die daarvoor gekozen is bestaat uit voorgespannen lagers in een zogeheten O-opstelling, die zorgt voor een grote stijfheid. Bovendien moet het ellebooggewricht, en dus lagering, licht uitgevoerd worden om natrielingen te minimaliseren van uitslagen die kunnen optreden bij minder gunstige standen van de optische arm (schaareffect). Bij de lagering in schouder- en polsgewricht wordt voorspanning door de constructie aangebracht. De totale lagerconstructie is zo ontworpen dat deze stijver is dan de optische arm zelf. Bovendien maakt de gekozen constructie het mogelijk dat de spiegels in- en uitgemonteerd kunnen worden zonder de lagers te hoeven demon-

teren.

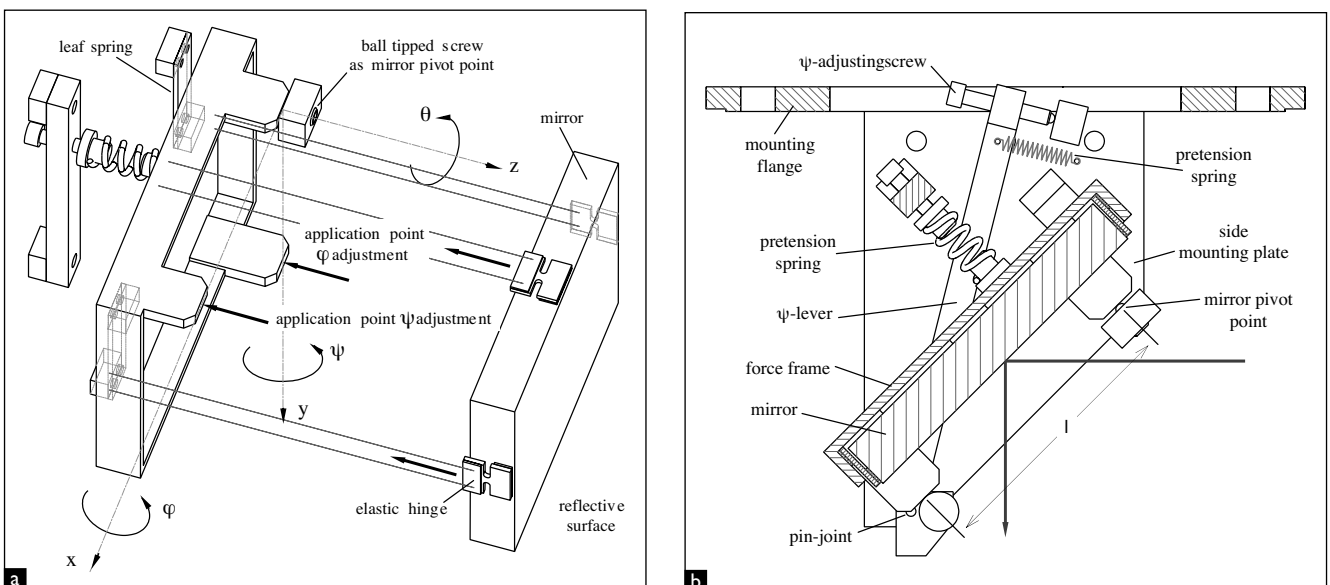
Uitlijning spiegels

De meest kritische factor voor de nauwkeurigheid van de positionering van de laserspot, ten slotte, is de uitlijning van de spiegels. Het gaat om vijf spiegels, vier in de optische arm en een spiegel die de uittredende laserbundel in de optische arm stuurt. Deze extra spiegel voorkomt het moeizame exacte uitlijnen van de zware laser ten opzichte van de optische arm.

Voor een nauwkeurige uitlijning kan een mechanische ontwerpaanpak worden gevolgd, die uitgaat van precisie montage van alle spiegels, onder hoeken van exact 45° met de rotatie-as van het gewricht waarin de betreffende spiegel zich bevindt. Het alternatief is bij voorbaat uitgaan



Afbeelding 11. Afbuiging van de bundel door variatie in spiegelhoek ψ (links) en worst-case resultaat voor n spiegels.



Afbeelding 12: De spiegelhouder in 'exploded view' (a) en zijaanzicht (b).

van een niet-exacte uitlijning en voorzien in een regelmechanisme voor het na fabricage en montage zo nauwkeurig mogelijk uitlijnen van de spiegels. Dat uitlijnen kan simpelweg handmatig gebeuren, met stelschroeven, of regeltechnisch met actuatoren die elektrisch worden aangestuurd. In dit geval blijkt de handmatige oplossing voldoende nauwkeurigheid op te leveren (zie hierna). Het feit dat de extra belasting van de optische arm veel minder is dan bij een regeltechnische oplossing, geeft in het ontwerp de doorslag ten gunste van handmatige uitlijning. Wederom een voorbeeld van een mechatronische aanpak, in die zin dat niet in één discipline met veel moeite een maximale precisie wordt nagestreefd, maar met inbreng van een andere discipline eenvoudiger het gewenste resultaat wordt bereikt. In dit geval zo eenvoudig dat een handmatige oplossing volstaat.

male hoeknauwkeurigheid van $\psi = 2,75$ arcsec.

Het ontwerpen van een nauwkeurige positionering van de spiegels begint met een beschouwing van de vrijheidsgraden (zie afbeelding 10).

Afbeelding 10. De zes vrijheidsgraden van een spiegel.

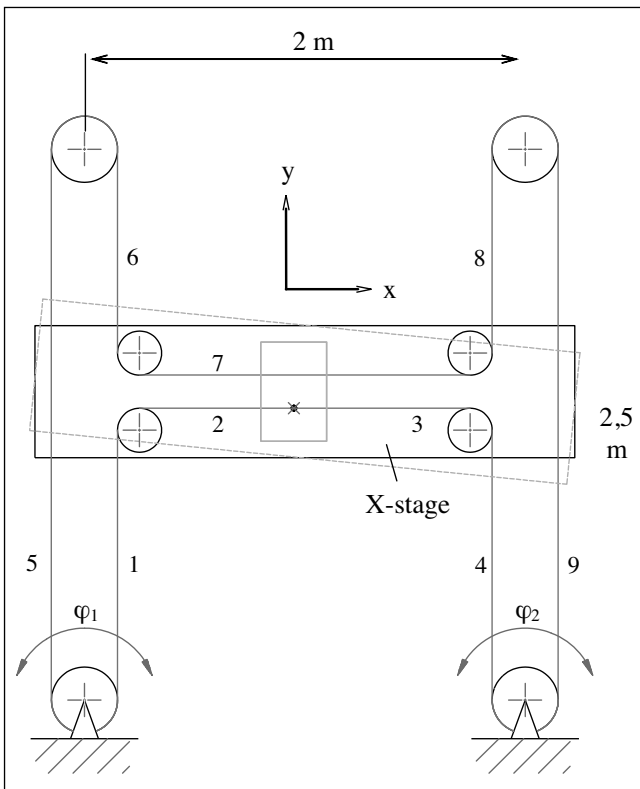
Drie vrijheidsgraden spelen hier geen rol. Variaties in x , y en θ leiden namelijk niet tot een drift van de laserbundel. Variaties in z , φ en ψ leiden daarentegen wel tot een drift van de bundel. Daarbij heeft een variatie in ψ het grootste effect. Een verandering van ψ leidt tot een verandering 2ψ in de oriëntatie van de bundel (zie afbeelding 11). De totale verschuiving Δx van de spot aan het eind van een weglengte l , waarin zich spiegels i ($i = 1$ tot n) bevinden, is dan volgens een worst-case beschouwing:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n l_{i+1} \cdot 2 \cdot \psi$$

[* sommatie \sum loopt van $i = 1$ tot n *]

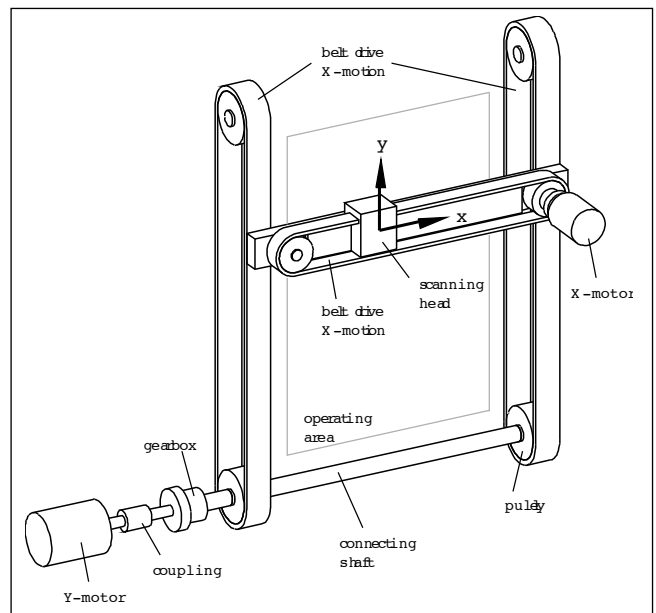
Bij de globale specificaties is eerder een laterale resolutie van $40 \mu\text{m}$ opgevoerd. Omdat bij opeenvolgende stappen van de laserspot de gemaakte fout nagenoeg even groot zal zijn, zal deze laterale resolutie (een soort relatieve fout tussen die opeenvolgende stappen) veel kleiner zijn dan de absolute fout. Dat leidt in de haalbaarheidsstudie [Scholten] tot een Δx van maximaal $0,2 \text{ mm}$. Bij een weglengte van 3000 mm geldt dan een maxi-

Bovenstaande beschouwingen over de nauwkeurigheid van uitlijning hebben geleid tot het ontwerp van een spiegelhouder die ruimte biedt aan een spiegel van $50 \times 70 \text{ mm}^2$ en die eenvoudig in de optische arm kan worden gemonteerd zonder



de arm verder te demonteren (zie afbeelding 12 a). De spiegelhouder zorgt voor het instelbaar vastleggen van de drie vrijheidsgraden z , φ en ψ en houdt drie vrijheidsgraden (θ , x en y) over. De spiegel is middels elastische scharnieren verbonden aan een krachtenframe. Verstelkrachten en voorspankrachten grijpen aan op dit krachtenframe, waarbij de door elastische scharnieren opgehangen spiegel niet belast wordt en dus ook niet vervormt. Een bijkomend voordeel is dat bij benadering sprake is van een thermisch centrum, waardoor temperatuurvariaties niet leiden tot ongewenste veranderingen in de positie of oriëntatie van de spiegel.

Voor afregeling van de meest kritische coördinaat, ψ , is gekozen voor een hefboom met stelschroef (zie afbeelding 12 b). Bij een overbrengingsverhouding van 1:20 en een afstand l van 56 mm tot het kantelpunt, vertaalt de benodigde hoeknauwkeurigheid (2,75 arcsec) zich in een hefboomverplaatsing van 0,015 mm. Bij een simpele M3 stelschroef met spoed 0,5 mm is dit een draaiing van 11° . Dat is ergonomisch goed moge-



lijk met de hand. Conclusie is dat bij calibratie handmatige fijnstelling van de spiegels mogelijk is. Calibratie vindt plaats met behulp van een HeNe laserbundel ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), waarvoor de spiegels – die immers maximaal reflecteren bij $\lambda = 248 \text{ nm}$ – gedeeltelijk doorlatend zijn. De doorgaande bundel wordt achter elke spiegel gedetecteerd met een fotodiode achter een uiterst klein gat in een flens die op de optische arm is gemonteerd.

xy-manipulator

Na het ontwerp voor de optische arm volgt de xy-manipulator die de scanningbeweging van de kop van de optische arm met korte, snelle bewegingen moet verzorgen. Omdat scanning in horizontale richting plaatsvindt, is de beweging in de x -richting de meest kritische. De scanning in x -richting verloopt typisch in stappen h_m van 2,5 mm in een tijd t_m van 0,1 s. De maximale plaats-

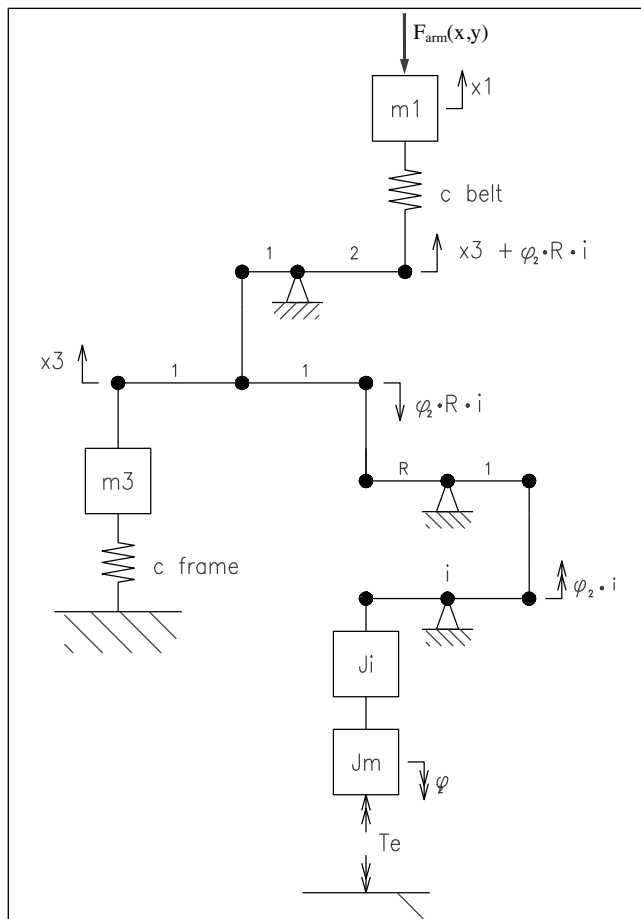
fout u_0 was eerder al bepaald op 0,04 mm. Dat leidt tot een relatieve plaatsfout $U_0 = u_0 / h_m$ van 0,016. De maximale snelheid wordt op 300 mm/s gesteld om binnen een acceptabele tijd het totale werkgebied te kunnen bestrijken.

Een dergelijke scanningstap wordt door een motion controller met een input $h(t)$ aan de x-actuator opgelegd. Een simpele rampfunctie geeft discontinuïteit in snelheid, wat regeltechnisch een complexe oplossing vraagt. Een parabolische functie bij wijze van 'nette' input heeft dan de voorkeur, daar waar functies van nog hogere orde te rekenintensief kunnen worden. In dat geval is de maximale versnelling $a_{max} = 4 \cdot h_m / t_m^2$; deze bedraagt dan 1 m/s^2 .

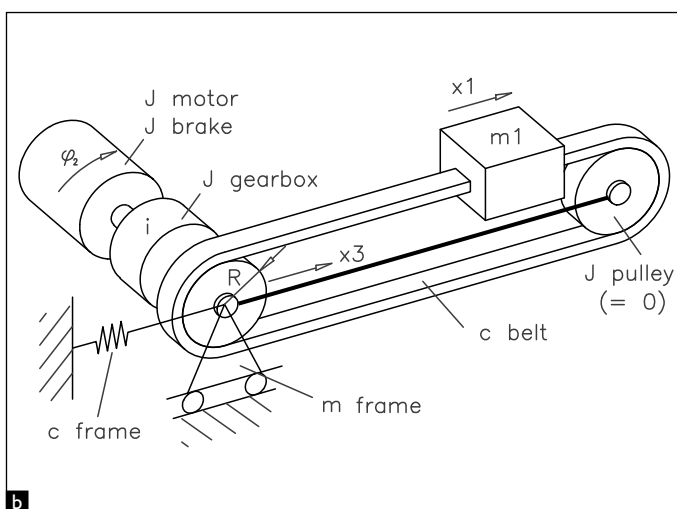
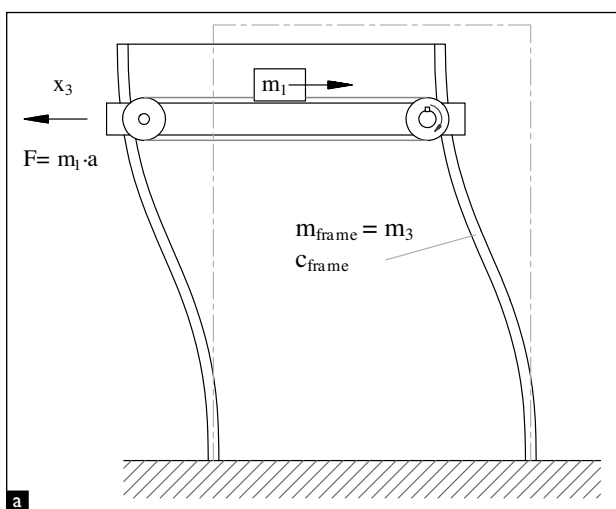
Vervolgens kunnen de bewegingsvergelijkingen voor de optische arm worden opgesteld en opgelost [Scholten, appendices]. Voor de massa's van de beide ledematen wordt 4 kg genomen en voor de massa's van spiegel en lagering in elleboog- en polsgewricht respectievelijk 2 en 1 kg.

De kracht op het polsgewricht varieert afhankelijk van de posities van de ledematen. Met inbegrip van een massa van 5 kg voor de x-stage (het bewegende systeem voor het scannen in de x-richting) en daarop geplaatste monitoringapparatuur, blijkt de maximaal optredende kracht een belasting van 21,5 kg voor de beweging in de x-richting te representeren.

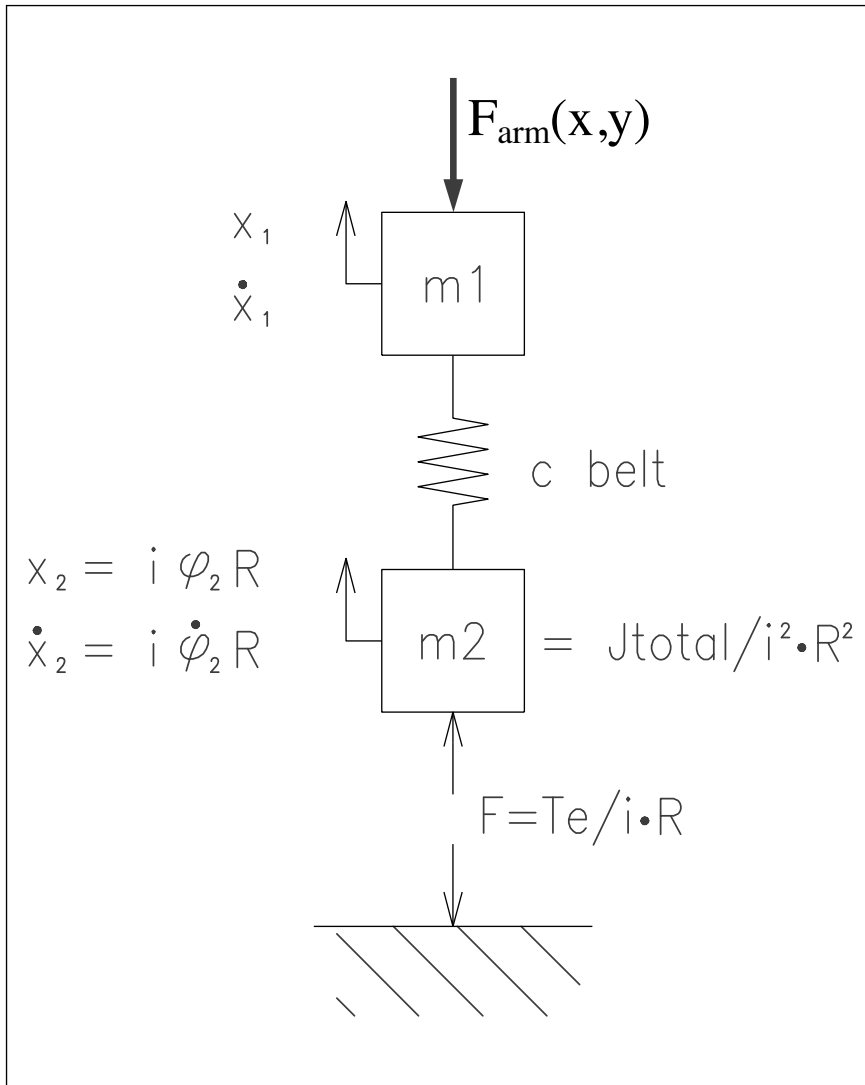
Voor het systeem wordt tevens de laagste eigenfrequentie, bij geblokkeerde actuator, berekend



uit $\omega_m = 2\pi / (\tau_m t_m)$, waarin τ_m de dimensieloze



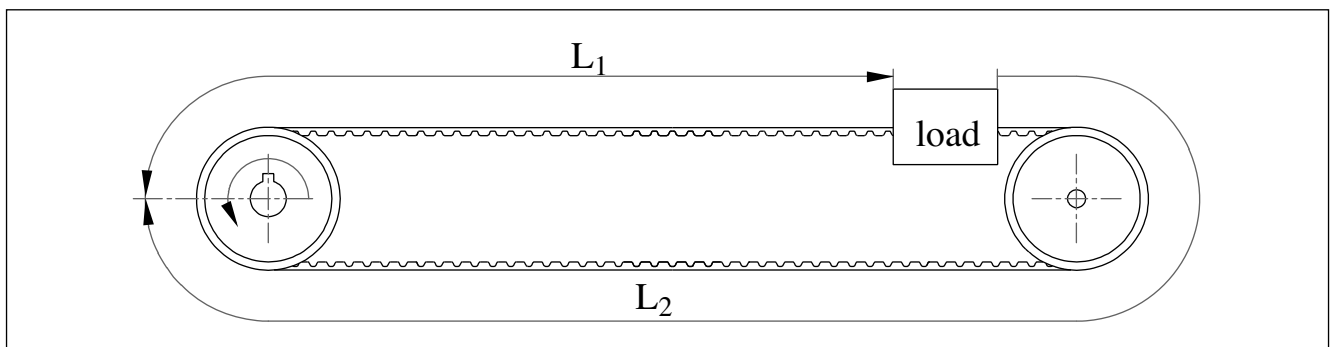
Afbeelding 15. De beweging in de x-richting: (a) reactie van het frame op een versnelling en (b) schematisch massa-veermodel van de aandrijving.



Afbeelding 17. Gereduceerd vierde-orde dynamisch model van de x-beweging.

periode van het systeem is volgens $\sqrt{5 \cdot U_0}$. Deze frequentie bedraagt 35 Hz. De maximaal benodigde stijfheid c_x is dan $m_{x-load} \omega_m^2 = 1 \cdot 10^6$ N/m. Voor een nadere toelichting op bovenstaande berekening wordt verwezen naar [Koster, Van Luenen en De Vries].

Voor de y-beweging kan een analoge berekening worden uitgevoerd, met een stap van 30 mm, gegeven de relatief grote hoogte van de dwarsdoorsnede van de laserbundel. De maximale versnelling van 1 m/s^2 levert een tijdstap van 0,35 s, een maximale belasting van 56 kg (inclusief een massa van 25 kg van de y-stage), een laagste eigenfrequentie van 10 Hz en een stijfheid c_y van $2,3 \cdot 10^5$ N/m. Speling komt als een speciaal punt van aandacht naar voren uit het rekenwerk aan de bewegingsvergelijkingen. De kracht in de x-richting kan op een gegeven punt van teken omdraaien. Als de kracht nul is heeft de speling vrij spel. Daarom is voor een speciale harmonic drive (SKF) gekozen, die nagenoeg spelingsvrij is. In de y-richting speelt dit probleem niet



Afbeelding 18. Minimum-stijfheid configuratie van riem met last.

omdat de zwaartekracht als het ware voor een voorspanning zorgt.

Conceptkeuze

Aan de hand van bovenstaande berekende waarden van de stijfheid voor beweging in de x- en in de y-richting, kan de keuze van een concept voor de xy-manipulator worden onderbouwd.

Een eerste optie is een schroefspindel met kogelomloopmoer. Dit geeft een schroefbeweging, waarbij de x- danwel de y-stage, aangedreven door de schroef, over een lineaire geleider loopt en de moer zodanig aan de stage is bevestigd dat het systeem niet wordt overbepaald. De totale stijfheid van een dergelijk schroefstelsel wordt bepaald door de axiale en de torsiestijfheid. Voor een stalen schroef met een spoed van 15 mm, een diameter van 20 mm en een lengte van 2,5 m wordt een stijfheid berekend van $2 \cdot 10^7$ N/m. Dat is op zich voldoende. De eigenfrequentie voor buiging komt echter vanwege de grote lengte van de schroef uit op een lage waarde van iets meer dan 9 Hz. Zelfs met de relatief grote spoed van 15 mm levert dat een maximale snelheid op van slechts 135 mm/s, wat ver beneden de specificatie van 300 mm/s ligt. Daarom valt het schroefconcept af.

Een alternatief voor de xy-manipulator is aandrijving met een enkele, gesloten riem, aangedreven door twee motoren, die bij rotatie in dezelfde richting een verplaatsing in de x-richting bewerkstelligen, en bij rotatie in tegengestelde richting een y-verplaatsing (zie afbeelding 13).

Afbeelding 13. Een xy-manipulator met aandrijving van een enkele, gesloten riem.

De stijfheden voor beweging in de x- en de y-richting blijken minimaal in de orde van $1 - 2 \cdot 10^6$ N/m te liggen. Dat is op zich voldoende. Nu kan er echter geen rotatiestijfheid aan het systeem ontleend worden omdat de rotatiecoördinaat van de x-stage niet vastligt, als gevolg van de loop van de riem. Een alternatief met een gewijzigde loop van de riem heeft voldoende stijfheid voor rotatie van de x-stage, maar blijkt weer een ongunstige stijfheid voor de y-beweging op te leveren. Blijkbaar is hier principieel sprake van

een uitruil van stijfheden.

De oplossing wordt gevonden in het ontkoppelen van de x- en de y-beweging, door voor de x-beweging een aparte gesloten riemaandrijving te gebruiken en voor de y-beweging zelfs twee afzonderlijke gesloten riemen, aangedreven door één as (zie afbeelding 14). Het vasthouden aan riemaandrijving houdt onder meer verband met het grote bereik, de eenvoudige verbinding met een lineaire geleider en de mogelijkheid van lichtgewicht constructie. Bovendien blijkt de niet al te grote nauwkeurigheid bij aandrijving met tandriemen toch te voldoen. Want de fout die bij opeenvolgende stappen in de x-richting en bij scans voor opeenvolgende y-posities optreedt, zal reproduceerbaar min of meer constant zijn. Een eenvoudige constructie met een niet verwaarloosbare fout leidt dan toch tot een goede laterale resolutie.

Afbeelding 14. Het xy-manipulator concept met afzonderlijke riemaandrijvingen voor de x- en de y-beweging.

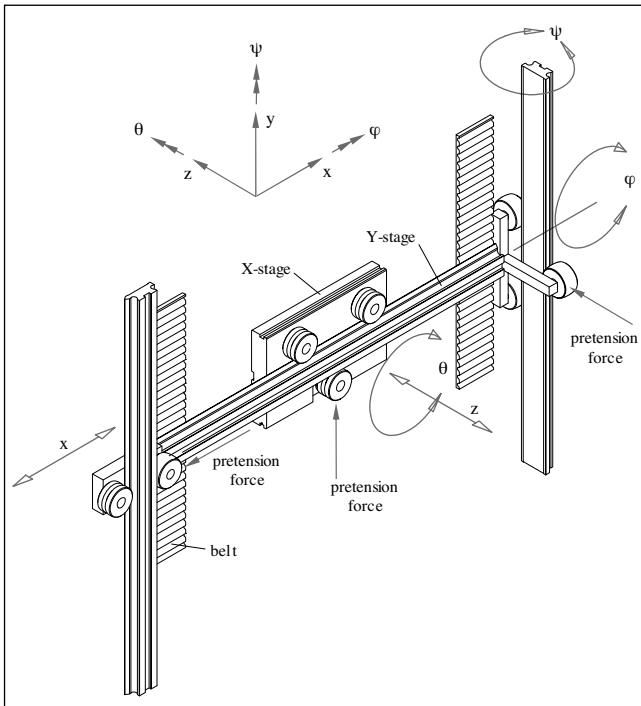
Een uitvoering met twee riemen voor de y-beweging heeft als mogelijk nadeel dat de twee riemen ongelijk belast worden afhankelijk van de positie van de scanningkop. Een scheve stand van de x-stage kan echter eenvoudig worden bepaald met linialen langs de beide y-geleiders. Gecombineerd met een liniaal langs de x-geleider kan de exacte positie van de scanning kop worden bepaald als ook de in principe bekende doorbuiging van de x-stage wordt meegenomen.

Riemaandrijving vereist wel toepassing van een voorspanning met een kracht die groter is dan de maximaal optredende kracht in het systeem (zie verderop).

Modellering

Nu een concept is gekozen, moet in modelstudies worden geverifieerd of de specificaties behaald kunnen worden. Daartoe worden de dominante massa's en stijfheden bepaald, zodat het systeemontwerp kan worden geoptimaliseerd. Aan de hand hiervan kan uiteindelijk de motorkeuze worden bepaald. Zie ook [Koster, Van Luinen en De Vries].

Wederom zal dit voor de kritische beweging, die in de x-richting, worden behandeld. Een versnelling van de x-stage zal leiden tot een belasting

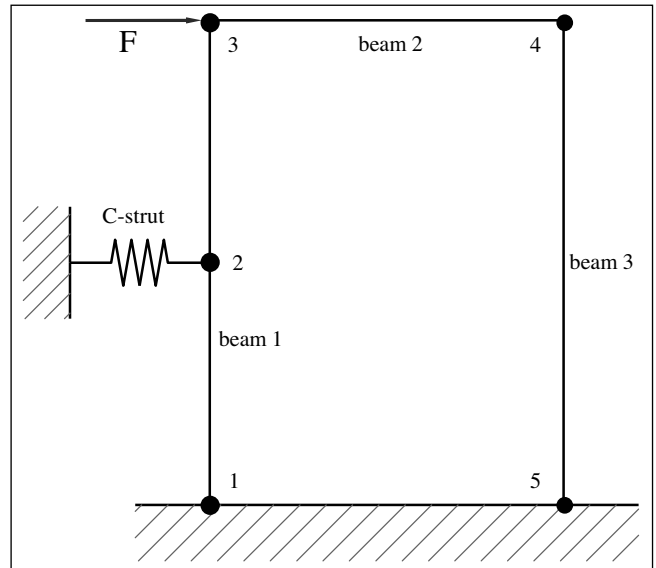


Afbeelding 19. De vrijheidsgraden van de lineaire geleiders voor de x- en de y-beweging.

van het frame, zodat dit wordt vervormd zoals aangegeven in afbeelding 15 a. Dit kan worden vertaald naar een massa-veermodel, zoals schematisch weergegeven in afbeelding 15 b.

In de aandrijving is een overbrenging opgenomen om met een realistische motorkeuze een maximale output qua snelheidsbereik, torsiestijfheid en versnelling te kunnen verkrijgen. Dat vraagt wel om aanpak van de speling die daarmee wordt geïntroduceerd. Praktisch houdt dat in het toepassen van een harmonic drive (SKF), het aanbrengen van voorspanning en het zoveel spelingsvrij koppelen van de last aan de riem.

Het massa-veermodel van afbeelding 15 b kan worden omgezet in een dynamisch model (zie afbeelding 16). Dit is een zesde-orde model, omdat er drie (gecombineerde) massa's aanwezig zijn: massa en stijfheid van het frame (m_3 en c_{frame}), massa van de last en stijfheid van de riem (m_1 en c_{belt}) en de massa's van motor en overbrenging (J_m en

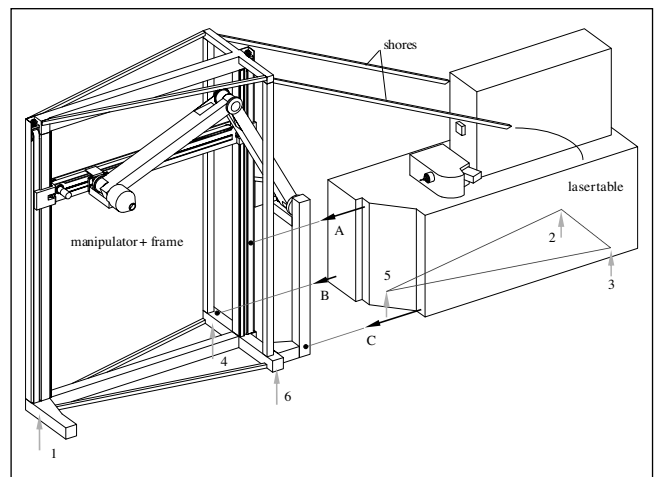


Afbeelding 20. Model van het frame.

J_1). Dit model kan gereduceerd worden tot een vierde-orde model, onder de aanname dat de stijfheid van het frame zeer groot is, waardoor de framereactie x_3 kan worden verwaarloosd. Verderop wordt deze aanname onderbouwd.

Afbeelding 16. Dynamisch model van de x-beweging.

Het resulterende model is weergegeven in afbeelding 17. De stijfheid van de riem blijkt de dominante factor. Gegeven een specifieke stijfheid van



de riem ($c_{spec} = 1,87 \cdot 10^6$ N/m), kan de stijfheid

van de riem worden berekend volgens $c_{\text{belt}} = L_{\text{belt}} c_{\text{spec}} / (L_1 L_2)$, zie afbeelding 18. Deze stijfheid is minimaal $2,42 \cdot 10^6$ N/m, als de last m_1 het verst verwijderd is van de motor. Dit resultaat ligt ruim boven de specificatie van $1 \cdot 10^6$ N/m.

Voor de y-beweging kan een vergelijkbare stijfheidsberekening worden uitgevoerd, waarbij de stijfheden van de riemen, de torsiestijfheid van de as die beide riemen aandrijft en de stijfheid van de x-balk moeten worden meegenomen. De totale stijfheid is dan een functie van de positie (x,y) van de scanningkop. Met de modelvergelijkingen kan nu de variatie in de totale stijfheid bepaald worden; deze blijkt in de range $1,1 - 5,5 \cdot 10^6$ N/m te liggen, ruim boven de gevraagde $2,3 \cdot 10^5$ N/m.

Tevens kan de statische afwijking in de y-richting worden bepaald, ten gevolge van doorbuiging van de x-balk, torsie van de aandrijvingsas en doorzakken van de riemen. Deze positiefout in de y-richting blijkt tussen 0,015 en 0,060 mm te liggen. Daarmee lijkt de maximaal aanvaardbare

positiefout van 0,040 mm te worden overschreden, maar deze fout in y zal niet optreden tussen opeenvolgende scans in x-richting, die immers nagenoeg hetzelfde verloop kennen. De fout tussen opeenvolgende y-posities ligt veel lager dan de gevonden 0,060 mm. Kortom, ook aan deze specificatie is voldaan.

Motorkeuze

Nu de x- en y-bewegingen zijn doorgerekend en de gewenste nauwkeurigheden bekend zijn, is het ontwerp van het servo-systeem voor de motion control aan de orde, met als eerste onderwerp de motorkeuze. Stappenmotoren komen hiervoor niet in aanmerking omdat die niet geschikt zijn voor hoge snelheden. De voorkeur gaat uit naar borstelloze servo-motoren vanwege hun performance qua snelheid en versnelling, warmtedissipatie, minimaal onderhoud (geen borstels vervangen) en compacte inbouwafmetingen. Aan de motor kan nog een rem worden toegevoegd voor het geval van spanningsuitval of wanneer de optische arm langdurig in bepaalde posities moet worden gehouden. De keuze is uit een groot aantal motoren met uiteenlopende karakteristieken. Een keuze daaruit vergt iteratieve berekeningen omdat verschillende motor- en transmissieparameters aan de specificaties moeten voldoen en omdat die parameters zelf invloed op het gedrag van het aandrijvingssysteem hebben. Deze invloed wordt bijvoorbeeld uitgedrukt in de factor α , die de verhouding tussen de massa van de aandrijving en de totale massatraagheid (aandrijving + belasting) weergeeft. Ideaal is de verhouding 0,5, de situatie van zogeheten traagheidsmatch ('inertial match'). In de praktijk is een bepaalde range voor α acceptabel, waarbij α zeker niet te groot mag worden. Want als een te zware motor een te lichte belasting aandrijft, kan het systeem instabiel worden. Gegeven een maximale belasting van 65 N, bij een transmissieverhouding van 1:50 en een diameter van de aandrijfpoelie van 4 cm en rekening houdend met verliezen in de transmissie moet de motor een maximaal koppel kunnen leveren in de orde van 0,3 Nm. Verder is vooral de steilheid van de motor van belang. Deze parameter geeft aan hoe een variatie in de

belasting zich verhoudt tot de resulterende verandering van de snelheid van de motor. Bij voorkeur moet deze steilheid zo groot mogelijk zijn, zodat een verandering in belasting slechts een kleine snelheidsverandering tot gevolg heeft.

Een analoge beschouwing kan voor de y -beweging worden gehouden, waarbij vooral de veel grotere massastraagheid van de y -stage vraagt om een zwaardere motor, met een maximum koppel in de orde van 1,5 Nm.

Motorregeling

Vervolgens moet de optimale regeling van de motor worden bepaald. Volgens het gereduceerde model van afbeelding 17 zijn twee elementen van belang, de motormassa (m_2) en de massa van de belasting (m_1). Beiden hebben positie en snelheid als kandidaten voor de servo-regeling. Met twee variabelen kan een stabiele regeling worden gerealiseerd. Wanneer daarvoor positie en snelheid van de motor worden gekozen, wat op zich het eenvoudigst is te realiseren, dan wordt de onnauwkeurigheid die de transmissie introduceert echter gemist. Het alternatief waarbij op zowel positie als snelheid van de last wordt geregeld heeft als nadeel dat hiervoor slechts een zeer beperkt stabiliteitsgebied geldt voor de factor a , die de variatie in belasting weergeeft. De uiteindelijke keuze is daarom voor regeling op motorsnelheid en positie van de belastende massa. Daarvoor geschikte sensoren zijn respectievelijk een 'resolver' voor de motorsnelheid en een lineaire encoder op basis van magnetische tape. De signalen van deze sensoren vormen de input voor een PD- of PID-regelaar, tesamen met de stap h_m die de motion controller oplegt.

MATLAB-simulaties voor verschillende, extreme waarden van α laten zien dat zelfs met een simpele PD-regeling de bandbreedte van het geregelde systeem voor de x -beweging tussen 45 en 67 Hz ligt. Dat is groter dan de eerder berekende laagste eigenfrequentie van 35 Hz, wat betekent dat het systeem voldoende snel is. Bovendien blijkt de relatieve positiefout met een maximale waarde van 0,0045 ver beneden de eerder gespecificeerde 0,016 te blijven. Voor de y -beweging gelden dezelfde conclusies. Simulaties met een PID-regelaar laten een sta-

biele regeling zien, zelfs als een random verstrooiing wordt geïntroduceerd.

x- en y-stage

Ten slotte passeert het ontwerp van de x - en de y -stage de revue. Hier zijn wederom de kinematische principes toegepast, zodat alle niet-vrije coördinaten slechts één keer zijn vastgelegd. Afbeelding 19 toont de x -stage met geleidewielen die beweging in de x -richting vrijlaten, maar door hun geometrie en de toepassing van voorspanning, alle andere coördinaten vastleggen zonder overbepaling.

Het frame

Bij de modelvorming was een grote stijfheid van het frame verondersteld. Dat moet hier nog worden onderbouwd. Uit MATLAB-simulaties blijkt een frame met een massa van 35 kg en een totale stijfheid van $1 \cdot 10^7$ N/m te voldoen. Berekeningen aan het model uit afbeelding 20 leveren echter, zelfs met toevoeging van verstevigingen, een massa van 85 kg bij een stijfheid van $8,3 \cdot 10^5$ N/m op. Deze lage waarde heeft natuurlijk alles te maken met de grote afmetingen van het frame.

Omdat het vooral gaat om de stijfheid in het xy-vlak, waarin immers de beweging van de manipulator plaatsvindt, wordt de oplossing gezocht in een dunne plaat in dit vlak. Een glasplaat levert de gewenste hoge stijfheid-massa verhouding, biedt bovendien bescherming tegen eventuele gereflecteerde laserstraling en biedt maximaal zicht op de opstelling. Een glasplaat van $2 \times 2,6$ m² en 7 mm dik levert een stijfheid van $5,57 \cdot 10^7$ N/m, bij een massa van slechts 47 kg. Deze oplossing voldoet dus ruimschoots.

Het ontwerp voor het laser cleaning station is hiermee voltooid. Om redenen van transporteerbaarheid wordt het geheel in twee delen uitgevoerd: een lasertafel en een manipulatorframe. De twee delen worden aan elkaar bevestigd zoals getoond in afbeelding 21. Na bevestiging worden de ondersteuning 4, 5 en 6 van het laserframe opgetrokken, zodat een kinematisch correct bepaalde plaatsing ontstaat. De schoren zijn toegevoegd om het frame stijver te maken, waardoor trillingen worden gedempt. Een (kleine) overtreding van de regels der kinematica omwille van beheersing van de dynamica.

Afbeelding 21. Verbinding van lasertafel met manipulatorframe.

Tot slot

Met een elegant ontwerp is de in principe verwoestende laserbundel ingetoemd voor het delicate schoonmaken van schilderijen. De hoofdrollen in het ontwerp waren weggelegd voor de disciplines optica, mechanica en regeltechniek. Met een waarlijk mechatronische aanpak is de hoge nauwkeurigheid bereikt die voor deze lasertoe-passing absoluut vereist is. Belangrijke aspecten in het ontwerpproces zijn de systematische ana-

lyses van vrijheidsgraden, het slim toepassen van voorspanning ter vermindering van speling en andere foutenbronnen en de combinatie van bewezen constructieprincipes [Koster] met soms eenvoudige 'handwerk'-oplossingen. Het tekent de schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering.

Literatuur

M.P. Koster, *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren* (3^e druk), Twente University Press, Enschede, 2000.

M.P. Koster, W.T.C. van Luenen en T.J.A. de Vries, *Mechatronica*, collegedictaat Universiteit Twente, Enschede, 1994.

J.H. Scholten, *The development of an advanced workstation for controlled laser cleaning of paintings*, afstudeerverslag (incl. appendices) Universiteit Twente, Enschede, 1998.

R. Teule, *Kunstlicht – Schilderijen schoonmaken met lasers*, *Natuur & Techniek* 67, 11 (1999), p. 24–33.

De auteurs

Hans van Eerden is freelance tekstschrijver te Winterswijk, Hans Scholten is directeur van Art Innovation (bureau voor ontwikkeling van hoogwaardige kunstrestauratieproducten te Hengelo (Ov)) en Dennis Schipper is directeur van Demcon, ontwerp bureau voor hoogwaardige mechatronische producten, productiemiddelen en testapparatuur te Hengelo (Ov)

Met dank aan Rien Koster voor zijn constructief commentaar.

Voor meer informatie over het Laser Cleaning Station kunt u contact opnemen met ir. J.H. Scholten, technisch directeur van Art Innovation, tel. 074-2501239, e-mail hans.scholten@art-innovation.nl, internet www.art-innovation.nl.

Spanplaat en pallet

Walker Magnetics heeft een nieuwe permanent magnetische spanplaat ontwikkeld ten behoeve van het opspannen van kleine en dunne werkstukken voor slijpwerkzaamheden, de Neomicro. Dit is de opvolger van de PFF spanplaat.

De Neomicro heeft een compleet nieuw ontwikkeld magnetisch systeem, dat een 30% hogere spankracht geeft. Ook is het spanoppervlak nu 100% actief zonder zwakke zones.

Verdere verbeteringen zijn de waterdichte constructie, het nieuwe schakelsysteem en de tweemaal lagere magneetveldhoogte. Dit alles resulteert in een hogere slijpnauwkeurigheid.

Sinds enkele jaren produceert Walker Magnetics de Erofine spanplaat voor het opspannen van werkstukken ten behoeve van EDM-bewerkingen.

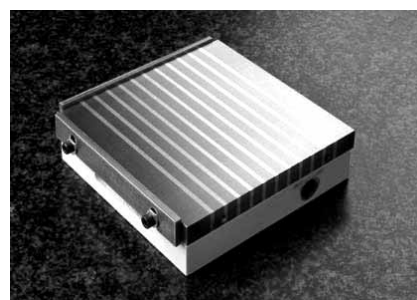
Met de opgedane ervaring introduceert Walker nu de Erogríp pallet. De Erogríp, met een grotere poolsteek dan de Erofine, heeft een grotere spankracht en is daardoor in staat de hogere krachten te weerstaan welke optreden bij het gebruik van grote elektrodes en een hoge spoeldruk.

Vanwege de hogere spankracht is de Erogríp ook toepasbaar voor het hoge snelheid frezen en is daardoor te gebruiken voor meerdere doeleinden.

Bovendien kan het huis van deze pallet worden voorzien van bevestigingsgaten op vrijwel iedere positie, waardoor de Erogríp op ieder type machine gemonteerd kan worden. Evenals de Erofine heeft de Erogríp een zilvergesoldeerde bovenplaat, een instelbare



spankracht en is vloeistofdicht. Walker Magnetics wordt in Nederland vertegenwoordigd door SGM Opspantekniek B.V.



Luchtlagering nieuwe productgroep

Met de verwerving van de vertegenwoordiging van de Amerikaanse luchtlagerings-specialist New Way heeft IBS Precision Engineering te Best een belangrijke uitbreiding van zijn leveringsprogramma gerealiseerd. New Way is een innovatieve ontwikkelaar en fabrikant van luchtlageringssystemen voor industriële toepassingen. De voordelen van dergelijke systemen zijn de totale afwezigheid van statische wrijving, de goede positionering, de zeer geringe slijtage, de ongevoeligheid voor oneffenheden op het geleidingsoppervlak en de soepele en geluidloze werking. Andere pluspunten zijn de afwezigheid van oliesmering, de uitstekende dempingseigenschappen en de mogelijkheid hoge snelheden toe te passen bij de te geleiden componenten. Om al deze redenen worden luchtlageringen steeds meer toegepast in productiemachines, meetinstrumenten, transportinstallaties en dergelijke. Het programma van New Way omvat vier

hoofdgroepen: vlakke luchtlageringen, cilindrische luchtgeleidingsbussen, vacuüm-voorbelaste luchtlageringen en luchtgelagerde platformen. Typische toepassingen van vlakke luchtlageringen zijn coördinatenmeetmachines, scanning- en visionapparatuur, machines voor materiaalbeproeving en droge metaalbewerking. Cilindrische luchtlagere worden steeds vaker ingezet voor de lagere van spullen, rotatietafels, en dergelijke. Microscopen, lithografische apparatuur, het testen en de reparatie van chips en installaties voor het richten en scherpstellen van optische apparatuur vormen het inzetgebied van de vacuüm-voorbelaste luchtlageringen. Luchtgelagerde platformen worden veel gebruikt in metrologische opstellingen, bij de productie van wafers en bij de droge bewerking van lichtmetalen.



Prijs voor De Danser

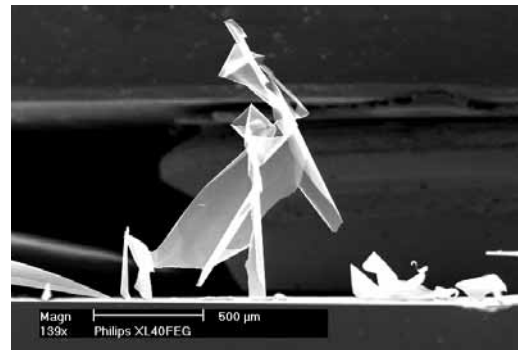
'**Making the invisible visible**', is het motto van Frans Holthuysen, scanning-elektronen-microscopist van Philips Research in Eindhoven. Frans won de Best Electron Micrograph Award tijdens de 45^e EIPBN, de International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication in Washington DC. Zijn foto toont zowel kundig vakmanschap als kunstzinnig inzicht, want de SEM-opname laat een uiterst dunne laag magnesiumoxide zien op een substraat van glas, waarbij de bizarre vorm van losgeraakt MgO Frans inspireerde tot de titel 'The Dancer'.

De vergroting van de opname, gemaakt met een Philips SEM XL40FEG met veldemissiebron, is circa 140x. De laag is losgeraakt van

de ondergrond door inwendige spanningen, die ontstonden toen op het preparaat een nog veel dunner laagje van palladium met platina werd aangebracht door middel van magnetron-sputteren. Bij elektronenmicroscopie is zo'n laagje meestal noodzakelijk om niet-geleidende preparaten elektrisch geleidend te maken. En dat is nodig om de elektronen af te voeren die het preparaat treffen. Bij opnamen met hoge resolutie voldoet een laag Pd/Pt beter dan het gebruikelijke goud, omdat Au te grofkorrelig is. De laag MgO is op het substraat ontstaan door verhitten van magnesiummethoxide, dat is aangebracht door middel van centrifugaaldepositie. Magnesiumoxide verlaagt de ontstekspanning in plasmadisplays en dient tevens als beschermende laag.

Plasmadisplays vormen een alternatief voor de zware en omvangrijke kathodestraalbuizen in breedbeeld-televisietoestellen en maken het mogelijk het ideaal van de 'picture-on-the-wall'-tv te verwezenlijken.

(Preparaat Claudia Mutter, tekst Frans Zuurveen)



Een nationale precisietechnologiesite

De NVPT heeft de afgelopen decennia aan de wieg gestaan van een aantal succesvolle initiatieven voor de precisietechnologie in Nederland, zoals het IOP Precisietechnologie en *Mikroniek*. Vanuit de NVPT is een nieuw initiatief gestart: een nationale precisietechnologiesite.

Nieuw initiatief

Internet is de afgelopen jaren een vrijwel onbeperkte bron van kennis, netwerk en informatie geworden. Echter: het internet is onoverzichtelijk. Een Nederlandse precisietechnologiesite zou hierin op nationaal niveau structuur kunnen aanbrengen. De eerste ideeën voor een nationale precisietechnologiesite zijn verder uitgewerkt en aangevuld met een projectvoorstel. Dit voorstel is voorgelegd aan het IOP Precisietechnologie.

Projectvoorstel

Bijgaande afbeelding laat een uitwerking door de NVPT van de eerste ideeën voor een precisietechnologiesite zien. Deze site zou de volgende drie functionaliteiten moeten hebben:

Informatievoorziening

Hier is de actualiteit te vinden, links naar en informatie over de eerstvolgende Precisiebeurs, EUSPEN-conferentie of de Algemene Ledenvergadering van de NVPT.

Zoeken

Denk hierbij aan de welbekende startpagina's met bedrijven of instanties betrokken bij de precisietechnologie, alfabetisch per onderwerp gegroepeerd. Ook valt te denken aan een google-achtige zoekfunctie met een database.

Interactief

Bij deze functionaliteit kan gedacht worden aan virtuele werkgroepen waar je vakgenoten op internet kunt ontmoeten om over specifieke onderwerpen van gedachten te wisselen.

Na de realisatie en on-line gaan, zal de uitgever de inhoud en de financiën van de site organiseren. Wat betreft de inhoudelijke kant (redactie), zal de NVPT een bijdrage leveren.

Het IOP Precisietechnologie

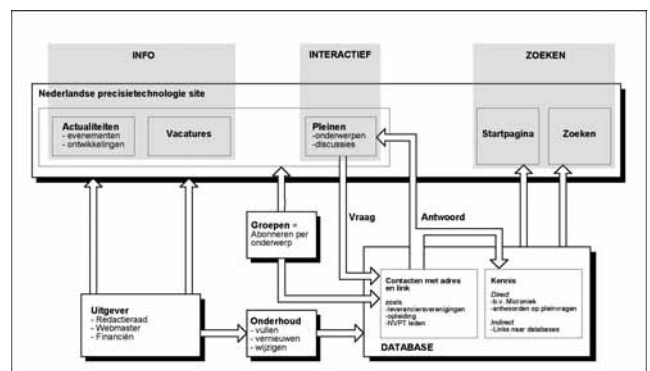
Op basis van bijgaand voorstel heeft het IOP aangegeven dit initiatief te willen ondersteunen en een subsidie ter beschikking gesteld. Samen met het Mikrocentrum, Twin Design (de uitgever van *Mikroniek*), de NVPT en het IOP Precisietechnologie, begeleid door Hartman Communicatie, is momenteel een stuurgroep bezig om een definitie van de site op te

stellen. Deze definitie vormt de basis van de realisatiefase.

Enquête

De eerste stap van de stuurgroep is een inventarisatie te maken met behulp van een enquête. Deze enquête zal toegezonden worden aan alle lezers van *Mikroniek*. We willen weten of en hoe u internet gebruikt, wat u mist, hoe u een nationale precisietechnologiesite gerealiseerd zou willen zien, et cetera. Wij hopen van harte dat u meedoet aan dit initiatief! Mocht u reeds vragen of tips hebben, dan kunt u altijd via office@nvpt.nl met ondergetekende contact opnemen.

Pieter Kappelhof



Precisiebeurs in Koningshof te Veldhoven

Op 9 en 10 oktober 2002 wordt voor de tweede keer de Precisiebeurs georganiseerd in Koningshof te Veldhoven door het Mikrocentrum met ondersteuning van IOP precisietechnologie en NVPT.

De eerste editie in 2001 is goed bezocht en over het algemeen door zowel de 1350 bezoekers als de 70 exposanten als bijzon-

der waardevol en interessant ervaren.

Naast het presenteren van diensten op de beursvloer, geven de exposanten ook lezingen over nieuwe ontwikkelingen op het gebied van precisietechnologie in ontwerp, materialen, fabricagetechnologie en in het meten van microns tot nanometers. Dit jaar zullen zeer gerenommeerde sprekers van

universiteiten en industriële kenniscentra onderwerpen behandelen over constructies, bewerkingen en verplaatsingen in het sub-micron gebied. Bent u geïnteresseerd als exposant of als bezoeker, neem dan contact op met het Mikrocentrum, Jan van Moorsel, tel 040 – 2969922 of j.moorsel@mikrocentrum.nl.

BOEKRECENSIE

LIA Handbook of Lasermaterials Processing

Een recensie door Jan Wijers:

In dit lang verwachte, volledige in zwart-wit uitgevoerde boek, dekken de goed toegankelijke bijdragen van geselecteerde specialisten vrijwel alle directe en ondersteunende laserprocessen deskundig af. De meer dan 170 schrijvers komen van over de hele wereld (grotendeels uit N-Amerika, maar een Benelux-bijdrage ontbreekt). Deze verhouding ligt wat scheef gelet op de marktverhouding. De huidige marktleaders zijn immers van het 'oude continent' afkomstig. De tekst betreft eveneens bijbehorende industriële toepassingsgebieden erbij, inclusief lucht- en ruimtevaart en de automobiel- en electronicsector; tot alle typen materiaal van staal, kunststof, rubber, hout, edelstenen en keramiek toe. Bewust zijn 'bio-materialen' weggelaten, omdat die de eigenlijke focus zouden vervagen, mede door de enorme hoeveelheid informatie. Tevens omvat het LIA Laserhandboek instrumenten, procedures, industrie- en laboratoriumuitrusting en bewakings- en bewerkingsystemen.

Een goede indruk is al te krijgen wanneer men de klein gedrukte 10 pagina's inhoudsopgave doorbladert. Daarin zijn goed op elkaar afgestemde, aparte hoofdstukken te

vinden over: lasertypes, optiek, subsystemen, laser-materiaal interactie, gevaren en veiligheid, warmtebehandeling, cladden-glazen-reinigen, hard/zacht solderen, geleidings-/penetratie-lassen, snijden, boren, balanceren en markeren. Een ruim en alleszins redelijk overzicht van Rapid Prototyping, met een omvangrijke vergelijkingstabel van RP-processen en specificaties, ontbreekt niet. Verder krijgen trimmen, graveren, reparatiemethodes voor leggen/verbreken van sporen, substraten en fotomaskers, fotolithografie, laserondersteuning in fabricage van platte beeldschermen, hoge temperatuur halfgeleiders, microstructureren, electronic packaging, verbinden, sealen plus keramiekbewerking, lagen opbrengen en legeren aandacht. Waarschijnlijk doordat het zo'n vijf jaar kostte om het boek samen te stellen, ontbreken enkele noviteiten als 'remote-welding', laserpolijsten en de vastestof laser in schijfvorm.

Alleen waar echt nodig wordt theorie opgevoerd. De meeste nadruk ligt op de uitkomsten van de theorie, zoals die van belang zijn voor genoemde bewerkingen. Geregeld vindt de lezer een vergelijking op kosten en

specifieke kenmerken met concurrerende, traditionele technieken.

De beste classificatie van deze 'laserbijbel' is: een uitstekend en omvangrijk vaktechnisch referentiewerk, met een minimum aan literatuurverwijzingen, in lijn met de aard van een echt handboek van 'n dergelijke klassieke vorm. Dit *LIA Handbook* hoort op z'n minst thuis in elke zichzelf respecterende technische en wetenschappelijke bibliotheek, maar zou eigenlijk ook op een makkelijke bereikbare plaats moeten staan binnen elk bedrijf dat met lasers te maken heeft. Technici en beslis-sers op managementniveau, alsmede industriële producenten, vinden hierin ondersteuning bij het nemen van beslissingen.

Informatie LIA: www.laserinstitute.org

LIA Handbook of Lasermaterials Processing
Redactie: John Ready/Dave Farson, Laser Institute of America, Orlando (USA)
ISBN: 0-912035-15.3

Uitvoering: gebonden, 715 blz., 803 fig., 355 tab.

Prijs: 233 Euro (exl. BTW)

Uitgeverij: Springer Verlag, Heidelberg.

Unieke inrichting onderwijs Noorderpoortcollege

Fijnmechanische techniek en Research instrumentmaker

De opleiding Fijnmechanische techniek en Research instrumentmaker van het Noorderpoortcollege is ingrijpend veranderd.

Deze opleiding Fijnmechanische techniek is op 7 scholen in Nederland te volgen, namelijk Amsterdam, Rotterdam, Stadskanaal, Sittard, Eindhoven, Utrecht en Hengelo. De opleiding Research instrumentmaker is slechts op twee scholen te volgen: Leiden en Stadskanaal. Deze tekst gaat over de inrichting van beide opleidingen van het Noorderpoortcollege in Stadskanaal.

In de jaren 1998, 1999 en 2000 liepen het aantal aanmeldingen voor deze opleidingen in Stadskanaal terug. In de Brancheregio-combinatie (dit is een groep samengesteld

uit de school en bedrijven van deze branche in de provincies Groningen en Drenthe, voor de afdeling Fijnmechanische techniek) is dit probleem aangepakt. Duidelijk was dat de belangstelling van leerlingen voor de techniek terugliep. De vraag was: 'Wat kunnen we doen om het onderwijs aantrekkelijker te maken, en tegelijkertijd de belangstelling voor deze vakrichting bevorderen?' Bijna elke leerling heeft tegenwoordig een bijbaantje, en als het goed gaat in de techniek is het moeilijk voor de bedrijven om arbeidskrachten te vinden. Deze twee ingrediënten zijn terug te vinden in de vernieuwde aanpak van het onderwijs in deze afdeling. Samen met een poule van bedrijven is de inrichting van het onderwijs zodanig

gewijzigd dat de BPV, beroepspraktijkvorming ook wel stage genoemd, anders wordt aangeboden. Daarnaast is in samenwerking tussen school en poule van bedrijven gewerkt aan een BPV-werkboek waarin de leidraad voor de BPV is vastgelegd. Het resultaat is dat de aanmeldingen in 2001 hoger waren dan in 1998.

Kijk voor meer informatie op de website www.fijnmechanischetechniek.nl



BPV Fijnmechanische techniek

De oplossing die de poule van bedrijven en de school hebben gevonden is de inrichting van de BPV. We brengen de leerlingen vaker, en al in het eerste leerjaar van de opleiding, in contact met een van de bedrijven uit de poule. Dat wil zeggen dat leerlingen van onze school hun BPV alleen volgen bij bedrijven die samenwerken in de poule. Als tegenprestatie betalen de bedrijven aan onze school per BPV-dag een afgesproken vergoeding. Na elk semester wordt bij voldoende resultaat een vergoeding op de rekening van de leerling gestort. Zo kunnen de kosten van de opleiding en nog wat extra, worden terugverdiend. Daarnaast kunnen de bedrijven zelf met de leerlingen in contact treden voor een bijbaantje. De school heeft daarmee geen bemoeienis. Hoe een leerling zijn vrije tijd doorbrengt is grotendeels de zorg van de leerling, als het schoolwerk er maar niet onder lijdt.

Een deel van de vergoeding wordt gereser-

veerd. Dat deel wordt bij diplomering, als extra bonus, op de rekening van de leerling overgemaakt. Een stimulans om te slagen voor het diploma.

Wanneer BPV (stage)

- 1e leerjaar sem 2 , 1 dag per week *dinsdag*
- 2e leerjaar sem 3 en 4 , 1 dag per week *woensdag*
- 3e leerjaar sem 5 en 6 , 2 dagen per week *donderdag/vrijdag*
- 4e leerjaar sem 7 en 8 , 3 dagen per week *maandag/dinsdag/woensdag*

Vergoeding en kosten

- Voor elke BPV dag ontvangt de leerling € 20,-.
- Bij diplomering aan onze school ontvangt de leerling € 550,-.

- Reis- en verblijfskosten van stage zijn voor rekening van de leerling.
- Beschermende kleding, boeken, leer- en veiligheidsmiddelen zijn voor rekening van de leerling.

Voorwaarden en betaling

- Betaling na elk semester onder voorwaarde dat het semester met een voldoende is afgesloten (theorie en praktijk op school, en BPV). Daarbij komt dat de leerling geen openstaande rekeningen bij onze school mag hebben.
- Betaling geschiedt na diplomering op onze school.

Overzicht van de te ontvangen vergoeding

De vergoeding is niet exact. Elk schooljaar is weer anders ingedeeld. We gaan uit van een schooljaar van ongeveer 40 weken. Elk

>

schooljaar is verdeeld in 2 semesters. Schooljaar 1 in semester 1 en 2, schooljaar 2 in semester 3 en 4, enzovoorts. Elk semester telt dus ongeveer 20 weken. Het totaalbedrag is aan de lage kant gehouden.

- Sem 2
20 x € 20,- = ±€ 400,-
- Sem 3 en 4
40 x € 20,- = ±€ 800,-
- Sem 5 en 6
80 x € 20,- = ±€ 1.600,-
- Sem 7 en 8
120 x € 20,- = ±€ 2.400,-
- Diplomering ±€ 550,-
- **Totaal ±€ 5.500,-**

Naast deze vergoeding kan de leerling nog eens extra een bonus van het KDF tegevoet zien. Hierover later in dit artikel.

Verbeteringen

Door deze opzet komt de leerling gedurende de opleiding in contact met 7 verschillende bedrijven. Elke periode is tweemaal op school een overleg gepland met begeleiders van school en bedrijf. We betrekken bedrijven meer bij de BPV (stage) en hebben ook gezamenlijk een BPV (stage) werkboek samengesteld. Dit werkboek bevat afspraken en opdrachten met checklists en beoorlingscriteria. Wanneer de cyclus helemaal rond is, zijn er bij elk bedrijf vier van onze leerlingen ondergebracht, van elk leerjaar een. De begeleidingstijd van school en bedrijf kan hierdoor effectiever worden gebruikt. Daarbij komt dat er rekening wordt gehouden met het moment dat eerste- en tweedejaars leerlingen worden ondergebracht. Tegelijkertijd is er dan ook een vierdejaars leerling ondergebracht zodat ook de begeleiding in een klein bedrijf doorgang kan vinden. De vierdejaars leerling kan een hulp zijn bij de begeleiding. Dit is

ook een van de eindtermen die gerealiseerd moeten worden: 'kan hiërarchisch leiding geven en kan medewerkers motiveren en stimuleren'.

Door deze opzet komt de leerling eerder in contact met het bedrijfsleven en heeft een beter zicht op zijn toekomstige mogelijkheden. De opleiding blijft een BOL-opleiding. BOL staat voor Beroeps Opleidende Leerweg. Het maximale aandeel BPV van 40% wordt niet overschreden. Dit is een van de voorwaarden van een BOL-opleiding. Hierna volgt nog een overzicht van de BPV-indeling voor bedrijf en leerling. Hierin is duidelijk te zien dat eerste- en tweedejaars leerlingen (2^e, 3^e en 4^e semester) op dezelfde dag gepland zijn als vierdejaars leerlingen (7^e en 8^e semester).

De eerste ervaringen van leerlingen en bedrijven zijn positief. Met een aantal grote bedrijven voor de afdeling Werktuigbouwkunde van het Noorderpoortcollege zijn ook besprekingen op gang gekomen. Hier heeft men dezelfde

problemen en de bedrijven willen graag ook een regeling voor deze afdeling.

Het verschil tussen Werktuigbouwkunde en Fijnmechanische techniek is:

De afdeling Werktuigbouwkunde heeft voornamelijk het doel om het fysieke van de mens te verlengen (hijswerktuigen, landbouwwerktuigen, machines en apparaten) De afdeling Fijnmechanische techniek heeft voornamelijk het doel om de zintuigen van de mens te verlengen (thermometer, hygrometer, meetklok, uurwerk, optiek en dergelijke).

Als klap op de vuurpijl geeft het KDF (Klaas Dijkstra Fonds) elke leerling die wordt gediplomeerd voor de Fijnmechanische techniek in Stadskanaal nog eens € 275,- extra bovenop de al bestaande vergoeding. Voor de leerling die het beste examenwerkstuk maakt, stelt het fonds een prijs van € 500,- beschikbaar.

Martien de Haan

	BPV	maandag	dinsdag	woensdag	donderdag	vrijdag
Winterperiode sept. t/m jan.	Sem 1					
	Sem 3			xxxxxx		
	Sem 5				xxxxxx	xxxxxx
	Sem 7	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx		
	Aantal leerlingen	1	1	2	1	1
	Zomerperiode febr. t/m juli	Sem 2		xxxxxx		
Sem 4				xxxxxx		
Sem 6					xxxxxx	xxxxxxx
Sem 8		xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx		
Aantal leerlingen		1	2	2	1	1