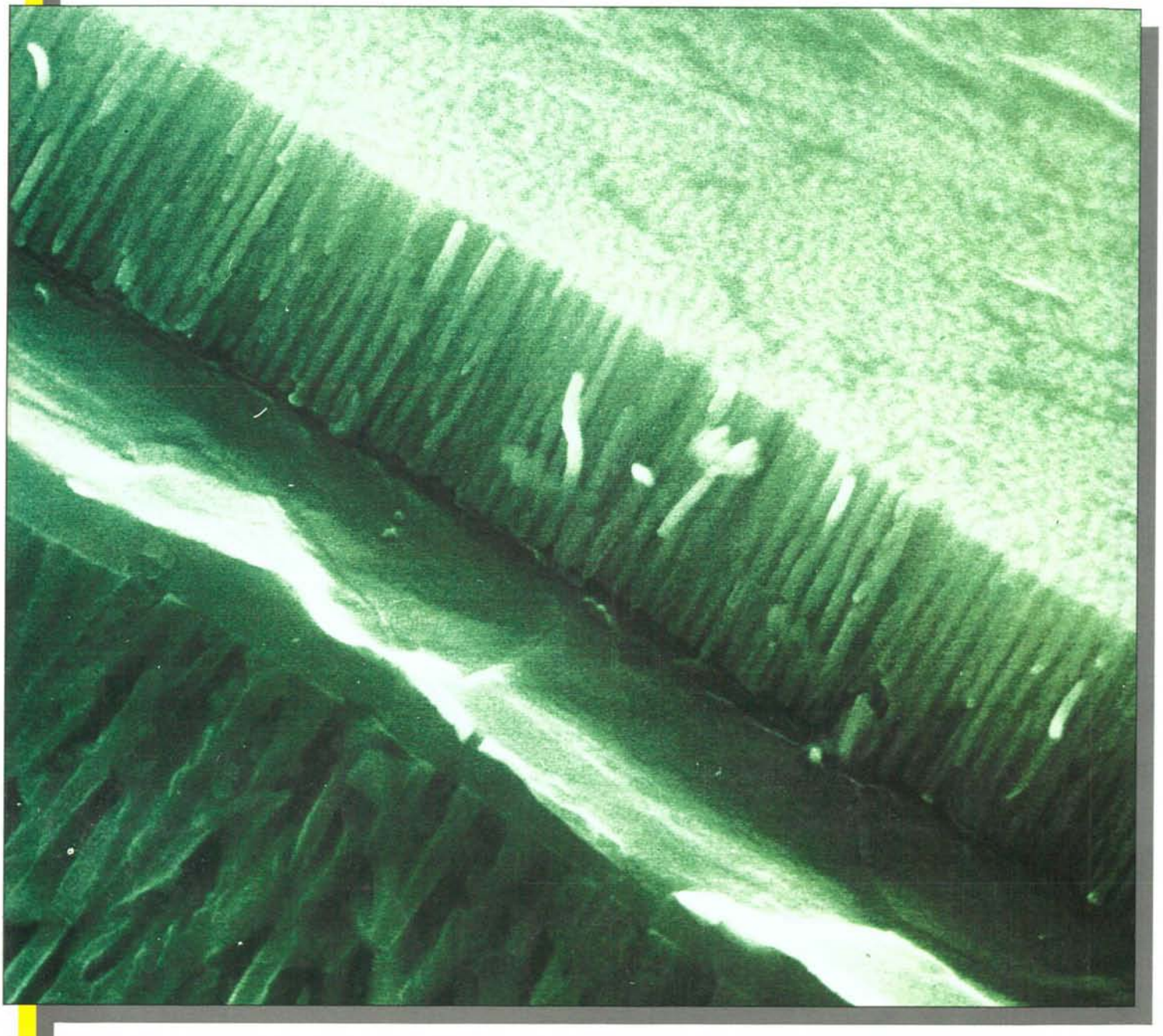
jaargang 34, nummer 4

Mikroniek

NVFT

VAKBLAD VOOR PRECISIE-TECHNOLOGIE



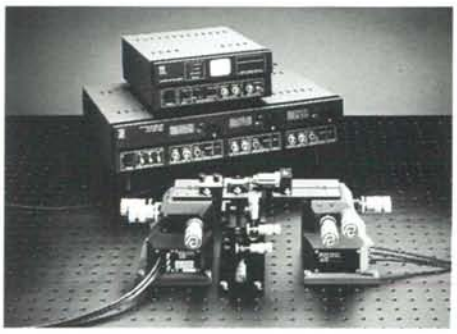
Longdistance microscoop – 3D-vormen OE-meten

Analytische elektronen microscopie

Twin-sensor

MELLES GRIOT

Optics – Lasers – Instruments



Fiber Couplers, -Launchers, -Positioners

Ons leveringspakket omvat een grote variëteit aan translatie- en rotatie systemen voor nauwkeurige positionering.

U kunt geheel vrijblijvend informatie bij ons opvragen, ons adres is:

Melles Griot B.V.
Postbus 22, 6900 AG Zevenaar
Telefoon: (+31) 8360 – 33041
Telefax: (+31) 8360 – 28187

MTS'er meet- en regeltechniek

20 jaar ervaring in instrumentmakerij

zoekt een nieuwe baan

reacties M. Thierry tel.: 070-3549350

hft **DEN HARTOG**
fijnmechanische techiniek b.v.

vervaardiging en reparatie van
fijnmechanische onderdelen
kunststofmatrijzen
snijstempels
buigstempels
prototypen
bewerken van
kunststofonderdelen

Nijverheidsweg 8
3481 MB Harmelen
Tel.: 03483 - 3504
Fax: 03483 - 4187

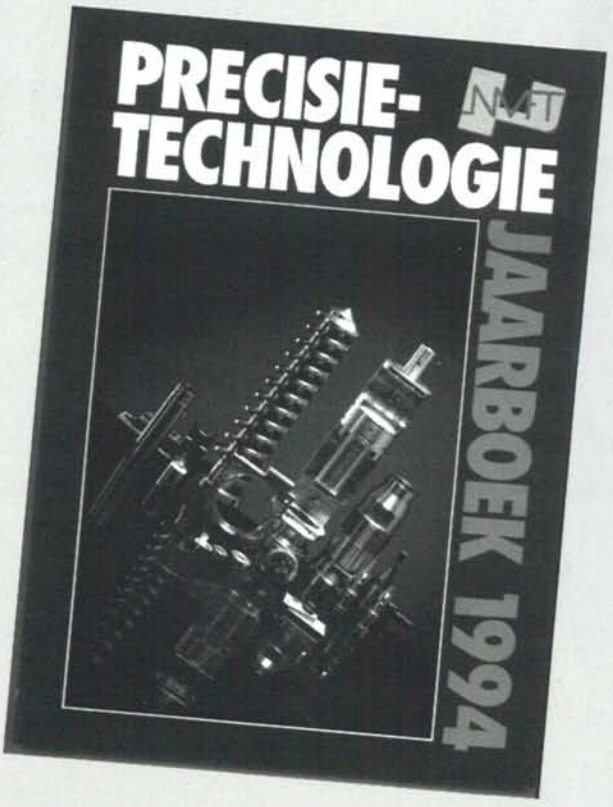
De voorbereiding van het

Precisietechnologie jaarboek 1995

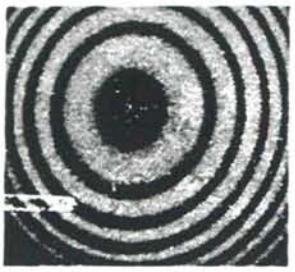
is gestart

Wilt u uw bedrijf ook profileren?

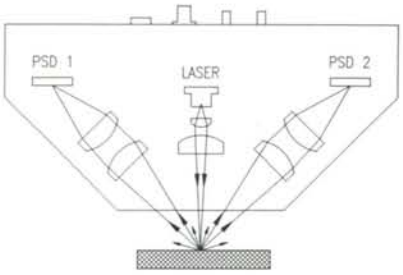
Neemt u dan kontakt op met
Buro Jet BV,
de heer N.J.H. van den Brink
Tel: **070 - 3990000**
Fax: 070 - 3902488



In dit nummer



Zie pagina 102



Zie pagina 106

Zie pagina 112

Zie pagina 119

97 Microscopen bij materiaalonderzoek
Editorial

98 Verenigingsnieuws/Actueel

102 Opto-elektronisch meten van driedimensionale vormen
Alfons M.F. Wegdam, R. Visman, O. Podzimek

106 De TWIN-sensor van TPA: een snelle èn nauwkeurige hoogtemeter
C.A.A.M. Maas

112 Analytische elektronenmicroscopie
Rico Keim

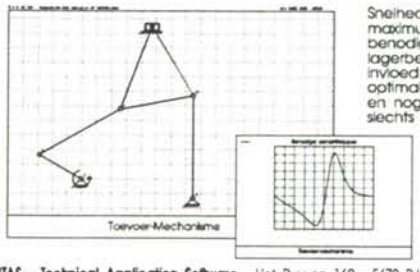
119 Een longdistance microscoop van Nederlands fabrikaat
R. ter Horst, B. Postema, H. Rutten

126 Produktinfo

Bij de foto van de voorpagina:
Kolomstructuur van een breukvlak van een dunne magnetische laag kobalt-chroom.
De foto is gemaakt met een hoge-resulutie scanning electron microscope (SEM) bij het Centrum voor Materialen-Onderzoek (CMO) aan de Universiteit Twente.

MECHANISMEN ANALYSE OP DE PC

SAM 2.2 Bewegings- en krachtenanalyse van willekeurige stangen-, riemen en planetaire mechanismen



Snelheden, versnellingen, maximum motorkoppel, benodigd aandrijfvermogen, lagerbelastingen, invloed compensatieveren, optimalisatie van de baan en nog veel meer in slechts enkele minuten !!

v.a. hfl. 599,-

Onderwijsinst. : hfl. 250,-
Studenten : hfl. 75,-
Demo : hfl. 10,-

Testrapport in "Mikroniek 93/2"

ARTAS - Technical Application Software Het Puyven 162 - 5672 RJ Nuenen - tel/fax 040-837552

Met adverteren
in Mikroniek
bereikt u de
Fijnmechanische
bedrijven en
produktontwikkelaars

main supplier

GROOT IN HET KLEINE

Onze specialiteit is micro-assemblage van functionele componenten met buitenafmetingen tot maximaal 40x42x50 mm. Liefst met electronica/optica geïntegreerd.

Onze fijnmechanische kennis van serieproductie en assemblage is gebaseerd op onze intensieve contacten met de Zwitserse fijnmechanische industrie. Daardoor zijn wij tevens in staat u bij de engineering en product-optimalisatie ter zijde te staan.

micro montage
Postbus 3108 - NL 3760 DC SOEST - Holland

PRECISIE OPTISCHE COMPONENTEN

Lenzen in standaard waarden of geheel volgens Uw specificatie.
Onze slijperij kan t/m testglas-controle, optische kwaliteits onderdelen leveren.

- Plan-Convex, Bi-Convex, Plan-Concaaf, Bi-Concaaf, Achromaten.
- Miniatuur Lenzen, Ronde Lenzen, Cylinder Lenzen, alles op uw maat of Standaarduitvoering.
- Optische Spiegels, Deel-Spiegels, Achtervlak Spiegels.
- Prisma's als Rechthoek, Retro, 60°, Penta en Wiggen.
- Testglazen in Vlak- Hol- en Bol, Plan-Glazen, Optische Vensters van diverse glasmaterialen, Kwartsglas en Kwartskristal.
- Coaten met metalen en Fluoriden op uw Substraten en Spiegels.
- Precisie glasbewerking in Standaard Glas, Optisch Glas, Kwartsglas en Kwartskristal.

STABILIX

STABILIX B.V.
Burg. Hovylaan 84
2552 AZ DEN HAAG
tel. 070 - 3970061 fax 070 - 3979321

Mikroniek

Orgaan van de

NVFT

Nederlandse Vereniging voor precisie-technologie

Editorial

Microscopen bij materiaalonderzoek

Materialen vormen al vanaf onze vroegste geschiedenis een van de belangrijkste technische vindingen van de menselijke samenleving. Onze oudste geschiedenis is niet voor niets ingedeeld in perioden, zoals het stenen, bronzen en ijzeren tijdperk, genoemd naar die materialen waarvan de belangrijkste hulpmiddelen vervaardigd waren.

Niet alleen het scala aan materialen is in de loop van de tijd aanzienlijk uitgebreid, ook het belang van materialen in onze samenleving is alleen maar toegenomen. Dit belang is echter niet altijd gemakkelijk herkenbaar door de geweldige omvang en complexiteit van de huidige technologie.

Gemakkelijk herkenbaar zijn de constructiematerialen, zoals metalen, polymeren, keramieken en composieten, waarvan de mechanische eigenschappen essentieel zijn. Deze materialen vormen de basis van tal van industriële produkten, van simpele gebruiksvoorwerpen tot zeer complexe constructies, zoals ruimtevaartuigen.

Moeilijk herkenbaar zijn de materialen die onmisbaar zijn bij industriële activiteiten die zich richten op energieproduktie en -transport of op de geavanceerde elektronica en telecommunicatie. Hierbij gaat het voornamelijk om die fysische eigenschappen van deze materialen, zoals elektronische, magnetische, optische of supergeleidende eigenschappen, die voor de relevante toepassing van belang zijn.

Het betreft materialen, zoals halfgeleiders, speciale organische materialen (polymeren), metalen of keramieken, in de vorm van dunne lagen, die met speciale depositieprocessen, zoals low pressure chemical vapor deposition (LPCVD), molecular beam epitaxy (MBE), laserablatie, sputteren, opdampen etc., worden vervaardigd.

Bij dit soort depositieprocessen is het essentieel dat de atomaire samenstelling en structuur tijdens het depositieproces gecontroleerd kunnen worden, omdat deze bepalend zijn voor de gewenste fysische eigenschappen van deze dunne lagen. De hiervoor noodzakelijke karakteriseringstechnieken zijn in hoofdzaak ontwikkeld in het kader van dertig jaar oppervlakteonderzoek van materialen, zoals optische- en elektronendiffractietechnieken, elektronenemissiespectroscopie en meer recent de scanning tunneling microscopie en -spectroscopie.

Met de huidige hulpmiddelen zijn materiaalkundigen in staat allerlei nieuwe materialen te maken, opgebouwd uit atomaire lagen, die langs traditionele chemische weg niet te bereiden zijn.

Voor vele toepassingen, zoals bijvoorbeeld een nieuwe microprocessor of een micromechanisch pompje, is niet alleen het vervaardigen van nieuwe materialen noodzakelijk. Even belangrijk is het bewerken van deze materialen door bijvoorbeeld etsen.

Prof. dr. A. van Silfhout
Directeur Centrum voor Materialenonderzoek Universiteit Twente.

Uitgave:
NVFT

Redactie:
Dr. ing. D. Blank
Ir. S. van de Graaf (hoofd redactie)
H.M.C. Heubers
Ir. P.C.J.N. Rosielle
H.G.J. Rutten
Ir. J.J. Veerman
Dr. ir. J. Verkerk
G.J. Verschragen

Redactiesecretariaat:
Mikroniek
Postbus 80.004, 3508 TA Utrecht
Telefoon: 030-531 710 / 531 639

Redactie-adviesraad:
Prof. L.H.J.F. Beckman
Prof.dr.ir. H.F. van Beek
Prof.dr.ir. J. Bleeker
Ing. H. Bosch
Ir. P. Brinkgreve
Ing. M.F. Dierselhuis
Prof.ir. C. Heuvelman
Ir. D. de Hoop
A. Meijering
Dr.ir. J.A. Rietdijk
Prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens
Prof.dr.ir. Ch. Snijders
Ir. G. Vaessen
Prof.dr.ir. A.J.A. Vandenput
Ir. D. van't Veen

Advertenties:
Buro Jet bv
Postbus 1890, 2280 RW Rijswijk
Telefoon: 070-3990000; Fax:070-3902488

Abonnementen:
Mikroniek
J. Verkerk
Postbus 80.004, 3508 TA Utrecht
Telefoon: 030-531 710 / 531 639
Fax: 030-522 267
Abonnementskosten Mikroniek:
Nederland ƒ100,-- per jaar
Buitenland ƒ125,-- per jaar
Alle prijzen excl. BTW

Secretariaat NVFT
Postbus 6367, 5600 HJ Eindhoven
Telefoon: 040-473 659; Fax: 040-460 645

Vormgeving:
Jurriaan Bol Design, Son

Lay-out en realisatie:
Twin Design B.V.,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

ONDER DE LOEP GENOMEN

Miniaturisatie en microsysteemtechnologie

Maandag 19 en dinsdag 20 september 1994
Koningshof in Veldhoven, telefoon:040-537475

Programma 19 september

9.30 Ontvangst, inschrijving, koffie
10.30 Opening door ir.W.A. Koumans, voorzitter STT, en presentatie STT-publikatie "Microsystem technology: exploring opportunities" aan drs.M.C. van der Harst (DG voor Industrie & Diensten, Den Haag) en mevrouw C. Claus (DG Vlaams Instituut voor de bevordering van het Wetenschappelijk-Technologisch Onderzoek in de industrie, IWT)
10.40 Toekomstmogelijkheden van microsysteem-technologie
prof.dr.ir.W.M.C. Sansen, KU Leuven
11.05 Miniaturisatie: wat gebeurt er in de industrie?
ir.F.J.M. Bastiaanssen, Philips
11.30 Van microwereld tot macrotoekomst
drs.M.C. van der Harst, Ministerie van Economische Zaken
11.55 Microsysteemtechnologie, ook belangrijk voor een kleine regio
M. Lambrechts, IWT
12.20 Lunch en informatiemarkt

Medische systemen, instrumentatie en industriële systemen
14.00 Parallelsessies A en B
15.45 Pauze

Produktietechnologie
16.15 Progress in Micromachining
prof.dr.W. Ehrfeld, Institut für Mikrotechnik GmbH, Mainz
16.45 Miniaturisatie en intergratie in kunststoffen
dr.ir.J.F. Dijksman, Philips
17.05 Assemblage en packaging
ing.M. Dierselhuis, Micro*Montage

Informatiemarkt en symposiumdiner
17.30 Informatiemarkt/aperitief
18.30 Symposiumdiner en speech
drs.Chr.Titulaer

Parallelsessie A - Medische Systemen
14.00 Hoe kleiner, hoe beter:
MST in de geneeskunde
prof.dr.R.M. Heethaar, Academisch Ziekenhuis VU
14.20 Miniaturisatie in de echocardiografie
ir.P.A.F.M. Goemans, TU Eindhoven
14.40 Hoe kleiner, hoe fijner? Marktgericht naar medische microsystemen
ir.drs.M.W.C.M. Nieuwersteeg, Dräger Medical Electronics
15.00 Medische Technologie en MST: hoe verder
ir.R.M.E.M. van Heijster, TNO-FEL
15.20 Discussie

Parallelsessie B - Instrumentatie en industriële systemen
14.00 Redenen voor toepassing van MST
dr.L. Hermans, IMEC
14.20 Microradiatoren in de ruimtevaart
P. Verhaert, Verhaert Design & Development
14.40 Overzicht van toepassingen van microsyteem-technologie in instrumentatie
ir.O. Ongkiehong, Hoechst Holland
15.00 Instrumentatie en MST: hoe verder?
ir.H. Leeuwis, Twente Technology Transfer
15.20 Discussie

Programma 20 september

Agrarische toepassingen en consumentenprodukten
8.30 Parallelsessies C en D
10.15 Pauze

Demonstraties, trends en componenten
10.45 Parallelsessies E en F
12.15 Lunch

De infrastructuur, activiteiten buiten Europa
13.45 Infrastructuur van MST in Nederland
prof.dr.J.H.J. Fluitman, MESA-instituut
14.10 Activities in the U.S.A.
prof.dr.M. Madou, Principal of Microfabrication Applications NASA associate, Palo Alto
14.30 Activities in Japan
T.Hirano, Micro Machine Center, Tokio
14.50 Pauze

De infrastructuur, Europese activiteiten
15.20 Diffusion of MST in Germany,
dr.U. Brasche, VDI/VDE, Berlijn
15.40 Viewpoint of the European Union
J. Tsales, Commission of the European Communities, Directoraat-Generaal III-F-2
16.00 Conclusies voor de Benelux
dr.S. van Houten, vice-voorzitter STT
16.30 Sluiting

Parallelsessie C - Landbouw
8.30 Groeien naar micro
dr.ir.F.W.H. Kampers, Instituut voor Mlieu en Agritechniek
8.50 Een intelligente, injecteerbare transponder
prof.dr.ir.R. Puers, KU Leuven
9.10 Een kunstmatige hommel
dr.ir.W. Olthuis, MESA-instituut
9.30 Landbouw en MST: hoe verder?
dr.H. Hofstra, TNO Voeding
9.50 Discussie

Parallelsessie D - Consumentenprodukten
8.30 Introductie van MST in consumentenprodukten
ing.F. Pool, Philips
8.50 Compacte optische pick-ups
ir.G.J.J. Vos, Philips
9.10 Persoonlijke waarschuwingssystemen
ir.dipl.-ing.P.V. Pistecky, TU Delft
9.30 Consumentenprodukten en MST: hoe verder?
ir.H.J. Bosch, Centrum voor Micro-electronica
9.50 Discussie

Parallelsessie E - Informatiemarkt
10.45 Demonstraties

Parallelsessie F - Trends en componenten
10.45 Miniaturisatie van hoogwaardige motor-lagersytemen
prof.dr.ir.E.M.H. Kamerbeek, Philips
11.05 Trends in precisietechniek
prof.dr.ir.H.F. van Beek, TU Delft
11.25 Micro liquid handling systems
dr.M. Elwenspoek, MESA-instituut
11.45 Trends in batterijtechnieken
dr.R.E.F. Einerhand, Philips

Kosten: Prijs excl. overnachten *f* 1.050.00, leden HE,KIvI,NVFT, Het Instrument *f* 850.00, studenten *f* 250.00, inclusief de STT-publicatie nr.56, Microsystem technology: exploring opportunities, lunch (2x), diner, koffie en thee.

Aanmelding: Congresbureau KIvI, Postbus 30424, 2500 GK Den Haag, Telefoon (070) 3919890

Verenigingsnieuws/Actueel

Onder de loep genomen

Symposium Miniaturisatie en microsysteemtechnologie, 19 en 20 september.
Dit symposium is bestemd voor technische beslissers in het bedrijfsleven – met name in het midden- en kleinbedrijf – die actief zijn in het veld van consumentenprodukten, de agrarische sector, de medische wereld en instrumentatie & industriële systemen. Aan de orde komen actuele ontwikkelingen op het gebied van miniaturisatie en microsysteemtechnologie (MST)
Het belangrijkste doel van het symposium is informatie te verstrekken die nodig is om te kunnen bepalen waar deze ontwikkelingen nieuwe technische mogelijkheden en nieuwe kansen bieden.
Zie ook de uitgebreide aankondiging in Actueel, Mikroniek (1994) 3 onder de titel MUST.
Voor leden van Holland Elektronica (HE), KIvI, NVFT of "Het Instrument" krijgen korting op de deelnameprijs.

Aanmelding:
Congresbureau KIvI
Postbus 30424
2500 GK Den Haag
Tel.: 070-3919890

Dynamisch testen

een toegevoegde waarde voor uw produkt
Themamiddag op 29 september 1994 bij Fokker Space & Systems te Schiphol-Oost.

Veel produkten worden tijdens transport en gebruik belast door schokken en trillingen, waardoor ze vroegtijdig kunnen falen. Door een prototype dynamisch te testen is men in staat eventuele constructie- of ontwerpfouten reeds in een vroeg stadium te onderkennen. Van een aldus verbetert produkt kan men de klant een zeer hoge betrouwbaarheid garanderen.
Van oorsprong worden dynamische testen voor produkten in de lucht- en ruimtevaart toegepast, omdat betrouwbaarheid daar als een van de voornaamste kwaliteitscriteria geldt. Tegenwoordig worden regelmatig allerlei andere industriële- en consumentenprodukten aan deze tests onderworpen. Een belangrijk motief voor het dynamisch testen is belangrijk minder defecte produkten, met als resultaat: kostenbesparing en een grotere tevredenheid van de klant.

Het dynamisch testen wordt uitgevoerd op een "shaker", waarmee de produkten op een gecontroleerde manier worden blootgesteld aan schokken en trillingen. Tijdens de tests worden de gedragingen van het produkt vastgelegd via een 30-kanaals data-acquisitiesysteem. Daarnaast worden ook trillingsvormen onderzocht met modaalanalyse.
Tijdens de presentatie wordt ingegaan op de mogelijkheden op dynamisch testgebied, de toepassing in de praktijk aan de hand van sprekende voorbeelden en toekomstige ontwikkelingen, gevolgd door een demonstratie van de dynamische testfaciliteit van Fokker Space & Systems op Schiphol-Oost.

De presentatie wordt verzorgd door Fokker Space & Systems in samenwerking met de Regionale werkgroep Utrecht.

Aanmelding:
Deelname is gratis.
Aanmelding voor 15 september a.s. bij het secretariaat van de NVFT, tel.: 040-473659.

Cursussen PTO-Utrecht

Vanaf half september 1994 start een aantal één- en tweejarige cursussen, soms van een kortere duur of bestaand uit modulen, van het Post Tertiair Onderwijs Utrecht.

Het cursusprogramma techniek bestaat uit twee delen, die ieder zijn beschreven in een brochure, te betrekken bij het onderstaande adres.
Techniek deel 1 bevat alle details van de volgende cursussen:
- Europees lasingenieur;
- Metaalkunde;
- Gieterij-ingenieur;
- Kunststoftechnologie;
- Materiaalkeuze;
- Corrosie-specialist;
- Corrosie en corrosiebestrijding;
- Lastechnisch construeren
- Integrale plaat technologie HBO I;
- Schakelcursus naar post-HBO-opleidingen;
- Gebouwbeheerssystemen;
- Vermogenselektronica;
- Industriële automatisering;
- Kwaliteit en management.

Techniek deel 2 bevat de details van:
- Mechatronica/FMT;
- Masters of Science Engineering Product Design;
- Onderhoudstechnologie;
- Onderhoud en management;
- Inspectie-ingenieur;
- NDO-ingenieur;
- Vakspecialist NDO;
- Wervelstroom niveau 2;
- Akoestische emissie.

Voor nadere informatie en bestellen van de brochures:
PTO-Utrecht
Antwoordnummer 9666
3500 ZG Utrecht
Telefoon: 030-660 254
Fax: 030-628 418

Microbiologische corrosie

Cursus; avonden van 12, 15, 29 september en 6, 13 oktober 1994, telkens een module van 2,5 uur; Technologie Centrum Corrosie (TCC), Jan van Eijklaan 2 te Bilthoven; kosten F 1250.=, inschrijving per module is mogelijk, kosten per module F 350,=.
Corrosie veroorzaakt binnen de Nederlandse industrie jaarlijks voor ongeveer

18 miljard gulden schade. Een deel hiervan is het gevolg van biologische corrosie. Dit kan niet geheel worden voorkomen maar door gebruik van de juiste kennis op corrosietechnisch gebied is een groot deel hiervan te besparen.
Biologische corrosie is een fenomeen dat vaak niet als zodanig wordt herkend en kan, vooral in industriële watersystemen, verward worden met andere corrosievormen. Hierdoor is er geen sprake van een efficiënte corrosiebestrijding en kunnen de problemen alleen maar groter worden.
Cursusinhoud:
• Module 1: micro-organismen
Overzicht van de meest voorkomende micro-organismen, karakteristieken, generatiecurven, ecologie en factoren die invloed hebben op de groei.
• Module 2: analyse
Een theoretische uiteenzetting en behandeling in de praktijk van de principes, voordelen en nadelen van alle beschikbare biologische analysemethoden.
• Module 3: identificatie
Micro-fouling: gericht op herkenning en identificatie van bacteriologische en andere microbiologische vervuiling. Macrofouling: gericht op herkenning en identificatie van organismen in zoutwater en zoetwater.
• Module 4: corrosie
Microbiologische corrosieprocessen, herkenning en identificatie van Microbiologically Influenced/Induced Corrosion (MIC).
• Module 5: controle en beheersen
Controle, waarbij oxyderende en niet oxyderende biocides worden behandeld. Het gebruik van biodispersanten, opvolgingssystemen en -methoden.

Voor nadere informatie:
TCC
Dhr. Boelaars
Telefoon:030-287 773

Cursussen en themadagen Microcentrum Nederland

• *Programma 1994-1995*
De redactie ontving het overzicht van cursussen, workshops en opleidingen van het seizoen 1994-1995 van het Microcentrum. Deze voortreffelijk uitgevoerde brochure is te verkrijgen bij het onderstaande adres.

• *Cursussen*
Van de bovengenoemde cursussen gaat in de periode van 12 – einde september een aantal van start. Dit zijn:
- Draadvonkerosie;
- Vonkerosie;
- Basiscursus stanstechniek;
- Spuitgieten 1;
- Spuitgieten 2;
- Matrijzen voor kunststoffen A.

• *Themadagen*
- 20 september: Digitaliseren vrije vormvlakken;
- 22 september: Energietechniek & management;
- 28 september: Tool mangement;
- 29 september: Industrieel verpakken & handling;
- 4 oktober: EMC;
- 6 oktober: Poedermetallurgie;
- 11 oktober: Kalibratie en onderhoud van produktiemiddelen;
- 12 oktober: Magazijnbeheer, inrichting/automatisering;
- 20 oktober: Geavanceerde composieten;
- 25 oktober:Afvoeren van chemisch afval;
- 27 oktober:Medische technologie;
- 1 november : Spuitgieten;
- 2 november : Lakken;
- 8 november : Boren;
- 10 november : Miniaturisatie elektronica;
- 15 november : Kalibratieworkshop;
- 17 november : Kennismaken met grote uitbesteders;
- 22 november : Low Cost Matrijzen;
- 24 november : Fijnplaatwerk;
- 29 november : Elektrische aandrijftechniek;
- 1 december : CMM tastende en coördinerende meetmachines;
- 6 december : Parameters bewerkingsmachines;
- 7 december : Pompen en kleppen (procesindustrie).

Steeds te Eindhoven; kosten F 495,=

Voor nadere informatie en bestellen van de brochure:
Microcentrum Nederland
Kruisstraat 74
5612 CJ Eindhoven
Telefoon: 040-432 503
Fax: 040-450 169

Communicatie voor technici

Schriftelijke cursus van PBNA; duur vier maanden, in eigen tijd en tempo wordt gestudeerd; kosten F 131,= per maand exclusief boeken.
Doel:
Technische vaardigheden alleen zijn niet meer voldoende. De werknemer moet zijn kennis ook op een goede manier kunnen overdragen. Het gaat dan vooral om schrijfvaardigheid, gespreksvaardigheid en leesvaardigheid.
Bestemd voor:
Deze opleiding is bedoeld voor technici op MBO-niveau, die op zakelijk gebied regelmatig schriftelijk en mondeling moeten communiceren.

Voor nadere informatie:
PBNA
Mevr. M. Jans
Telefoon: 085-575 663

WIB en Het Instrument gaan samenwerken

"International Instrument Users Association" WIB, een internationale vereniging van gebruikers uit de procesindustrie op het gebied instrumentatie en systemen, en de Vereniging Het Instrument hebben besloten te gaan samenwerken op een aantal terreinen van gemeenschappelijk belang.
Als eerste stap zullen vertegenwoordigers van de branche Industriële automatisering van Het Instrument participeren in een op het gebied van kwaliteit nieuw te vormen stuurgroep "Quality Assurance", QA. Deze groep wordt verder samengesteld uit leden van de huidige WIB-werkgroep op het gebied van QA.
Doel van de QA-stuurgroep zal zijn om, binnen het raamwerk van ISO 9000, te bevorderen dat produkten, bestemd voor de industriële automatisering, qua inherente kwaliteit voldoen aan de gestelde eisen.
WIB en Het Instrument gaan ook bekijken hoe men tot een gestructureerde uitwisseling kan komen van produkt- en toepassingsinformatie tussen fabrikant en gebruiker. Hiervoor zijn in eerste instantie twee onderwerpen geselecteerd voor nadere uitwerking, te weten de veldbus en regelkleppen.

Voor nadere informatie:
G.W.A. Danen (WIB)
Telefoon: 070-3560 092
Drs. J.C. Groeneveld (Het Instrument)
Telefoon: 02155-18 204

Voorlichtingsmateriaal preventie werkstress

Om leidinggevenden in bedrijven en instellingen te ondersteunen in het herkennen en voorkomen van werkstress heeft het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid voorlichtingsmateriaal ontwikkeld. Het gaat om het voorlichtingsblad "Werkdruk, werkstressrisico's en verzuimpreventie".
Dit voorlichtingsblad is vooral bedoeld voor het management van bedrijven en instellingen. Beschreven wordt wat de oorzaken zijn van werkstress, hoe werkstressrisico's kunnen worden opgespoord en hoe werkstress kan worden voorkomen. Ook wordt ingegaan op de rol van de arbodiensten en de wettelijke verplichtingen op het terrein van preventie van werkstress en verzuimbeleid.
Het blad is te bestellen bij (kosten f 24,50) :
Sdu Servicecentrum Uitgeverijen
Postbus 20014
2500 EA Den Haag
Telefoon: 070-378 9880
Fax: 070-378 9783

Wer liefert was?

Grensoverschrijdend contacten leggen met nieuwe leveranciers en afnemers wordt vanaf nu een stuk makkelijker. Uitgeverij Wer liefert was? bv introduceert CD-Book informatie over 29.000 produkten en meer dan 186.000 bedrijven in de Benelux, Duitsland, Oostenrijk en Zwitserland op een CD.
Bladeren door 11.948 pagina's gedrukte informatie wordt vervangen door simpele toetsbewegingen op de PC. Een heldere zoekstructuur, met een index in zes talen, brengt de gewenste informatie in een oogwenk op het scherm. Geselecteerde informatie kan direct worden uitgedraaid. Naast CD-Book brengt Wer liefert was? de nog meer geavanceerde variant CD-Marketing, die zich laat behandelen als een data-base, en de klassieke boekuitgave in 8 delen. De totale oplage is 80.000. Het aantal Nederlandse bedrijfsvermeldingen bedraagt circa 36.000. Bedrijven die in de Nederlandse editie worden vermeld, worden automatisch meegenomen in alle buitenlandse edities.
De "Wer liefert was?" uitgeefgroep, gevestigd in Hamburg, maakt deel uit van de Amerikaanse Multinational Ameritech, specialist in communicatie- en informatietechnologie.

Voor nadere informatie:
Wer liefert was? bv
Amsterdam
Telefoon: 020-696 0706

Spuitgieten met metaalpoeder

Voor de fabricage van kleine complexe metalen onderdelen bestaat al weer enige tijd een toch nog steeds vrij onbekend proces: Metal Injection Molding (MIM). Bij dit proces wordt gebruik gemaakt van een mengsel van zeer fijn metaalpoeder en een thermoplastische kunststof. Dit mengsel wordt in een spuitgietmachine tot produkt verwerkt. De metaalpoeders vormen het uitgangsmateriaal. De korrelgrootte varieert tussen 5 µm en 20 µm. Een aanzienlijk verschil met de poeders die in de conventionele poedermetallurgie (persen-sinteren) worden toegepast en een korrelgrootte van rond 200 µm kennen. Om het metaalpoeder te kunnen verwerken in een spuitgietmachine wordt het gemengd met een thermoplastische kunststof: de binder. Na het spuitgieten heeft de binder zijn functie vervuld en wordt verwijderd. Dit verwijderen kan door middel van onderdompelen in een vloeistof die in de binder oplost of door verhitting in de oven. Niet alle componenten van het bindermateriaal worden verwijderd, om te voorkomen dat het produkt uit elkaar valt. Tijdens de laatste stap van het proces wordt het produkt gesinterd: de metaalpoeders verbinden zich met elkaar en het resterende bindermateriaal verdampt of verbrandt.
Met het MIM-proces, ook wel Powder Injection Molding (PIM) genaamd, kunnen legeringen worden verwerkt die niet of nauwelijks kunnen worden gegoten door te ver uiteenlopende smelttemperaturen. Het materiaalrendement is hoog en door de grote voorspelbaarheid van de krimp is nabewerking nauwelijks noodzakelijk.
Hoewel het proces enkele belangrijke voordelen biedt, is het niet geschikt voor alle toepassingen. Een belangrijk beperkende factor zijn de hoge matrijskosten waardoor het proces alleen bruikbaar is bij vrij grote series.
Inmiddels wordt MIM onder andere toegepast in de micro-elektronica, voor de vervaardiging van medische instrumenten en onderdelen van vuurwapens. Overal waar kleine nauwkeurige onderdelen nodig zijn, kan dit proces grote waarde hebben.
In Nederland zijn de laatste twee jaren drie bedrijven met dit proces gestart. Daarvoor werd het MIM-proces bij geen enkele onderneming toegepast.

Elektronica helpdesk ook voor sensoren

De elektronica Helpdesk van het Centrum voor Micro-Elektronica biedt naast uitgebreide gegevens over elektronicacomponenten en leveranciers nu ook uitvoerige informatie over sensoren, sensorleveranciers en sensorcomponenten in Nederland.
Dit sensorregister is tot stand gekomen in nauwe samenwerking met het platform Sensortechnologie en het CME. Het bevat algemene sensorinformatie, materiekennis, boeken, produktbeschrijvingen en adressen van leveranciers. Hiermee kan voor bijna elk meetprobleem een advies worden uitgebracht over een bepaald meetpricipe, sensorkeuze en leverancier(s) van kennis of produkten.
Het sensorregister van Elektronica Helpdesk kan men gratis bellen of faxen voor het vinden van sensor, sensorelement of sensorsysteem met adresgegevens van de bijbehorende sensorleverancier(s).

Voor nadere informatie:
Centrum voor Micro-Elektronica,
Veenendaal.
Ing. L. Verhelst (Elektronica Helpdesk)
A.W. van Schadewijk (Sensorregister)
Telefoon: 08385-80 202
Fax: 08385-80 234

Opto-elektronisch meten van driedimensionale vormen

Alfons M.F. Wegdam, R. Visman, O. Podzimek

De verscherping van eisen aan industriële produkten bij toenemende concurrentie en scherper wordende wetgeving met betrekking tot produktaansprakelijkheid, dwingen tot doelmatige produktie en kwaliteitsbeheersing van het gehele fabricageproces. Betrouwbaarheid, nauwkeurigheid, snelheid, automatiseerbaarheid en vastleggen van gegevens worden daardoor voor de produktie en kwaliteitsbewaking onontbeerlijke kenmerken. In het licht van deze trend is het niet verwonderlijk dat snelle, contactloze en robuuste – dat wil zeggen voor storingsbronnen ongevoelige – methoden voor het meten van driedimensionale vormen in de industrie steeds belangrijker worden.

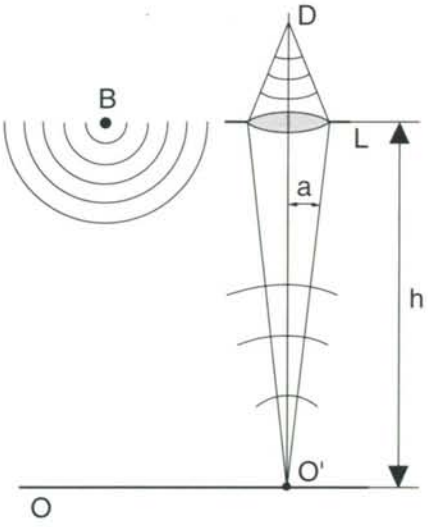
Inleiding

Enkele van de vele toepassingsgebieden van optisch driedimensionaal vormmeten zijn: controle van de vormnauwkeurigheid van onderdelen, aanwezigheidscontrole van samengestelde delen, bepalen van plaats en oriëntatie van delen ten behoeve van flexibele montage, alsook het genereren van banen en het detecteren van botsingen in de robotica.

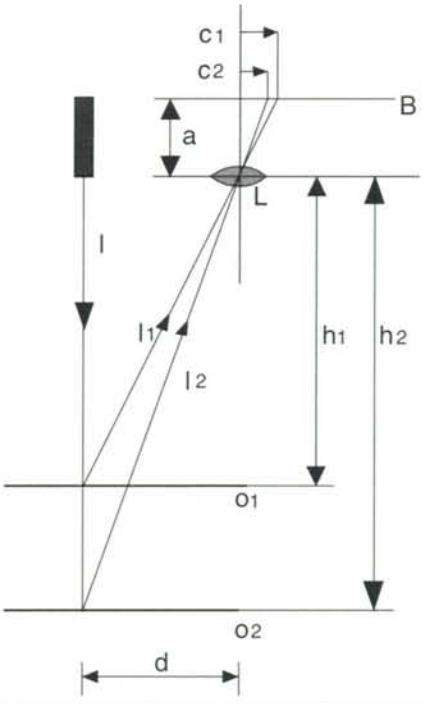
Ook bij onderzoek en ontwikkeling speelt vormmeting een belangrijke rol. Bijvoorbeeld: snelle geometriemeting van met de hand gemaakte modellen voor het verkrijgen van CAD-gegevens of de vervormingsanalyse van onderdelen onder verschillende belastingen.

De aan de driedimensionale meettechniek te stellen eisen kunnen in belangrijke mate vervuld worden door optische methoden welke de ruimtelijke informatie uit beelden verkrijgen. Beeldgegevens zijn contactloos en snel verkrijgbaar. Het verwerken en berekenen van de gewenste geometrie-kentallen kan eventueel op een later tijdstip geschieden.

In het hierna volgende wordt ingegaan op de basisprincipes waarop de optische meetmethoden voor het meten van driedimensionale vormen zijn gebaseerd. Tevens zal worden aangegeven welke nauwkeurigheden in praktijksituaties bereikt kunnen worden.



Figuur 1. Het meten van afstand door middel van intensiteitsbepaling.



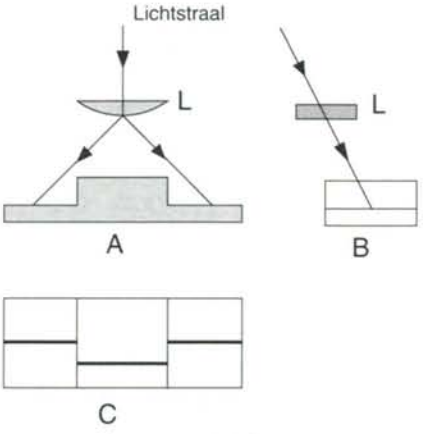
Figuur 2. Basisschema voor hoekmeting (triangulatie).

De basisprincipes

Er zijn vele meetmethoden bekend waarmee men optisch de driedimensionale vorm van een object kan bepalen. Analyse leert dat deze methoden gebaseerd zijn op een beperkt aantal natuurkundige basisprincipes. De belangrijkste zijn: intensiteits-, hoek-, focus-, tijd- en fasemeting. In de volgende paragrafen worden deze basisprincipes en de hierbij behorende meetmethoden nader toegelicht.

Intensiteitsmeting

Deze methode werkt als volgt, zie figuur 1. Een bron B zendt een lichtgolf uit, die object O treft. Een punt O' van dit object wordt afgebeeld op de puntvormige detector D. Punt O' zendt op zijn beurt een bolvormig golffront uit. Een deel van dit golffront wordt door de intreepupil van lens L doorgelaten en afgebeeld op detector D. De verlichting van deze detector is afhankelijk van de volgende parameters: de lichtsterkte van puntbron B en de numerieke apertuur A = n . sin(a) van het opti-



Figuur 3. Hoekmeting met behulp van een lijnbron. De lijnbron wordt gecreëerd met behulp van een cilinderlens.

sche systeem. Daarbij geldt dat tan(a) = d/2h, met d de diameter van de lensopening. Uit de laatste relatie volgt dat er een correlatie bestaat tussen de verlichtingssterkte op de detector en de objectafstand h.

In praktische systemen wordt deze methode zelden toegepast ten gevolge van de grote invloed van de oppervlaktegesteldheid: ruwheid, soort materiaal en vervuiling.

Hoekmeting

In figuur 2 is de basisopzet voor het meten van hoogte door middel van hoekbepaling, ook wel triangulatie genoemd, weergegeven. Een smalle laserbundel creëert een spotje op object O_1. In het desbetreffende punt wordt het licht diffuus gereflecteerd. Een deel van het gereflecteerde licht wordt door lens L opgevangen en gebruikt voor het afbeelden van het spotje. Afhankelijk van de hoogte h_1 van het object zal de afstand c_1 van het beeldpunt ten opzichte van de optische as variëren. Wordt er nu in het beeldvlak B een positiegevoelige detector geplaatst, dan kan met behulp van de relatie $h_1 = (a \cdot d)/c_1$ de afstand van het object tot de sensor worden bepaald. Door het object af te tasten in x- en y-richting is het mogelijk driedimensionale vormen te meten.

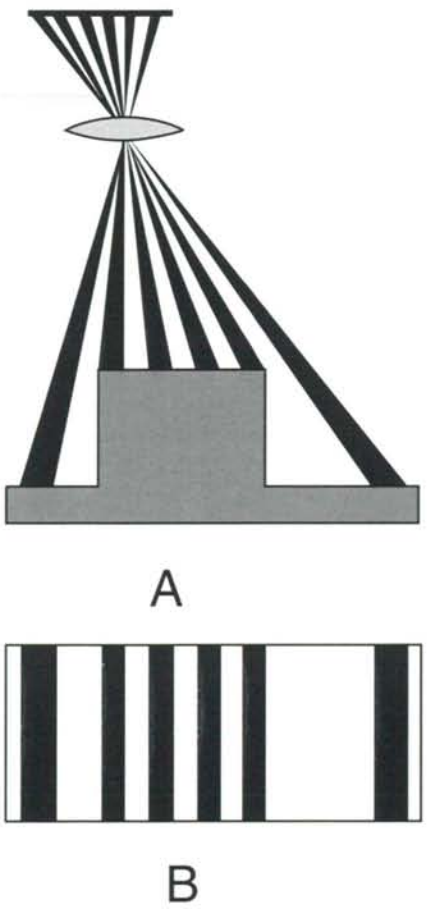
Een andere mogelijkheid is uit te gaan van een lijnbron en een 2D-detector, waarbij het object dan maar in één richting behoeft te worden afgetast, zie figuur 3. Door een raster te nemen is het mogelijk een driedimensionaal object te meten zonder het af te tasten, zie figuur 4. Het probleem bij het meten met een raster is echter dat het niet eenduidig bekend is welke lijn op het object bij welke rasterlijn behoort. Dit probleem is te omzeilen door gebruik te maken van een LC-scherm dat licht, dat door middel van een Gray-code is gecodeerd, naar het object stuurt. Ieder punt op het object is daardoor voorzien van een eenduidige code, waaruit de positie is te berekenen, zie figuur 5.

Theoretisch is het oplossend vermogen van de hiervoor besproken systemen – afhankelijk van de uitvoering – 10^{-3} tot 10^{-4} van het meetbereik. Tengevolge van onder meer niet-lineariteiten in de sensor, invloeden van de oppervlaktegesteldheid en lensfouten ligt in de praktijk de nauwkeurigheid een orde lager: 10^{-2}. De nauwkeurigheid van de triangulatiemeting kan verbeterd worden door gebruik te maken van een tweevoudige lichtweg, zie figuur 6. (Zie ook het artikel over de TWIN-sensor van TPA, elders in dit nummer van Mikroniek.)

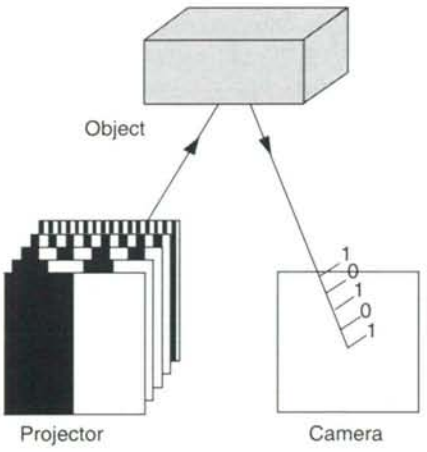
Focusmeting

In figuur 7 is de basisconfiguratie weergegeven voor hoogtemeting door middel van focusbepaling. De werkwijze van dit meetsysteem is als volgt. Licht, in dit geval afkomstig van een diodelaser, treft oppervlak O. Dit oppervlak reflecteert dat licht, waarna het via wigvormige prisma's terechtkomt op de sensoren a_1b_1 en a_2b_2. Afhankelijk van de positie van het oppervlak O ten opzichte van het focuspunt van de objectieflens ontstaan de drie situaties die in figuur 7a, b en c zijn weergegeven. De afwijking van het oppervlak ten opzichte van het brandvlak van de objectieflens wordt gegeven door een foutsignaal ter waarde $(B_1+B_2)-(A_1+A_2)$, waarin A_1, A_2, B_1 en B_2 de respectievelijke signalen voorstellen van de detectoren a_1, a_2, b_1 en b_2. Met het foutsignaal wordt een servosysteem gevoed dat de objectieflens zodanig verplaatst dat dit signaal gelijk aan nul wordt. Door de positie van de objectieflens te meten is de plaats van het oppervlak bekend. Voor het verkrijgen van driedimensionale informatie dient het object in x- en y-richting te worden afgetast.

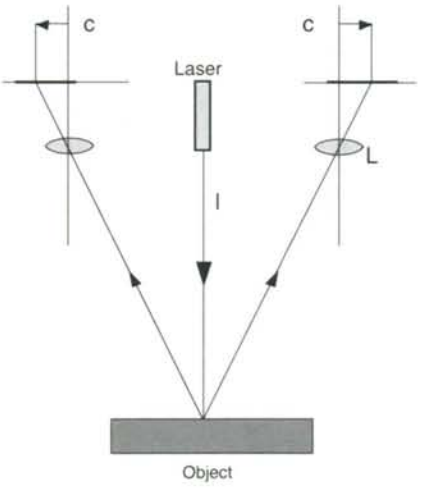
De nauwkeurigheid van de focusmethode bedraagt 10^{-3} van het meetbereik.



Figuur 4. Hoekmeting door middel van het afbeelden van een raster.

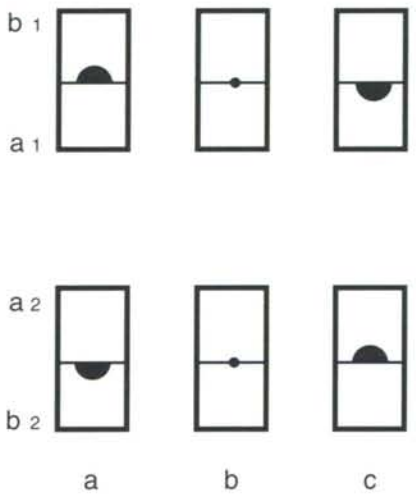


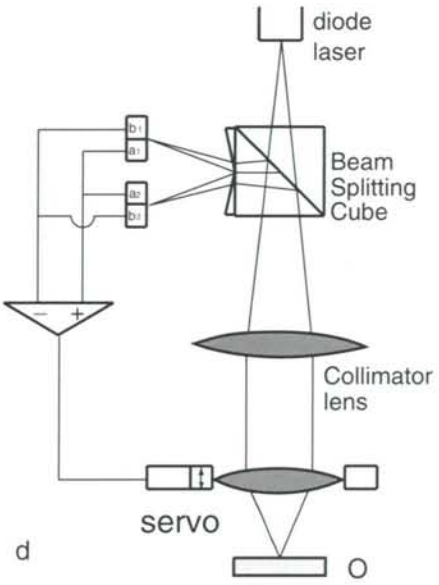
Figuur 5. Hoekmeting met behulp van gecodeerd licht.



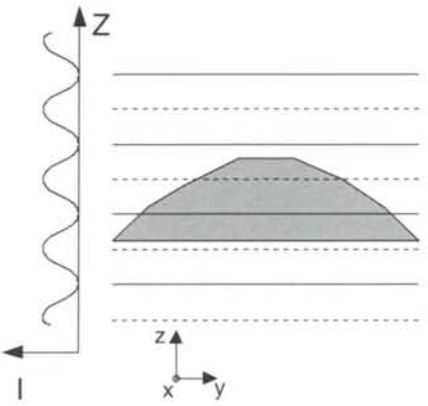
Figuur 6. Hoekmeting door middel van een dubbele lichtweg.

Opto-elektronisch meten van driedimensionale vormen





Figuur 7. Basisschema van focusmeting. a) focus boven, b) focus op, en c) focus onder oppervlak O; d) optische balans met wigvormige prisma's.



Figuur 8. Basisschema van fasemeting.

Figuur 9. De intensiteitsverdeling (hoogtekaart) op een bol. De onderlinge fase verschilt respectievelijk 0, 2/3 p en 4/3 p.

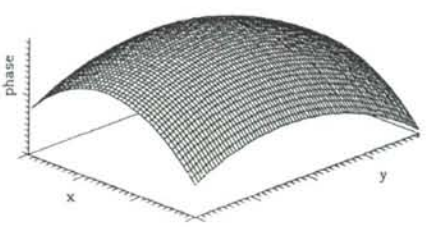
De gangbare meetbereiken liggen in de orde van 3 tot 300 μm.

Tijdmeting

De snelheid van licht in lucht bedraagt ongeveer 300.10^6 m/s. Door de tijd t te meten die een lichtpuls nodig heeft om een afstand te overbruggen, is het mogelijk deze afstand te berekenen. De lichtpuls wordt uitgezonden door een sensor en treft vervolgens een object. Na reflectie wordt de lichtpuls weer opgevangen door de sensor. De afstand d die de lichtpuls heeft afgelegd, is te berekenen uit $d = v \cdot t$. De tijdverschillen die nog gemeten kunnen worden, liggen in het picoseconde-gebied. Daardoor worden meetnauwkeurigheden verkregen in de ordegrootte van enkele mm's. Van objecten die zeer ver weg liggen (km's), kan op deze manier de afstand worden bepaald.

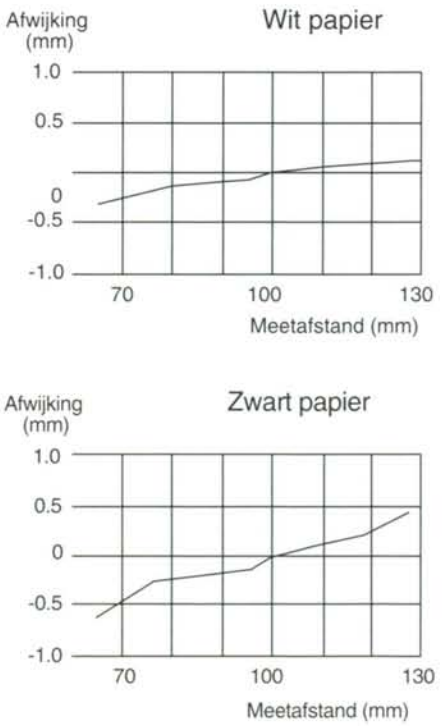
Fasemeting

Het laatste principe dat wordt behandeld, is afstandmeting door middel van fasebepaling. Dit principe berust op het feit dat het mogelijk is in een ruimte vlakken van gelijke lichtintensiteit te creëren, zie figuur 8. In de z-richting varieert de lichtintensiteit dan periodiek, meestal sinusvormig. Hierdoor kan men van een object een hoogtekaart laten ontstaan, zie figuur 9. Het patroon op het object kan beschreven worden door $I_1(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos(\phi(x,y)+\tau_1)$ met a(x,y) de variërende achtergrondintensiteit, b(x,y) de variërende amplitude, $\phi(x,y)$ de aan het object gerelateerde fase en τ_1 de beginfase. Fasehoek $\phi(x,y)$ kan worden berekend door variatie van de beginfase, waarbij τ_1 respectievelijk gelijk is aan 0, 2/3 π en 4/3 π. In figuur 9 wordt dit gedemonstreerd. De aan het object gerelateerde fase volgt dan uit de relatie $\phi(x,y) = \arctan[\sqrt{3}(I_3-I_2)/(2I_1-I_2-I_3)]$. Daar er een verband bestaat tussen de onderlinge afstand van de hoogtelijnen en de fase is zo de vorm van het object te bepalen, zie figuur 10.



Figuur 10. De vorm van een bol, weergegeven als pseudo-3D-vorm.

Methoden om dergelijke hoogtelijnen op een object te genereren zijn onder meer interferometrie, holografische interferentie, "speckle-interferometrie" (tijdfrequentie) en moiré-techniek (ruimtelijke frequentie). De afstand tussen de hoogtelijnen ligt – afhankelijk van methode en uitvoeringsprincipe – in de ordegrootte van de golflengte van licht (5.10^{-7} m) tot enkele mm's. De aan het object gerelateerde fase is te berekenen met een nauwkeurigheid groter dan



Figuur 11. De invloed van lichtintensiteit op de nauwkeurigheid van een triangulatiesensor.

1/100 van de afstand tussen de hoogtelijnen.

Tot besluit

In het voorgaande zijn de meest belangrijke principes beschreven waarop optische driedimensionale meetmethoden zijn gebaseerd. Hierbij is niet alleen aandacht geschonken aan de basisprincipes waarop deze methoden berusten, maar tevens zijn enkele van de mogelijke probleemgebieden aangeduid. Het moge duidelijk zijn dat het niet mogelijk is alle facetten in extenso te behandelen. De gebruiker van optische meetmiddelen dient echter wel te beschikken over enig inzicht in de toegepaste principes. Dat inzicht maakt het gebruikers van optische meetsystemen mogelijk de bruikbaarheid van zo'n systeem voor hun eigen situatie beter in te schatten. Dat kan worden toegelicht aan een sensor gebaseerd op hoekmeting. Wordt er in plaats van een CCD-chip (Charge-Coupled Device) een PSD (Position-Sensitive Device) gebruikt, dan blijkt dat de intensiteit van het gereflecteerde licht van invloed is op de meetnauwkeurigheid. In figuur 11 is daarvan een voorbeeld gegeven. Een gebruiker die niet op de hoogte is van dit effect, oordeelt dat optische driedimensionale meetmethoden niet betrouwbaar zijn. In feite wordt echter het systeem niet volgens de specificaties gebruikt.
De hier gepresenteerde waarden geven slechts een globale indicatie en behoeven niet voor alle gevallen te gelden.

Auteursnoot

Dr.ir. Alfons M.F. Wegdam, Ir. R. Visman en Dr. O. Podzimek zijn respectievelijk werkzaam bij DEMCON Twente BV te Enschede, het Centrum voor Produktietechniek te 's-Hertogenbosch en de Universiteit Twente te Enschede.

Het artikel is bewerkt door Frans Zuurveen.

NVFT, vereniging voor precisie-technologie

De NVFT is een vereniging van technici die hoogwaardige professionele apparatuur ontwerpen, ontwikkelen of fabriceren. Het betreft zowel consumenten- als kapitaalgoederen. Door integratie van technieken als mechanica, optica, elektronica en glastechniek ontwikkelen zij steeds nieuwe, geavanceerde produkten.

- De NVFT stimuleert de onderlinge contacten en informeert haar leden over
  ontwikkelingen in het vakgebied door regionale bijeenkomsten,
  cursussen,
  symposia en publikaties in Mikroniek.
- Bij deelname aan de **Mikropool** worden moeilijk (in kleine hoeveelheden) verkrijgbare materialen en specialistische bewerkings-technologieën uitgewisseld.
- NVFT-leden krijgen korting op de door de NVFT georganiseerde activiteiten, evenals op de activiteiten van andere verenigingen waarmee de NVFT een samenwerkingsovereenkomst heeft.

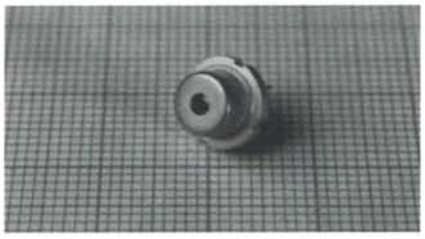
Inlichtingen:
Secretariaat NVFT, Postbus 6367, 5600 HJ Eindhoven,tel.: 040 – 473 659 fax: 040 – 460 645.

Laserdiode als basis voor een veelzijdig programma afstandsensoren

De TWIN-sensor van TPA: een snelle èn nauwkeurige hoogtemeter

C.A.A.M. Maas

De halfgeleider-laser oftewel laserdiode, zie figuur 1, heeft een aantal voordelen boven de conventionele gaslaser. Er kan met "gewone" gelijkspanning worden gewerkt in plaats van hoogspanning, de glazen buis ontbreekt, waardoor de halfgeleider-laser robuust en compact is, en de levensduur is veel langer.
Op basis van de laserdiode heeft TPA Systems BV een programma afstandsensoren ontwikkeld. Van één ervan, de TWIN, werkend volgens het dubbele triangulatie meetprincipe, wordt de ontwikkeling beschreven.



Figuur 1. Een laserdiode op ongeveer 4x de ware grootte

Sensoren kunnen worden toegepast voor positionering, controle van uitlijning, hoogte- en diktemeting, diameter- en breedtemeting en zelfs troebelheidsmeting en lasnaaddetectie.
Bij diktemeting is een drietal methodes te onderscheiden.
– Bij diktemeting ten opzichte van een referentievlak dient het oppervlak waarop het produkt zich bevindt, bijvoorbeeld een transportband, als referentie.
– Bij diktemeting met compensatie van een referentievlak wordt gemeten ten opzichte van een niet stabiel vlak, bijvoorbeeld een slingerende transportrol. Een tweede sensor zorgt dan voor het meten en in rekening brengen van de desbetreffende slingering.
– Bij diktemeting zonder referentievlak wordt er altijd gebruik gemaakt van een tweetal sensoren, die aan weerszijden van het object zijn geplaatst. Het meetresultaat is dan het verschil van de metingen door beide sensoren.

De meetprincipes

De meetprincipes die zijn gekozen voor het programma afstandsensoren van TPA, zijn:
- triangulatie (met één of met twee detectoren),
- autofocussering,
- schaduwmeting, en het
- laser-doppler-principe.

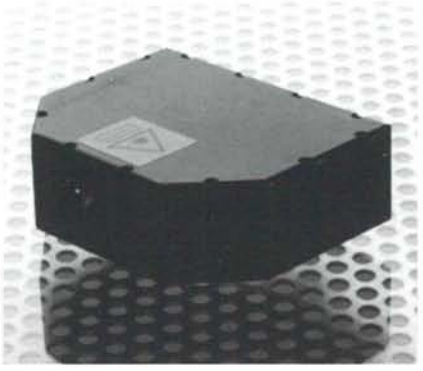
Het laatste meetprincipe wordt gebruikt voor snelheidsmeting, de overige voor dimensionale meting.

– Het triangulatieprincipe wordt in dit artikel uitgebreid besproken.
– Het autofocusprincipe berust op de nauwkeurige focussering van een laserspot op het objectoppervlak. Een afwijking van de exacte focussering wordt via een bundelsplitser en een viervoudige detector elektronisch vertaald in een signaal voor de verplaatsing in de richting van de optische as.
– Bij het schaduwmeetprincipe wordt bepaald in hoeverre het object een nauwkeurig gedefinieerde, evenwijdige laserbundel afdekt.
– Het door TPA toegepaste differentiële laser-doppler-principe berust enerzijds op interferentie van twee laserbundels, anderzijds op frequentieverandering als gevolg van een snelheid van het reflecterende object loodrecht op de richting van de bundels.

De ontwikkeling van de TWIN-sensor

De TWIN-sensor, zie figuur 2, is een hoogwaardige optische afstandsensor die zowel geschikt is voor gebruik in de meetkamer als in een industriële omgeving.

De belangrijkste doelstellingen bij het ontwerp waren het verkrijgen van:
– een grote mate van produktonafhankelijkheid,
– een hoge meetsnelheid, en
– een hoge resolutie en nauwkeurigheid.

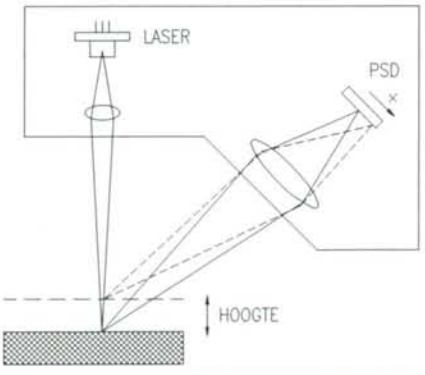


Figuur 2. Foto van de TWIN-sensor type LTS.

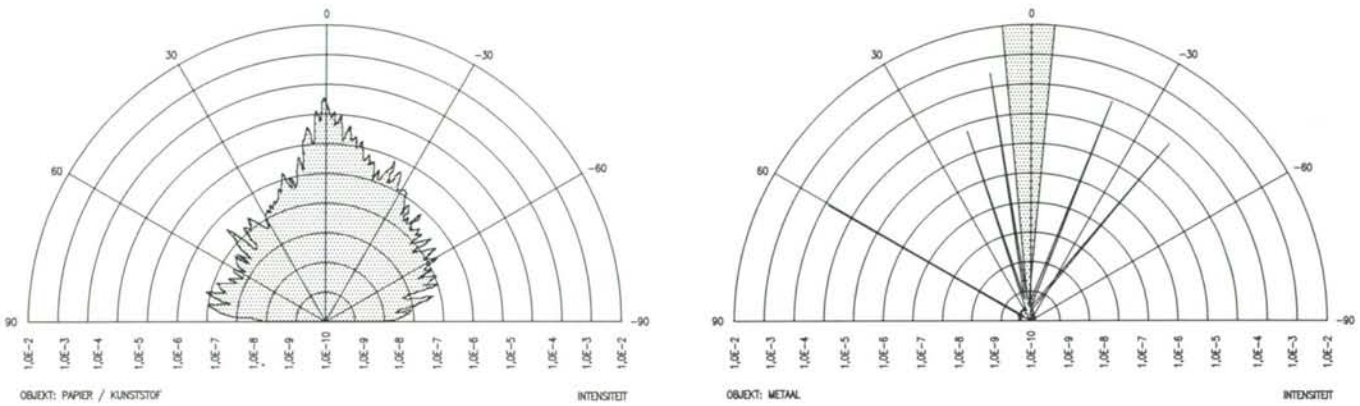
Dank zij de multidisciplinaire inspanningen op het gebied van optica, elektronica, fijnmechanica en produktontwikkeling van Philips CFT en TPA Systems is een sensor gerealiseerd met bijzondere kwaliteiten. De TWIN onderscheidt zich doordat deze in staat is zeer betrouwbaar, snel en nauwkeurig de afstand te bepalen tot produkten, variërend van matzwart rubber tot glimmend metaal.

Basisprincipes

Het basisprincipe van de TWIN berust op optische triangulatie, waarbij het produkt wordt verlicht met een laserstraal, zie figuur 3. Het diffuus reflecterende object zal vervolgens het licht in alle richtingen verstrooien. Een deel daarvan wordt opgevangen door een lens, die de lichtvlek op het produkt afbeeldt op een positiegevoelige detector.



Figuur 3. Het principe van optische triangulatie.



Figuur 4. De intensiteitsdistributie van a) papier of kunststof, en b) metaal.

De plaats van de afgebeelde spot is bepalend voor de afstand tussen de sensor en het produkt.
De laserstraal dient bij voorkeur loodrecht op het voorwerp gericht te worden, zodat geen overspraak plaatsvindt tussen de te meten hoogte en de plaats waarop deze hoogte bepaald moet worden. Door deze keuze van het afbeeldend systeem treedt echter een onvermijdelijke niet-lineariteit op tussen de positie op de sensor en de werkelijke afstand, die echter eenvoudig elektronisch gecorrigeerd kan worden.
Een veelvuldig toegepaste detector bij deze methode is de PSD (Position Sensing Detector), welke is gebaseerd op het laterale foto-effect. Deze detector levert twee stromen, die beide zowel proportioneel zijn met de hoeveelheid licht op de detector, als met het zwaartepunt van de positie van de lichtvlek. Voor een juiste positiebepaling, die onafhankelijk is van de reflectie-eigenschappen van het voorwerp, is een normering op de som van beide stromen noodzakelijk.

Sensoreigenschappen

Elk meetinstrument heeft typische eigenschappen, die invloed hebben op de betrouwbaarheid van de meetgegevens. Dat geldt ook voor optische triangulatiesystemen. Alvorens een beschrijving te geven van de optiek en de elektronica van de TWIN, is het daarom goed eerst een opsomming te maken van de belangrijkste parameters die een rol spelen bij de uiteindelijke kwaliteit van de hoogtebepaling door de TWIN.

De gebruiker van een optische afstandsensor zal voornamelijk geïnteresseerd zijn in specificatiepunten als nauwkeurigheid, resolutie en meetsnelheid. Deze eigenschappen worden natuurlijk in belangrijke mate bepaald door de keuze van de optiek en elektronica. Echter, omdat het oppervlak van het te meten produkt deel uitmaakt van het optische pad van laser tot PSD, zijn de invloeden van de optische eigenschappen van het oppervlak van een produkt nooit volledig uit te sluiten. Deze zullen dan ook een rol spelen in de uiteindelijke kwaliteit van de meting.

De belangrijkste begrippen worden hieronder kort samengevat.

Nauwkeurigheid

Een van de moeilijk te definiëren eigenschappen van een triangulatiesensor is de absolute nauwkeurigheid. Het meetsysteem moet de afstand bepalen aan de hand van het gereflecteerde licht van het voorwerp. Het is daarom moeilijk over nauwkeurigheid te spreken als de reflectieparameters van het produkt niet of nauwelijks bekend zijn. Veel fabrikanten specificeren deze eigenschap dan ook niet, of definiëren deze als die van min of meer ideaal, zuiver wit, diffuus reflecterend materiaal, bij voorbeeld witte keramiek. Een realistisch produkt zal echter minder ideaal zijn en derhalve minder goed zijn te meten.

Resolutie

Resolutie, gedefinieerd als de kleinste nog waarneembare hoogteverandering van het produkt, is vooral een elektronisch probleem. Het is goed mogelijk dat, ondanks onnauwkeurige optiek, er toch een zeer hoge resolutie haalbaar is. Ook bij een kwalitatief minder goed optisch systeem zal immers een zeer kleine hoogteverandering altijd een kleine verplaatsing van de lichtvlek op de PSD veroorzaken. Er bestaat dus geen enkele vaste relatie tussen nauwkeurigheid en resolutie, zodat een hoge resolutiewaarde geen enkele garantie voor een grote nauwkeurigheid geeft. Veel fabrikanten specificeren desondanks vaak alleen de maximum resolutie van hun sensoren.

De resolutie wordt doorgaans uitgedrukt in de RMS-waarde (het kwadratisch gemiddelde) van de ruis aan de uitgang van de sensor. Dit getal hangt dan ook direct samen met de meetbandbreedte. Laagdoorlaat-filtering van de uitgang kan derhalve een behoorlijke resolutieverbetering opleveren.

Naast het oplossend vermogen voor hoogte kunnen we ook spreken van een laterale resolutie. Daarmee wordt het onderscheidend vermogen bedoeld voor kleine details in het oppervlak van het produkt. De spotgrootte van de sensor en niet zozeer de elektronica is hier van groot belang.

Hoogteverschillen in het object zorgen voor een signaal dat correspondeert met de gemiddelde hoogte binnen de lichtspot. Er ontstaat hierdoor een middeling welke afhankelijk is van de spotgrootte op het object. In het algemeen kan worden gezegd dat een kleinere spot een meting mogelijk maakt met een hogere laterale resolutie, omdat de hoogtecontouren van objecten met kleine details dan veel nauwkeuriger worden weergegeven.

De TWIN-sensor van TPA: een snelle èn nauwkeurige hoogtemeter

Snelheid

Voor een breed toepassingsgebied, waarbij het ook mogelijk moet zijn produkten te inspecteren die bij voorbeeld op een transportband worden aangeboden, is een snelle reactietijd van de sensor een eerste vereiste. Deze eis kan gekarakteriseerd worden in termen van bandbreedte, bemonsterfrequentie en insteltijd.

De bandbreedte is vaak een misleidend getal, omdat deze aangeeft bij welke frequentie van een sinusvormige hoogtemodulatie het uitgangssignaal 30% (wat overeen komt met –3 dB) is gedaald. Dat betekent dat bij de opgegeven maximale frequentie een fout in het hoogtesignaal ontstaat van 30%. Wanneer de vereiste nauwkeurigheid echter 1% bedraagt, is deze frequentie een factor zeven lager!
Ook deze eigenschap zit vaak verborgen in de door fabrikanten opgegeven specificaties, omdat de indruk wordt gewekt dat de opgegeven nauwkeurigheid ook nog gehaald wordt bij de maximale frequentie in de genoemde bandbreedte.

De bemonsterfrequentie van een meetsysteem zegt principieel nog niets over de maximaal toelaatbare snelheid van de hoogteveranderingen. Bij een meetsysteem als het hier beschouwde zijn theoretisch slechts hoogteveranderingen te bepalen met een frequentie die lager is dan de helft van de bemonsterfrequentie. In de praktijk is dit zeer moeilijk haalbaar. Het beste criterium is wellicht een beschrijving van het instelgedrag van de sensor als gevolg van een stapvormige hoogteverandering. Hierbij moet dan een bepaalde grenswaarde worden aangehouden, zoals bijvoorbeeld een foutband rondom de eindwaarde. De insteltijd is dan die tijd die nodig is om aan de genoemde grenswaarde te voldoen als reactie op een stapvormige verandering van hoogte of intensiteit.

Produkteigenschappen

Een aantal typische effecten die een rechtstreeks gevolg zijn van de interactie van het laserlicht met het produkt en derhalve de metingen ongunstig kunnen beïnvloeden, zijn:

Intensiteitsdistributie

De ruimtelijke intensiteitsdistributie van het gereflecteerde licht over de openingshoek van het objectief kan aanleiding geven tot grove meetfouten. In het algemeen is het afstraalgedrag van een produkt niet bekend. Dat gedrag kan soms erg grillig zijn, zie figuur 4a en 4b. Een lichtstraal die via de rand van de lens op de PSD wordt afgebeeld, kan op de PSD een andere plaats bereiken dan een straal die door het midden van de lens gaat. Door deze optische fout wordt de hoogtemeting afhankelijk van het afstraalgedrag van het object, waardoor de meting niet meer eenduidig is.

Absolute hoeveelheid licht

De hoeveelheid gereflecteerd licht die opgevangen wordt door het objectief, speelt een rol bij zowel de resolutie als de snelheid van de sensor. Het mag duidelijk zijn dat een object dat niet reflecteert in de richting van het objectief, niet gemeten kan worden.

Intensiteitsverschillen binnen de spot

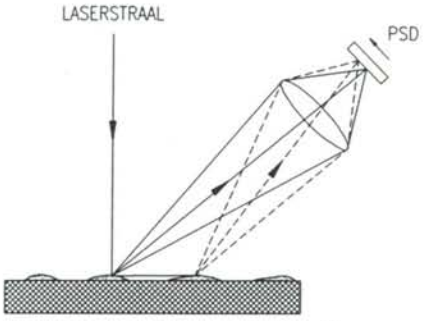
Dit effect veroorzaakt een onnauwkeurige meting, omdat de afzonderlijke bijdragen van het licht uit verschillende delen van de spot door de sensor niet op dezelfde manier worden waargenomen. De lichtvlek met eindige afmetingen op het voorwerp wordt op de PSD ook met eindige afmetingen afgebeeld. Intensiteitsvariaties binnen de spot worden dan ook onterecht als hoogtevariaties geïnterpreteerd. Ook hier geldt het criterium: een kleinere spotgrootte geeft een beter meetresultaat.

Transparantheid van het produkt

Bij produkten die min of meer transparant zijn voor de toegepaste golflengte, zal het licht in zekere mate in het object dringen. Dit komt vooral voor bij kunststoffen. Interne verstrooiing zorgt er uiteindelijk voor dat het licht desondanks opgevangen wordt door het objectief, zij het echter met een onjuiste hoogtedefinitie. Dit effect vertoont een sterke analogie met het vervormen van een zacht produkt door een mechanische meettaster.

Meervoudige reflecties aan het produkttoppervlak

Bij complexe oppervlaktestructuren kan het gebeuren dat de reflectie een ander deel van het produkt treft dan dat van de eigenlijke spot, zie figuur 5. Als deze secundaire reflectie ook opgevangen wordt door het objectief, leidt dit tot een onjuiste meting. Er ontstaat immers een verschuiving van het zwaartepunt van de lichtvlek op de PSD.

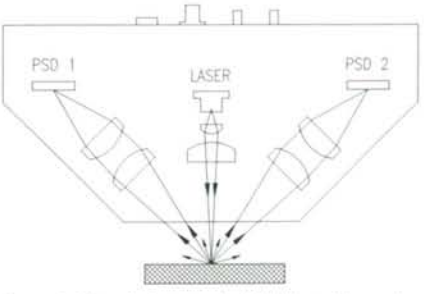


Figuur 5. Het optreden van secundaire reflecties.

In het algemeen blijkt dat al deze produkteigenschappen van invloed kunnen zijn op de nauwkeurigheid van de meting. De maatregelen die getroffen zijn om deze invloeden tot een minimum te beperken, worden in het volgende hoofdstuk besproken.

De dubbele optiek van de TWIN-sensor

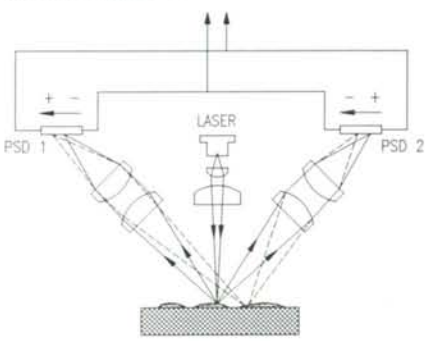
Figuur 6 illustreert het optische schema van de TWIN. Een opvallend verschil met conventionele triangulatiesystemen is de toepassing van twee afbeeldende systemen. Het belangrijkste voordeel dat hiermee is bereikt, is de toename van de zichtbaarheid van de laserspot op het voorwerp en derhalve een betere contourvolging bij steile hoogteveranderingen. Door de schaduwwerking van een steile wand kan immers het gereflecteerde licht gedeeltelijk geblokkeerd worden. Een tweede objectieftak aan de andere zijde verhindert deze blokkering.



Figuur 6. Het principe van de dubbele optiek van de TWIN-sensor.

Het hoogte-uitgangssignaal van de TWIN is de – naar intensiteit gewogen – som van de twee PSD-responssignalen. Hiervoor worden de PSD's parallel geschakeld, waarbij zowel de buitenste als de binnenste contacten met elkaar worden doorverbonden. Die PSD welke het meeste licht ontvangt, bepaalt zo in hoofdzaak het uiteindelijke hoogtesignaal. Overigens kan het gecombineerde signaal van beide PSD's voor het vervolg van de signaalbewerking als dat van één enkele PSD worden beschouwd.

Een ander belangrijk voordeel van deze configuratie is de onderdrukking van de laterale gevoeligheid van de sensor. Normaal beweegt de spot op het object zich onder invloed van hoogteveranderingen zuiver verticaal. Het is echter ook mogelijk dat de effectieve spot zich schijnbaar lateraal verplaatst, dat wil zeggen naar links of rechts. Dit effect treedt op als de spot asymmetrisch op een semi-transparant voorwerp wordt vervormd of als er reflectieverschillen binnen de spot optreden. Ook treedt het effect op als er secundaire reflecties zijn. In al deze gevallen wordt door het objectief een reflectie ontvangen die schijnbaar naast de as van de lichtstraal is ontstaan, zie de gestippelde stralengang in figuur 7.



Figuur 7. Secundaire reflecties bij de TWIN-sensor.

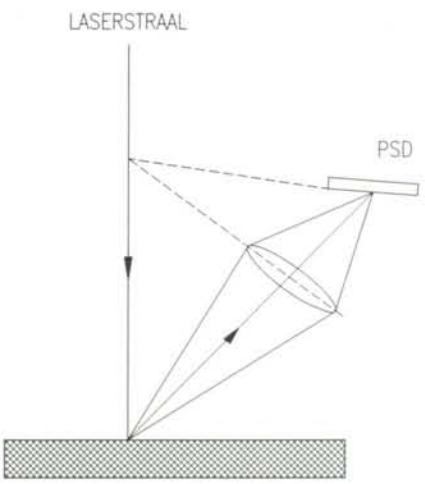
Aan de positie van de lichtspots op beide PSD's en de polariteit van de stromen in figuur 8 is te zien dat een hoogteverandering een identieke invloed heeft op beide PSD's, terwijl een laterale verplaatsing door beide PSD's juist verschillend wordt geïnterpreteerd. PSD 1 meet dan bijvoorbeeld een te hoge waarde, terwijl PSD 2 een te lage waarde constateert. Er treedt dus een sterke gevoeligheidsreductie op voor licht dat naast de spot vertrekt en vervolgens het objectief bereikt.

Deze compensatie bewijst ook goede diensten bij het meten van produkten die de spotvorm ernstig verstoren, zoals het geval is bij semi-transparante produkten als gevolg van indringeffecten. Overigens kan secundaire reflectie ook optreden in de richting loodrecht op het vlak van tekening. In deze richting ontstaan er echter in principe geen afwijkingen, omdat een PSD daarvoor ongevoelig is.

Om deze compensatietechniek goed te laten slagen zal de hoeveelheid secundair gereflecteerd licht die wordt opgevangen door beide objectieven, hetzelfde moeten zijn. Dit is natuurlijk niet altijd het geval. Daarom wordt in de praktijk het nadelig effect van secundaire straling niet volledig geëlimineerd, maar voor een belangrijk deel onderdrukt.

Scheimpflug-conditie

Een ander opvallend verschil met andere sensoren is dat de PSD's van de TWIN niet haaks op de hartlijn van het objectief staan. Men kan aantonen dat in de TWIN-configuratie de objectspot voor iedere hoogte in het meetbereik zuiver in focus op de PSD wordt afgebeeld. Daardoor wordt er altijd gezorgd voor een minimale spotgrootte op de PSD. Deze configuratie staat bekend als de 'Scheimpflug-conditie', zie figuur 8.



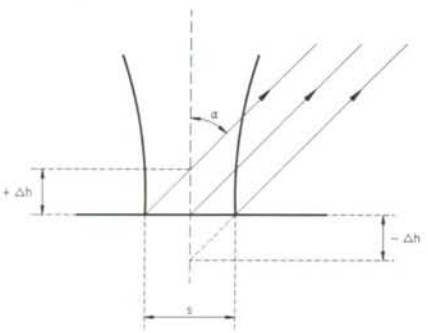
Figuur 8. Het voldoen aan de Scheimpflug-conditie. Het hoofdvlak van de lens en de richting van de PSD snijden elkaar in het hart van de laserbundel.

Op het eerste gezicht lijkt deze conditie overbodig, omdat de PSD immers op het zwaartepunt van de lichtvlek reageert. Echter, omdat de ruimtelijke intensiteitsdistributie van het gereflecteerde licht niet bekend is, is de intensiteitsverdeling binnen de lichtvlek ook niet bekend. Hiermee ontstaat een onzekerheid wat betreft het zwaartepunt van de lichtvlek op de PSD, en daarmee ook een onnauwkeurigheid.

Door de keuze voor de configuratie van figuur 7 is er een zeer kleine spot op het PSD-oppervlak gerealiseerd, zodat de spreiding van de plaats van het zwaartepunt onder invloed van de inhomogene intensiteitsverdeling binnen de spot tot een minimum is gereduceerd.

Spotgrootte

Dat een relatief grote spot in het vlak van de hoogtemeting door uitmiddelingseffecten een hogere nauwkeurigheid oplevert, berust op een misvatting. De meting vindt immers plaats op oppervlakken waarvan de ruimtelijke intensiteitsverdeling van de reflectie a priori niet bekend is. Figuur 9 illustreert dit door middel van een aanzienlijke vergroting van de omgeving van de spot op het object; de spotdiameter is met s aangeduid.



Figuur 9. Vergrote weergave van de afbeelding van de laserspot op het objectoppervlak.

Een eenvoudige beschouwing laat zien dat het licht dat de spot verlaat vanuit de linker helft, een andere meetwaarde ($+\Delta h$) oplevert dan het licht vanuit de rechter helft ($-\Delta h$). De maximale fout die gemaakt wordt, is in het slechtste geval: $\Delta h = s/(2\tan\alpha)$. Dit pleit voor een zo klein mogelijke spot en een zo groot mogelijke observatiehoek. In de TWIN is rekening gehouden met dit fenomeen door een relatief grote observatiehoek

De TWIN-sensor van TPA: een snelle èn nauwkeurige hoogtemeter

te kiezen (43°) en een zo klein mogelijke spot (30 µm). In werkelijkheid is deze benadering wat te pessimistisch. Het effect speelt alleen een rol van betekenis als verwacht mag worden dat het afstraalgedrag binnen de spot zeer grote variaties vertoont, bijvoorbeeld bij contrastrijke overgangen. Bovendien treedt er, als gevolg van de 'twee-ogige' optiek van de TWIN, een grote onderdrukking van dit effect op, omdat het teken van de fout Δh voor beide takken verschillend is en er dus compensatie optreedt. De absolute nauwkeurigheid wordt hiermee aanzienlijk vergroot. Zoals duidelijk mag zijn, leidt een kleine spotgrootte ook tot een hoge laterale resolutie, zodat zeer kleine details in het objectoppervlak waargenomen kunnen worden.

Afbeeldingskwaliteit

Een hoge afbeeldingskwaliteit en daarmee een nauwkeurige positionering van de componenten is voor de gekozen configuratie een eerste vereiste. Vervormingen van de spot op de PSD ten gevolge van lensfouten (bijvoorbeeld sferische aberratie of beeldveldkromming) of defocussering leiden onherroepelijk tot onnauwkeurigheden in de hoogtemeting. Voor elk objectief is daarom gekozen voor een lenzenstelsel dat bestaat uit twee achromaten. Een diafragma verkleint de totale openingshoek, zodat de randfouten van de lens onderdrukt worden. Na een zorgvuldige afregeling is op deze manier de totale fout als gevolg van onvolkomenheden in de optiek verwaarloosbaar klein.

Ook de eisen ten aanzien van de kwaliteit van de spot op het voorwerp zijn hoog. Vooral de afmetingen van de spot dienen zo klein mogelijk te zijn. Om een minimale spotgrootte te realiseren wordt voor het collimeren van het laserlicht een speciaal binnen Philips ontwikkelde asferische replicalens lens gebruikt. Een achromaat verzorgt vervolgens de focussering tot een buigingsbegrensde spot.

Ontwerpoverwegingen bij de TWIN-elektronica

Het doel van de elektronica is de signalen van de PSD's met minimaal kwaliteitsverlies om te zetten in afstandsinformatie die voor de buitenwereld begrijpelijk is.

Aan de signaalverwerking van de PSD's in de TWIN worden de volgende voorwaarden gesteld:

• *Hoge resolutie*
Het spreekt voor zich dat er gestreefd moet worden naar een hoge resolutie. Immers, de PSD's zijn op zichzelf ruisarme detectors, die een continue representatie geven van de plaats van de spot op hun oppervlak. Er is naar gestreefd de totale systeemruis ondergeschikt te maken aan die van de PSD zelf.

• *Hoge nauwkeurigheid*
Vanzelfsprekend moet de nauwkeurigheid van de elektronica voldoende groot zijn om de kwaliteit van de optiek volledig tot zijn recht te laten komen. Een typische nauwkeurigheidswaarde is 0,05% van de volle schaal.

• *Hoge snelheid*
Het doel is een sensor te realiseren die beduidend sneller is dan de bestaande optische afstandsensoren. Alleen op die manier is toepassing bij snelle 'in-line'-inspectie in produktieprocessen mogelijk. Een insteltijd van 10µsec is gewenst.

• *Groot dynamisch bereik*
Deze eis volgt uit de wens dat de sensor zonder omschakeling in staat moet zijn een grote variëteit aan produkten te meten met zowel goede als slechte reflectie-eigenschappen. In de praktijk zijn reflectievariaties te verwachten van 1:1000 of zelfs meer.

Een belangrijke keuze is die tussen het wel of niet moduleren van het laserlicht. Door modulatie wordt onafhankelijkheid bereikt van de condities van het omgevingslicht van de sensor. Om een bandbreedte van 100 kHz te realiseren moet echter een modulatiefrequentie van ongeveer 1MHz worden gebruikt, daar anders de behaalde nauwkeurigheid en dynamiek niet voldoende zijn. Er is gebleken dat onder normale omstandigheden het omgevingslicht – vergeleken met de hoge intensiteit van de laserspot – dermate zwak is dat gemoduleerde signaalverwerking niet nodig is. Een voorwaarde is echter wel dat afwijkingen en drift van de PSD-signalen en de elektronica tot een minimum beperkt worden. Dank zij moderne operationele versterkers en een stabiel compensatiecircuit behoeft dit echter geen probleem te vormen. Bovendien zorgt een selectief infrarood-filter voor een aanzienlijke onderdrukking van het omgevingslicht. Op deze manier blijkt het mogelijk een hoge snelheid, een groot dynamisch bereik en een hoge nauwkeurigheid te realiseren.

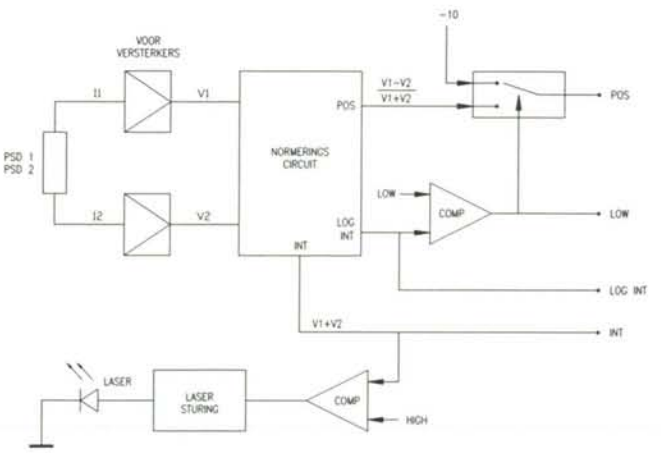
Voor het bepalen van de positie van de lichtvlek op de PSD moet het quotiënt worden berekend van het verschil en de som van de beide PSD-stromen. De uitvoering van deze deling is geen eenvoudig probleem. Vooral de eis van een groot dynamisch bereik vormt een lastige opgave. In formule uitgedrukt:

Afstand = $(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$

I_1 en I_2 stellen hierin de beide PSD-stromen voor.

Er is een aantal technieken beschikbaar om een dergelijke deling uit te voeren:

• *Analoog delen*
Een deling met behulp van een analoog circuit is het eenvoudigst. De resultaten met commercieel verkrijgbare compo-



Figuur 10. Blokschema van de elektronica van de TWIN-sensor.

nenten zijn over het algemeen echter zeer teleurstellend.

• *Laser-terugkoppeling*
Met behulp van deze techniek wordt het laservermogen zodanig geregeld dat de noemer van bovenstaande formule constant blijft en een deling daardoor overbodig wordt. Dit vergt echter een groot dynamisch regelbereik van de laser zelf. Het belangrijkste nadeel van deze methode is dat bij goed reflecterende objecten het laservermogen zodanig wordt gereduceerd dat de signaal/ruis-verhouding onnodig verslechtert.

• *Digitaal delen*
Directe AD-conversie van de PSD-stromen vereist een zeer hoge resolutie van de AD-omzetter. Hieruit valt af te leiden dat het dynamisch bereik van deze omzetter minimaal gelijk moet zijn aan het produkt van het dynamisch bereik wat betreft de hoogte en het dynamisch bereik wat betreft de intensiteit. In dit geval resulteert dit in een dynamisch bereik van 2000 x 1000 = $2x10^6$. Dat komt bij binaire conversie overeen met een resolutie van 21 bits!

De TWIN-elektronica

Figuur 10 geeft het blokschema weer van de elektronica van de TWIN; waaruit blijkt dat voor de TWIN-elektronica een combinatie van twee technieken wordt toegepast: delen met behulp van een analoog circuit, en terugkoppelen van de laservoeding.

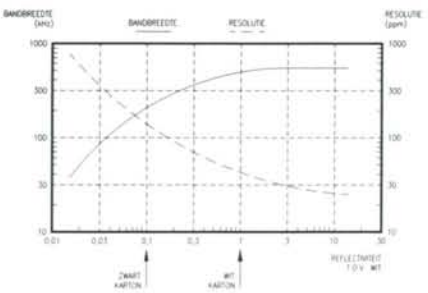
De deling in de TWIN-elektronica wordt uitgevoerd door een geoctrooieerd normeringscircuit. Dit circuit berekent, zonder de tussenstap van optellen en aftrekken, het genormeerde resultaat van I_1 en I_2. Bovendien wordt tegelijkertijd de som van de twee stromen en de logaritme ervan berekend. Beide signalen zijn voor de gebruiker beschikbaar en vormen een maat voor de lichtintensiteit op de PSD.

Het terugkoppelcircuit voor de laser van de TWIN vermindert alleen het laservermogen als de hoeveelheid licht een vooraf bepaald maximum overschrijdt. Dat maximum hangt samen met de verzadigingsgrens van de componenten. Zo wordt maximaal geprofiteerd van het beschikbare licht, zodat de hoogst mogelijke signaal/ruis-verhouding wordt bereikt.

De resultaten

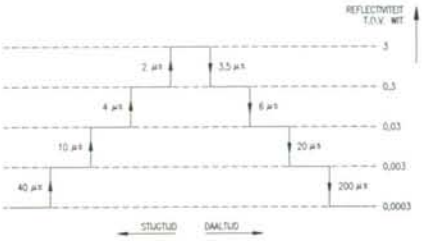
Figuur 11 toont de bandbreedte en resolutie als functie van de reflectie van het voorwerp. De reflectie is genormeerd ten opzichte van die van wit karton. De bijbehorende stroom van de PSD's is ongeveer gelijk aan 32 µA, wat overeenkomt met een totaal ontvangen lichtvermogen van 50 µW.

Een eigenschap die het gevolg is van de gekozen technieken, is, dat zowel bandbreedte als resolutie afhankelijk zijn geworden van de hoeveelheid licht op de PSD's. Deze eigenschap kan men ook intuïtief aanvoelen. Immers, als een bepaalde hoeveelheid ruis is gegeven, zal bij toenemende intensiteit de signaal/ruis-verhouding en daarmee de resolutie verbeteren.
De bandbreedtebeperking bij lage intensiteiten is een direct gevolg van het instelgedrag van het normeringscircuit.



Figuur 11. Bandbreedte en resolutie als functie van de reflectie van het objectoppervlak. De reflectie is genormeerd ten opzichte van die van wit karton.

Dat bereikt sneller de eindwaarde naarmate het ingangscircuit meer stroom ontvangt. Zoals blijkt uit de grafiek, is een bandbreedte van 500 kHz mogelijk. De instelfrequentie wordt meestal opzettelijk begrensd tot circa 100 kHz, ten einde de resolutie te verhogen. Deze instelfrequentie is voor de meeste applicaties snel genoeg, want in de praktijk blijkt dat het produkttransport en niet de sensor de meetsnelheid beperkt. Bij een zijdelingse afstand van 30 µm van de afzonderlijke metingen is een produktsnelheid van 3 m/s nog toegestaan. Bij deze berekening is aangenomen dat het object zich tijdens één meetperiode over niet meer dan eenmaal de spotgrootte verplaatst. Bij grotere objectsnelheden ontstaat een middelingseffect van de gemeten hoogtewaarden.



Figuur 12. Het instelgedrag van het normeringscircuit.

Figuur 12 illustreert het instelgedrag van het normeringscircuit. Bij elke stap in de waarde van de reflectie is de stijgen de daaltijd aangegeven. Het blijkt dat de insteltijd voornamelijk wordt bepaald door de eindwaarde van de PSD-stromen. Het criterium bij deze metingen is de tijd die het positie-uitgangssignaal nodig heeft om binnen 0,5% van de volle schaal de eindwaarde te bereiken.

Specificaties van de Twin-sensor

De specificaties die als resultaat van de hier beschreven ontwikkeling van de TWIN-sensor zijn bereikt, zijn als volgt:

Vrije werkafstand	15 mm
Meetbereik	6 mm
Nauwkeurigheid	± 2 µm
Resolutie	±0,2 µm
Spotdiameter	< 35 µm
Bandbreedte	500 kHz
Insteltijd	< 10 µsec
Dynamisch bereik	1 : 1000
Lasergolflengte	780 nm
Uitgangssignalen :	
Hoogtesignaal	–10..+10 V
Lin.Int.signaal	0..+ 5 V
Log.Int.signaal	–6..+ 6 V (3V/Decade)
Objectindicatie	0..+ 5V (TTL)
Afmetingen 120 x 95 x 40 mm (lxhxb)	
Gewicht	circa 70 gram
Externe voeding	+15/–15 V DC
Stroomopname	circa 80 mA
Temperatuurgebied	0..50 °C

Auteursnoot

Ing. C.A.A.M. Maas is technical manager van T.P.A. Systems BV, Maastricht
Bewerking: Frans Zuurveen

Analytische elektronenmicroscopie

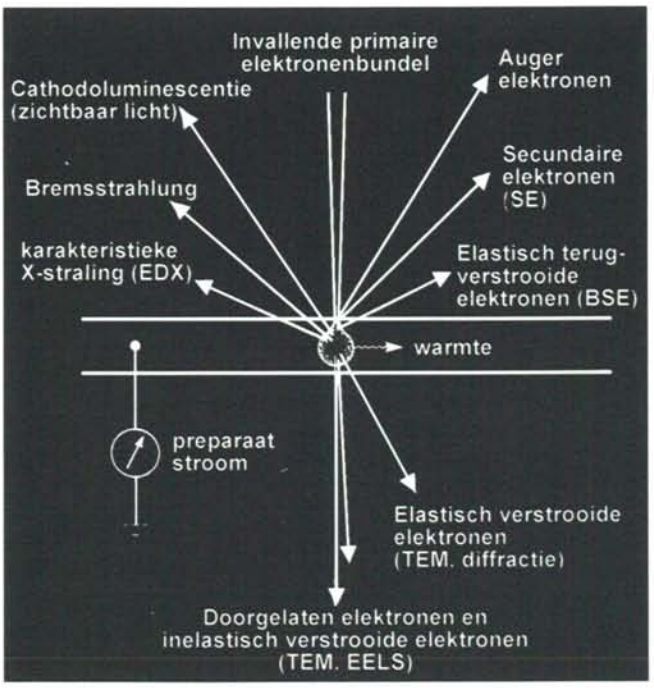
Rico Keim

Een microscoop is een optisch systeem dat een voorwerp vergroot afbeeldt. De geschiedenis van de elektronenmicroscoop begint ruim 50 jaar geleden. Een belangrijke drijfveer voor de ontwikkeling van de elektronenmicroscoop was het verlangen een aantal beperkingen van de gewone lichtmicroscoop te overwinnen. Door gebruik te maken van elektronen met golflengten die veel kleiner zijn dan 0,1 nanometer (nm) zou het mogelijk moeten zijn het ruimtelijk oplossend vermogen (of resolutie) van de lichtmicroscoop, die door de golflengten in het zichtbare gebied beperkt is tot grofweg een halve micrometer, sterk te verbeteren. Dit is inderdaad zo gebleken. Bovendien ging het scherpte-diepte-bereik er belangrijk op vooruit ten opzichte van de lichtmicroscoop bij eenzelfde vergroting. Mede hierdoor zijn twee typen elektronenmicroscopen zeer snel tot ontwikkeling gekomen. Het zijn de Transmissie Elektronen Microscoop (TEM) en de Scanning (= raster) Elektronen Microscoop (SEM).

Met een SEM is het mogelijk de oppervlaktemorfologie van een materiaal te bestuderen, waarvan de afbeeldingen een sterke overeenkomst vertonen met die welke door het oog op het netvlies worden gevormd. Een TEM stelt je daarentegen in staat de inwendige structuur van een dun (vast) preparaat te exploreren waarbij toegang wordt gegeven tot micro- en nanostructuurdetails. Met beide technieken kunnen verschillende typen afbeeldingen worden verkregen.

De TEM en SEM zijn bij modern materiaalkundig onderzoek niet meer weg te denken technieken. Is bij analytische studies de hoogst mogelijke laterale resolutie gewenst dan blijft de TEM over. Naast een structuuranalyse kan in een (transmissie-) elektronenmicroscoop ook een chemische elementanalyse worden uitgevoerd als deze is uitgerust met faciliteiten voor de detectie van karakteristieke deeltjes (röntgenfotonen, elektronen met een specifiek energieverlies) die ontstaan als gevolg van de interactie tussen de primaire elektronen en het te onderzoeken materiaal. Het instituut Centrum voor Materialenonderzoek (CMO) aan de Universiteit Twente is sinds eind 1992 in het bezit van zo'n "analytische" TEM met scanning faciliteiten, die bovendien ook nog de mogelijkheid biedt magnetische domeinen in magnetische materialen zichtbaar te maken (Lorentz microscopie).

Bij elektronenmicroscopie draait alles om de interactie van een invallende primaire bundel elektronen met het preparaat. Figuur 1 toont schematisch de belangrijkste gevolgen van zo'n interactie. Voor een SEM zijn het hoofdzakelijk de Secundaire Elektronen (SE) die van belang zijn voor de beeldvorming. Zoals de figuur al suggereert komen deze SE's voornamelijk uit een gebied nabij het oppervlak van het materiaalpreparaat. Ook de elementspecifieke Auger-elektronen worden uit een dun gebiedje onder het oppervlak (circa 1 tot 3 nm) geëmitteerd. Deze worden slechts zelden in een typische SEM gebruikt, maar des te meer in een toegewijde Scanning Auger Microscoop (SAM). Is het preparaat dun genoeg, elektronentransparant, dan zijn het de zonder afbuiging doorgelaten en elastisch verstrooide elektronen die in een TEM zorg dragen voor beeldvorming. Chemisch analytische informatie kan, zowel in een SEM als TEM, worden verkregen door detectie en analyse van de karakteristieke röntgenstraling. Men spreekt dan van Energy Dispersive X-ray analysis (EDX). Is een TEM tevens uitgerust met een detector voor de doorgelaten inelastisch verstrooide primaire elektronen, dan kan Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS) worden uitgevoerd. In tegenstelling tot EDX is EELS in staat ook de lichte elementen (de tien elementen van waterstof tot neon) met een grote gevoeligheid te detecteren.



Figuur 1. Schematische voorstelling van de belangrijkste gevolgen van de interactie van een elektronenbundel met een materiaalmonster.

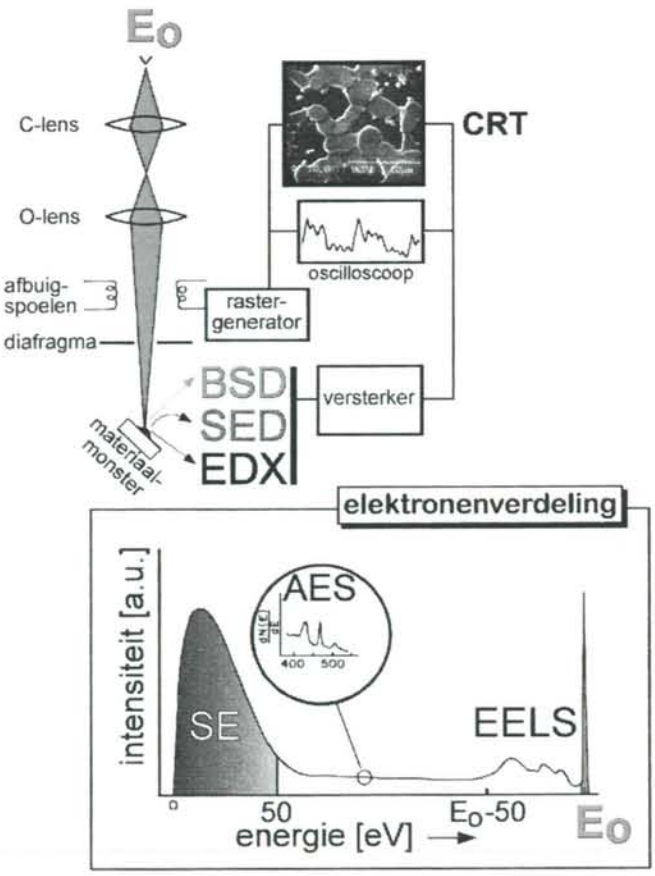
SEM

Beeldvorming

Figuur 2 toont schematisch de belangrijkste componenten van een eenvoudige SEM. In een elektronenbron worden elektronen geproduceerd en versneld door middel van een elektrisch veld, waardoor ze de benodigde kinetische energie (Eo) kunnen krijgen. Deze kan worden ingesteld tussen grofweg 1 en 30 keV en is betrekkelijk laag ten opzichte van typische TEM-energieën (80 - 300 keV). De bron zelf bestaat in het algemeen uit een wolfram-gloeidraad die de elektronen thermionisch emitteert. Voor een hogere elektronenintensiteit wordt meestal gebruik gemaakt van een LaB6 eenkristal met een spitse tip. De allerhoogste helderheid wordt echter pas verkregen wanneer een koude veldemissie elektronenbron (FEG) wordt ingezet. Elektronenemissie vindt hierbij plaats door een mechanisme dat in de quantummechanica bekend staat als het tunnel-effect. Een bijkomend voordeel van een FEG ten opzichte van de thermionische elektronenbron is dat de energiespreiding van de geproduceerde elektronen zeer klein is (0,25 eV voor de FEG, 1 à 2 eV voor de LaB6 en circa 3 eV voor een wolframgloeidraad), waardoor zo'n bron een zeer "schone" monochromatische bundel elektronen kan leveren. Dit is zeer belangrijk als men hoge-resolutie elektronenmicroscopie wil doen, maar ook voor chemisch analytische metingen; in de TEM voor de interpretatie van Electron Energy Loss spectra bijvoorbeeld.

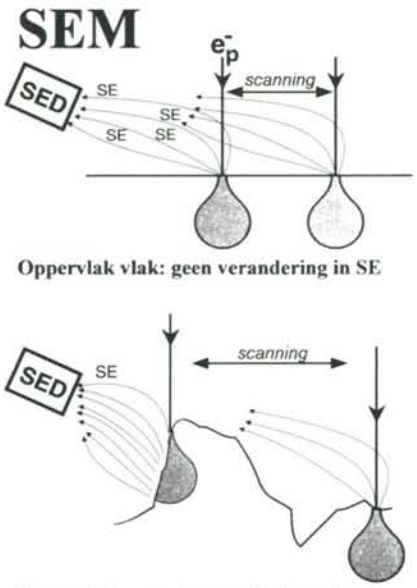
Twee tot drie condensorlenzen worden gebruikt om de diameter van de elektronenbundel te verkleinen. Als deze uiteindelijk het materiaaloppervlak raakt kan een ultieme diameter worden gehaald van wel 1 à 2 nm. Door middel van afbuigspoelen kan met deze fijngefocusseerde elektronenbundel het preparaat punt voor punt worden afgetast, terwijl een Secundaire Elektronen Detector (SED) de laagenergetische secundaire elektronen telt die vanuit elk punt in het materiaaloppervlak worden gemitteerd. Ook kan, als men de beschikking heeft over een daartoe geschikte detector, een ander type elektronen of straling worden geteld. Synchroon met de beweging van de elektronenbundel wordt de stip van een TV monitor, Cathode Ray Tube (CRT), over het scherm verplaatst, terwijl de intensiteit van de stip wordt gemoduleerd door de versterkte stroom van de detector (zie het lijnprofiel op de oscilloscoop). Zowel de primaire elektronenbundel als de CRT-stip worden analoog aan een televisie-ontvanger verplaatst, dat wil zeggen, in een rechthoekige serie lijnen, ook wel raster genoemd. Het vergrotingsmechanisme is heel simpel: de lineaire vergroting is de breedte van de afbeelding op de CRT gedeeld door breedte van het raster op het preparaat.

De energie van de invallende primaire elektronen wordt in het preparaat gedeponeerd, de dissipatie hiervan kan resulteren in een verscheidenheid aan signalen voor analytisch onderzoek, zie figuur 1. Voor een SEM zijn de Secundaire Electronen (SE) van belang. Deze worden door een SED opgevangen en hebben een energie van 0 tot 50 eV en bevinden zich links in het elektronendistributiespectrum (figuur 2, onder). Zo'n spectrum bevat de verdeling van elektronen als functie van hun kinetische energie. Helemaal rechts staat de zogenaamde elastische piek; deze wordt gevormd door de primaire elektronen met energie E_0 die zonder energieverliezen (elastisch verstrooid/gereflecteerd) weer uit het materiaaloppervlak zijn getreden. Analyse van deze elektronen, de Back Scattered (of elastisch terugverstrooide) elektronen (BSE) geeft ook bepaalde informatie over het materiaaloppervlak; hun intensiteit is namelijk evenredig met de atoommassa. Op deze wijze kan men bijvoorbeeld snel inzicht krijgen in de verdeling van "zware" elementen in een lichte matrix. De elastisch terugverstrooide elektronen worden geteld met een Back Scattered electron Detector (BSD). Structuur die bij iets lagere energie (links van de elastische piek) is waar te nemen correspondeert met elektronen die karakteristieke energieverliezen hebben ondergaan tengevolge van elektronische en plasma excitaties. Dit gebied is belangrijk voor EELS. Auger-elektronovergangen manifesteren zich in het algemeen als zeer



Figuur 2. Tekening die de belangrijkste componenten van een scanning-elektronenmicroscoop weergeeft. Het SEM beeld is afkomstig van het oppervlak van een niet aaneengesloten supergeleidende film. Het resultaat van de interactie van de primaire elektronenbundel met het oppervlak van het materiaalmonster is weergegeven in de elektronenverdeling.

Analytische elektronenmicroscopie

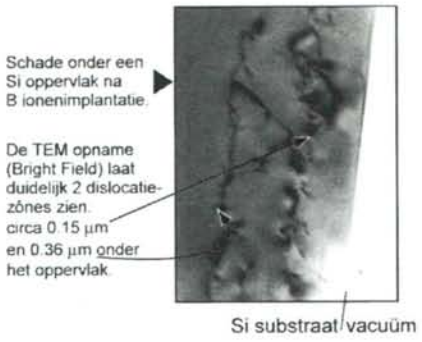


Figuur 3. Als een fijngefocusseerde elektronenbundel het materiaaloppervlak binnentreedt zal door elektronenverstrooiing de bundel sterk verbreden en zal het interactievolume de vorm van een peer aannemen. Secundaire Electronen (SE) komen uit een gebied nabij het oppervlak, uit het bovenste deel van het interactievolume. Ze worden aangetrokken door een SE Detector die op een positieve potentiaal gehouden wordt om zoveel mogelijk secundaire elektronen op te vangen. Als het oppervlak vlak is zal de SE-emissie overal gelijk zijn en zal geen contrast waarneembaar zijn. Bij een ruw oppervlak zal op sommige plaatsen de interactie-peer zodanig worden opengebroken dat SE-emissie uit het lange deel hiervan in het vacuüm optreedt. Op andere plaatsen echter kan door schaduweffecten de SE-emissie worden belemmerd. Op deze wijze ontstaat topografisch contrast.

kleine structuren gesuperponeerd op een hoge achtergrond van secundaire elektronen. Voor de elektronenmicroscopist zijn secundaire elektronen die elektronen met energieën onder de 50 eV (SE). Aangezien hun energie zo laag is kunnen SE's alleen worden gedetecteerd als zij worden gegenereerd nabij het oppervlak. Vandaar dat deze elektronen ook zo gevoelig zijn voor de topografie van het materiaal. Figuur 3 dient ter verduidelijking van een en ander. Tengevolge van de interactie van primaire elektronen met het preparaat worden deze verstrooid en verspreid. Het interactievolume wordt daarbij in het algemeen gekenmerkt door een peervorm (zie ook figuur 1). Omdat de hoogste dichtheid aan SE's door de primaire elektronenbundel wordt gecreëerd voordat significante bundelspreiding optreedt, bieden SE's het hoogste ruimtelijk oplossend vermogen ten opzichte van de andere signalen (figuur 1). SE's bevatten vrijwel geen informatie over de chemische constitutie van het preparaat; hun topografische gevoeligheid en hoge laterale resolutie maakt ze daarentegen uitermate geschikt voor het maken van microscopische afbeeldingen. Het is vooral vanwege hun grote gevoeligheid voor topografische effecten dat SE-afbeeldingen visueel zo gemakkelijk zijn te interpreteren.

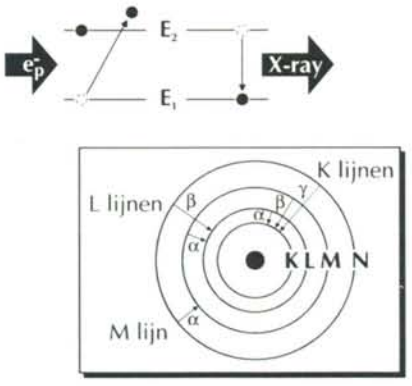
Chemische elementanalyse: EDX

EDX is een analysetechniek die berust op het meten van röntgenstraling (X-ray) die karakteristiek is voor het element in een materiaal wanneer dit door hoogenergetische elektronen wordt bestraald. Het mechanisme is gebaseerd op elektronische overgangen tussen nabij de atoomkern gelegen schillen. In figuur 4 is een en ander schematisch weergegeven: een primair invallend elektron (e_p^-) met voldoende energie (uit de elektronenbron van een SEM bijvoorbeeld) slaat een elektron weg uit een orbitaal met lage energie (E_1). Een elektron uit een schil met een hogergelegen energieniveau (E_2) vult deze vacature op waarbij het energie verliest. De hierbij vrijkomende energie kan als elektromagnetische straling worden uitgezonden met energie E_2 - E_1. Aangezien het energieverschil tussen schillen nabij de atoomkern relatief groot is zal de straling zich als röntgenstraling manifesteren. In een atoom zijn in principe een aantal vacature-opvullende mechanismen mogelijk; hoe zwaarder het atoom des te meer energieniveaus. Als gevolg hiervan zal zelfs een materiaalmonster van puur koper röntgenstraling emitteren bij verschillende energieën. De inzet in figuur 4 laat een sterk vereenvoudigd elektronenniveauschema zien (atoomkern omgeven door elektronenniveaus, voorgesteld als schillen) waarbij verschillende vacature-opvullende elektronische overgangen mogelijk zijn die in een typisch EDX-spectrum zijn waar te nemen. Alhoewel een EDX-spectrum behoorlijk gecompliceerd kan zijn is het principe heel eenvoudig: als de primaire elektronen maar voldoende energie hebben zal elk element in een materiaalmonster een uniek en karakteristiek röntgenspectrum leveren. Verder is in principe het aantal geëmitteerde röntgenfotonen vanuit elk element min of meer direct evenredig met de concentratie van dat element in het materiaalmonster. Met EDX kan dus naast een kwalitatieve analyse ook een kwantitatieve analyse worden uitgevoerd.



EDX

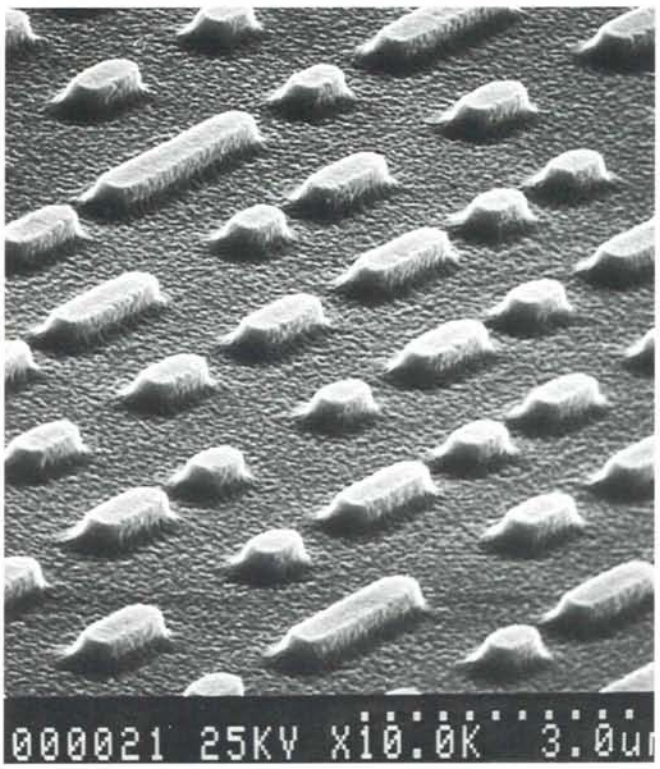
Energy-Dispersive X-ray µ-analysis



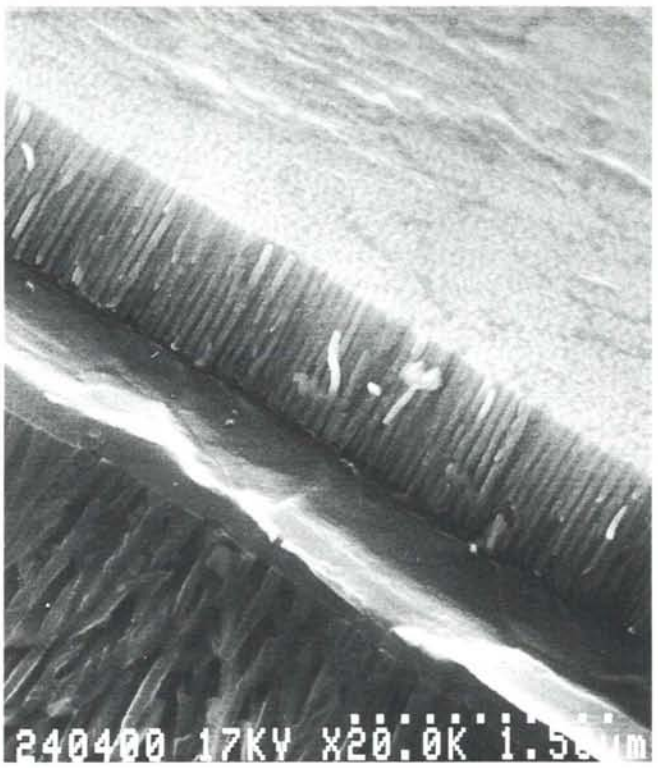
Figuur 4. Het principe van röntgenemissie. In de voorstelling van het klassieke schillenmodel voor de elektronenniveaus om een ronde atoomkern zijn enkele meest voorkomende overgangen in röntgenspectra weergegeven.

Kwantitatieve analyse

- Concentratiebepaling van een element is mogelijk met een nauwkeurigheid van circa 10 %.
- Alle elementen zwaarder dan koolstof. EDX is echter het meest effectief voor elementen zwaar-der dan magnesium.
- Detectielimiet: circa 0,1 atoomprocent voor elementen zwaarder dan Mg.
- Informatiediepte is circa 1 µm; EDX is daarmee geschikt voor bulkanalyses.



Het gebruik van hoge-resolutie SEM heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van de Compact Disc.



'Vertical magnetic recording'. Met de hoge-resolutie SEM zijn magnetische films onderzocht. Deze foto toont de kolomstructuur van een breukvlak. Ophet filmoppervlak zijn tevens dislocatiestructuren te zien.

Chemische informatie

Voorbeelden van toepassingsgebieden waarin EDX unieke informatie over het materiaal levert zijn:
- Krachtig microanalytisch gereedschap in dunne films.
- Elementsegregatie of depletie.

Als de primaire elektronenbundel wordt gefocusseerd, zoals in een SEM bijvoorbeeld, is met EDX een lokale elementanalyse mogelijk. Het door deze elektronen geëxciteerde volume in het materiaaloppervlak – de "peervorm" in figuur 1 en 3 – heeft dimensies die liggen in de orde van een micrometer. Het volume van waaruit de karakteristieke röntgenstraling uit het materiaal kan treden is vrijwel net zo groot als het excitatievolume. Röntgenstraling kan namelijk in een materiaal veel grotere afstanden afleggen dan elektronen, en kan daardoor ook veel dieper vanonder het materiaaloppervlak uittreden, daar waar een aanzienlijke elektronenbundelverbreding heeft plaatsgevonden – het brede stuk van de peervorm. Dit heeft tot gevolg dat het EDX signaal een slecht lateraal oplossend vermogen heeft vergeleken met de secundaire (SE) en elastisch terugverstrooide (BSE) elektronen. Met een SEM is een lokale elementanalyse mogelijk met een laterale resolutie van circa 1 µm.

Preparaten voor onderzoek:

- Metalen
- Halfgeleiders
- Legeringen
- Keramische materialen
- In het algemeen geen organische materialen
- Het materiaaloppervlak moet vlak zijn, bij voorkeur gepolijst, poeders zijn minder geschikt.

Voor een TEM is echter 0,05 µm haalbaar. Deze enorme winst in resolutie heeft mede te maken met het feit dat het materiaalmonster zó dun moet worden gemaakt dat het transparant is voor elektronen. Mede daardoor en door de veel hogere energie van de invallende elektronenbundel zal er nauwelijks bundelverbreding in het monster optreden zodat de röntgenstraling slechts uit het bovenste stuk van de peervorm kan uittreden.

TEM

Beeldvorming

Aangezien veel principes in de elektronenmicroscopie ook gelden voor ieder afbeeldend systeem, is het aantrekkelijk om voor een goed begrip van de elektronenmicroscoop deze concepten te beschrijven in samenhang met de lichtmicroscoop. Veel termen uit de optica kunnen worden gebruikt om de werking van elektronenmicroscopen te illustreren. Een transmissie-elektronenmicroscoop is misschien wel het beste te vergelijken met een diaprojector: de lichtbron (elektronenbron) zendt licht (elektronen) uit, die na collimatie door een condensorlenssysteem – alle lenzen in een TEM in SEM zijn elektromagnetisch – tot een brede en homogene (monochromatische) bundel worden gevormd. Deze bundel doorstraalt vervolgens het dia (dun preparaat van het materiaal) waarna het wordt gefocusseerd door middel van een objectieflens zodat een tussenafbeelding van het dia

(preparaat) wordt gevormd in het vlak waarvan de projectielens de uiteindelijke vergroting op een diaprojectiescherm (fosforscherm, fotofilm of digitale camera) afbeeldt. Figuur 5 toont het optische analogon van een elektronenmicroscoop, het laat de stralengang zien in een projectiemicroscoop met belichting in doorzicht (transmissie). Door middel van het diafragma bij de condensorlens wordt de intensiteit van de lichtbundel ingesteld, met het diafragma bij de objectieflens kan het contrast worden beïnvloed plus, in beperkte mate, het scherpte-dieptebereik. Het meest simpele optische systeem is een enkelvoudige lens of vergrootglas; figuur 6 dient om het concept van brandpuntsafstand (f) en vergroting (M) te illustreren. Uit de klassieke optica volgt dat het voorwerp omgekeerd wordt vergroot tot een beeld met beeldpuntsafstand (b) (tussen lens en beeld) als de voorwerpafstand (v) (tussen lens en voorwerp) een waarde heeft tussen f en 2f. De eigenschappen van zo'n eenvoudig optisch "vergrootglas" kunnen worden samengevat in de welbekende lensvergelijking:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{v}.$$

De vergroting wordt gegeven door:

$$M = \frac{b}{v}.$$

Om aberraties tijdens sterke vergrotingen te beperken wordt in de praktijk vrijwel altijd gebruik gemaakt van combinaties van lenzen, lensgroepen. Zie bijvoorbeeld figuur 5 waar de uiteindelijke vergrote afbeelding plaatsvindt door middel van een combinatie van objectief- en projectielens. Twee van de meest essentiële verschillen tussen licht- en elektronenmicroscopie zijn:

– De golflengte:
Deze is voor elektronen (λ_e) duizenden malen kleiner dan die van licht (λ_l). Voor een typische lichtmicroscoop is $\lambda_l = 400 - 800$ nm, $\lambda_e = 0{,}001 - 0{,}01$ nm.

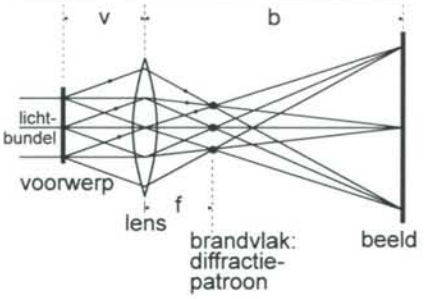
– Interactie met materie:
In tegenstelling tot licht vertonen elektronen een zeer sterke interactie met materie. Elektronen worden dramatisch veel sterker verstrooid door een gas dan door licht. Dit effect is zo sterk dat in een elektronenmicroscoop, dus ook in een SEM, alle "optische" paden geëvacueerd moeten worden tot een druk van maximaal 10^{-2} Pa (liefst beter) – dit is ongeveer gelijk aan 10^{-7} atmosferische druk – om elektronen te kunnen gebruiken.

Structuuranalyse

Toepassingsgebieden

- Oppervlakte- en bulkonderzoek,
- Korrelgrenzen, fasegrenzen,
- Fase-identificatie (TEM),
- Kristallografische oriëntatie (TEM),
- Ruimtelijke verdeling van defecten en magnetische domeinen (TEM),
- Microgelegeerde materialen,
- Microelektronica,
- Complexe nieuwe materialen,
- Metaalmoeheid.

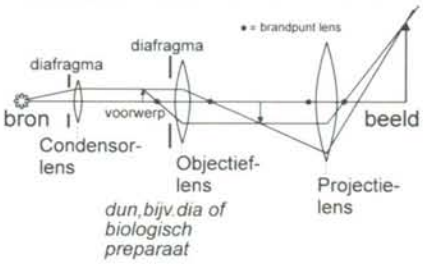
Beeldvorming:



Figuur 6. De stralengang door een enkelvoudige lens met brandpuntsafstand f. Het illustreert de vorming van een beeld uit een voorwerp in transmissie.

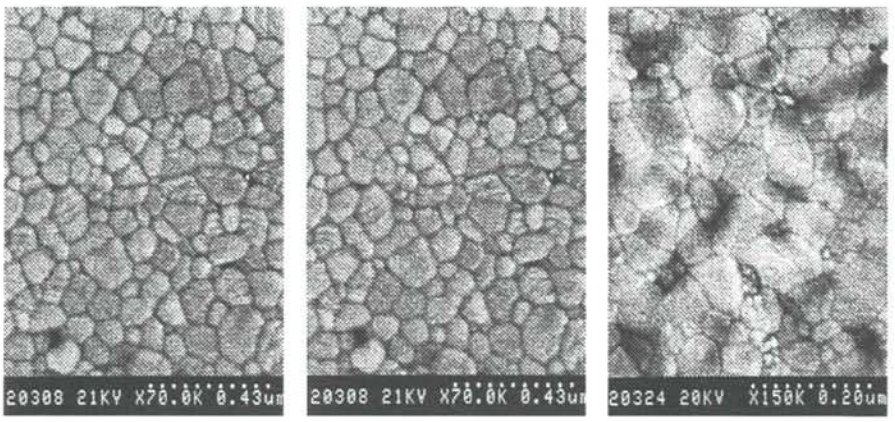
Met een TEM zijn zeer sterke vergrotingen mogelijk zodat details tot op vrijwel atomair niveau kunnen worden waargenomen. Ook is het mogelijk inzicht te krijgen in de kristallografische oriëntatie van een materiaalmonster en in de ruimtelijke verdeling van mogelijke defecten hierin. Figuur 6 laat zien dat er bij beeldvorming ook een plaats is in het optische pad waar alle stralen die evenwijdig met elkaar lopen doorheen gaan: het brandvlak. Op deze plaats, in dit vlak, wordt (altijd) een diffractiepatroon gevormd van het voorwerp voordat het uiteindelijk vergroot wordt afgebeeld. In een typische TEM kan dit patroon via een simpele schakelaar worden afgebeeld in plaats van een vergrote afbeelding van het preparaat. Uit een analyse van de ruimtelijke en intensiteitsverdeling van de verstrooide elektronen (zie ook figuur 1), het elektronendiffractiepatroon, kan informatie betreffende de groepering van de atomen in het materiaalmonster worden verkregen, een structuuranalyse.

Beeldvorming:

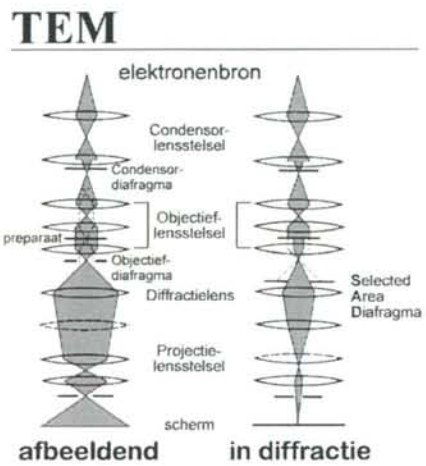


elektronisch analogon: Transmissie EM

Figuur 5. Het optische systeem voor een projectiemicroscoop met belichting in doorzicht (transmissie); het voorwerp wordt in twee stappen vergroot tot de uiteindelijke afbeelding.



Fijnkorrelige keramische materialen en diverse katalysatoren worden in onze Hitachi FEG-SEM bestudeerd.



Figuur 7. Een TEM in afbeeldingsmodus (links); de projectielenzen staan ingesteld zodat zij een vergroting maken van het tussenbeeld na de objectieflens. Rechts staat een TEM in diffractieconditie; de projectorlenzen staan ingesteld om een afbeelding te maken van het diffractiepatroon in het brandvlak van de objectieflens. Met het Selected Area Diafragma kan een deel van het preparaat worden geselecteerd voor (kristal-) structuuranalyse.

Figuur 7 toont schematisch de verschillen in "stralen-gang" tussen de twee TEM-modi: afbeeldend (links) en in diffractie (rechts). Een eenvoudig experimenteel voorbeeld is weergegeven in figuur 8. Het toont aan de linkerkant een TEM-opname (fasecontrast) van een dwarsdoorsnede van een siliciumsubstraat waarop een siliciumoxydefilm is aangebracht. Wanneer de TEM nu wordt omgeschakeld naar de DIFFRACTIE-modus (figuur 7, rechts) dan geeft het diffractiepatroon aan dat de film amorf (vormloos) is; het toont een serie diffuse ringen. Uit het scherpe en geordende diffractiepatroon van het substraat kan echter worden geconcludeerd dat dit monokristallijn is. In de praktijk zijn er veel "tussen"-gevallen: een materiaal kan fijn of grof polykristallijn zijn, het kan amorfe fasen bevatten in een anders kristallijn rooster of omgekeerd, enzovoorts.

De hoeveelheid informatie die met een TEM uit een preparaat is te destilleren is enorm. Bij de beeldvorming in een TEM kunnen verschillende contrastmechanismen een rol spelen. De volgende vier soorten contrast kunnen elk in meerdere of mindere mate manifest zijn:
- massa-dikte,
- diffractie,
- fase,
- magnetisch.

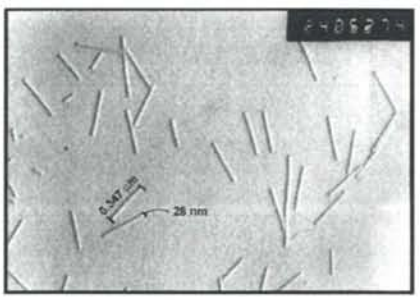
Hierbij kunnen de eerste drie vormen van contrast gelijktijdig worden waargenomen. Lorentz Microscopie (LM) moet worden toegepast om magnetisch contrast in magnetische materialen zichtbaar te maken. Het principe van LM is simpel; wanneer de elektronenbundel door zo'n preparaat gaat zal het door de hierin aanwezige magnetische domeinen door de Lorentz-kracht worden afgebogen in een richting die afhangt van de magnetisatierichting. Liggen deze domeinen nu om en om, dan zal de elektronenbundel alternerend worden afgebogen en bestaat de mogelijkheid dat bepaalde doorgelaten en afgebogen elektronenbundels elkaar versterken of juist uitdoven. Hierdoor ontstaat op het beeldscherm een interferentiepatroon met intensiteitsfluctuaties. Belangrijk hierbij is dat het magnetisch preparaat in een veldvrije ruimte wordt geplaatst. Dit is onder normale omstandigheden beslist niet het geval. In figuur 7 kan men zien dat het preparaat als het ware tussen twee delen van de symmetrische objectieflens zit. Om nu toch LM te kunnen doen moet dit gebied veldvrij gemaakt worden. Philips heeft dit probleem opgelost door de objectieflens helemaal uit te schakelen en een extra, maar asymmetrische objectieflens onder de originele lenscombinatie te plaatsen. Hierdoor neemt de kwaliteit van het beeld iets af, de resolutie wordt minder (circa 2 - 4 nm lateraal) en de diverse aberratiecomponenten zijn slechter.

Chemische elementanalyse: EDX en EELS

EELS

EELS is een analytische techniek die de elektronische excitaties van een materiaalmonster onderzoekt door het primaire inelastisch verstrooide signaal te meten in een TEM. Vergeleken met EDX is EELS buitengewoon gevoelig voor de lichte elementen.

Het spectrum met excitaties bevat onder meer informatie over:
- elementverdeling,
- chemische bindingstoestand,
- bandenstructuur,
- elektronentoestandsdichtheid.

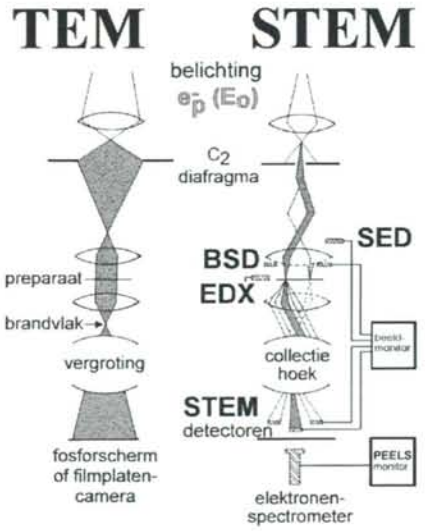


Een bepaald tabaksvirus, tot in detail uitvergroot in een transmissieelektronenmicroscoop.

Figuur 8. TEM-opname van een dwarsdoorsnede van het grensvlakgebied van siliciumsubstraat met siliciumoxydefilm. De TEM-opname is onder optimale fasecontrastcondities gemaakt. Fasecontrast ontstaat wanneer elektronen met een onderling verschil in fase door een objectiefdiafragma worden doorgelaten; in het algemeen worden twee of meer gediffracteerde elektronenbundels door dit diafragma doorgelaten om met elkaar te interfereren.

Evenals in de SEM kan ook een TEM worden uitgevoerd met faciliteiten voor EDX, BSD, en SED. In een TEM kan bovendien een spectrometer voor EELS worden toegevoegd. In het algemeen worden hoge-kwaliteits TEM afbeeldingen met een homogene, parallelle (en een zo coherent mogelijke) elektronenbundel gemaakt die een relatief grote diameter heeft. Moderne TEM's zijn echter in staat om deze bundel dusdanig klein te maken, in de orde van 1 à 2 nm, dat een lokale elementanalyse mogelijk is. Maar deze bundel is statisch, dat wil zeggen dat deze zonder handmatige ingreep door de microscopist niet verplaatsbaar is. Meer flexibiliteit wordt verkregen als een TEM, net als een SEM, wordt uitgerust

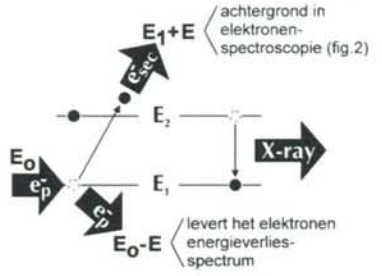
met afbuigspoelen waarmee de fijngefocusseerde bundel over het preparaat te rasteren is. Op deze wijze ontstaat de Scanning TEM (STEM). Figuur 9 (rechts) toont een schematische voorstelling van een TEM met scanning-faciliteiten. Ter vergelijking is links in de figuur een TEM met een klassieke opbouw getekend. Beeldvorming in de STEM modus geschiedt serieel, dat wil zeggen dat het beeld punt voor punt wordt opgetekend. Dit in tegenstelling



Figuur 9. De "stralengang" in een Scanning TEM vergeleken met die in een klassieke TEM.

EELS

Electron Energy Loss Spectroscopy



Figuur 10. Het basisprincipe van Electron Energy Loss Spectroscopy.

tot tot de normale TEM-modus waar beeldvorming parallel is. Met een STEM kan bijvoorbeeld de verdeling van een bepaald element in het preparaat eenvoudig in kaart worden gebracht door detectie van de elementspecifieke röntgenstraling (EDX) of primaire elektronen die een discrete energie hebben verloren (EELS) tengevolge van interactie met de atomen in het materiaalmonster. Het principe van EELS is het beste uit te leggen aan de hand van figuur 10: een invallend primair elektron e^-_p met energie E_0 slaat een elektron uit een energieniveau waar het gebonden is met energie E_1. Dit elektron wordt vervolgens uit het materiaaloppervlak geëmitteerd met een energie $E_1 + E_0$. Dit elektron, e^-_{sec}, draagt in het algemeen geen karakteristieke informatie in zich maar draagt wel bij aan de typische achtergrond in een elektronendistributiespectrum, (zie figuur 2, onder). Het uittredende primaire elektron daarentegen heeft een specifieke hoeveelheid energie verloren om het atoom te ioniseren, E_1. Door nu het gehele traject E_0 - E te meten kunnen in een spectrum ionisatie- (en excitatie-) kanten worden gemeten die specifiek zijn voor de elementen in kwestie, bijvoorbeeld ook E_2 in dit voorbeeld (figuur 10). Het EELS-signaal is interessant daar het energieverlies van elk elektron dat door het preparaat is gepasseerd, kan worden gemeten. Dit houdt in dat elke excitatie kan worden gedetecteerd, ongeacht het feit of het geëxciteerde atoom leidt tot de emissie van een röntgenfoton (zie figuur 10) of een ander vervolgproces. Verder kan EELS uitstekend als een aanvullende techniek van EDX gebruikt worden vanwege een veel betere detectie van met name de lichte elementen. Onder gunstige omstandigheden kan voor deze elementen een detectielimiet worden bereikt van 50 tot 100 ppm.

Preparaten voor onderzoek

- Alle materialen in vaste toestand.
- Anorganische, organische, biologische.

Samenvatting

Gezegd kan worden dat een transmissie-elektronenmicroscoop met scanning mogelijkheid met recht analytisch kan worden genoemd als deze naast EDX ook de beschikking heeft over een Electron Energy Loss Spectroscopy faciliteit. EELS is een voorziening voor een betere detectie van met name de lichte elementen. Daarnaast bevat het EELS-spectrum een rijkdom aan extra informatie, waarmee het mogelijk is een materiaal tot in detail te karakteriseren. In een TEM kan een veel hoger ruimtelijk oplossend vermogen voor chemische analyses worden gehaald dan in een SEM. In een (S)TEM zijn resoluties mogelijk van circa 50 nm voor EDX en 2 tot 5 nm voor EELS.

Literatuur

[1] P.J. Goodhew and F.J. Humphreys; Electron Microscopy and Analysis, Taylor and Francis, London, 1992.
[2] D. Chescoe and P.J. Goodhew; The operation of transmission and scanning electron microscopes, Oxford University Press, Oxford, 1990.
[3] D. Joy, A.D. Romig, Jr, and J.I. Goldstein; Principles of analytical electron microscopy, Plenum Press, New York, 1986.
[4] A.G. Jackson, Handbook of Crystallography, Springer-Verlag, New York, 1991.
[5] R.F. Egerton, Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope, Plenum Press, New York, 1989, 2nd Ed.
[6] Kevex Instruments Inc., San Carlos, California; Energy-Dispersive X-ray Microanalysis, an introduction, 1989.

Auteursnoot

Dr. Enrico G. Keim is medewerker van het Centraal Laboratorium van het instituut Centrum voor Materialenonderzoek (CMO) aan de Universiteit Twente in Twente.
In het Centraal Laboratorium staan ondermeer een 300 kV PHILIPS CM30/Twin (S)TEM, uitgerust met EDX, (P)EELS, BSD en Lorentz Microscopie, een hoge-resolutie FEG-SEM (Hitachi), een PHI-600 Scanning Auger Microscoop en een KRATOS-XSAM spectrometer voor XPS.

Een longdistance microscoop van Nederlands fabrikaat

R. ter Horst, B. Postema, H. Rutten

In twee eerdere afleveringen van Mikroniek werden de Schmidt-optiek en het optische werkingsprincipe van een longdistance microscoop besproken. Daaruit werd duidelijk dat met deze configuratie een zeer hoge optische kwaliteit mogelijk is.
In dit artikel zullen de mechanische opbouw en de fabricagemethode aan de orde komen. Oorspronkelijk is deze longdistance microscoop een catadioptrische (een optisch ontwerp met lenzen en spiegels) telescoop voor astronomische waarneming. Door deze te ontwerpen voor een korte, eindige, werkafstand ontstaat de longdistance microscoop.

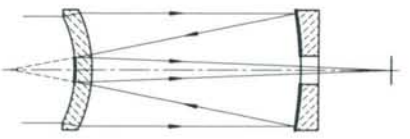
Een longdistance microscoop bestaat uit een optisch systeem dat zorgt voor de beeldvorming en een mechanisch systeem om de optische elementen te ondersteunen en toegankelijk te maken voor apparatuur die waarneming mogelijk maakt. Om een goed werkend instrument te verkrijgen dienen de optische componenten met hoge nauwkeurigheid vervaardigd te worden. Ook dient de vormgeving van de mechanische componenten zodanig te zijn dat de optische elementen met zo min mogelijk spanningen gemonteerd worden, gedurende het gebruik centrisch blijven, geen ongewenst licht reflecteren, gemakkelijk gefocusseerd kan worden, additionele apparatuur gemakkelijk bevestigd kan worden, etc.

Opbouw van het systeem

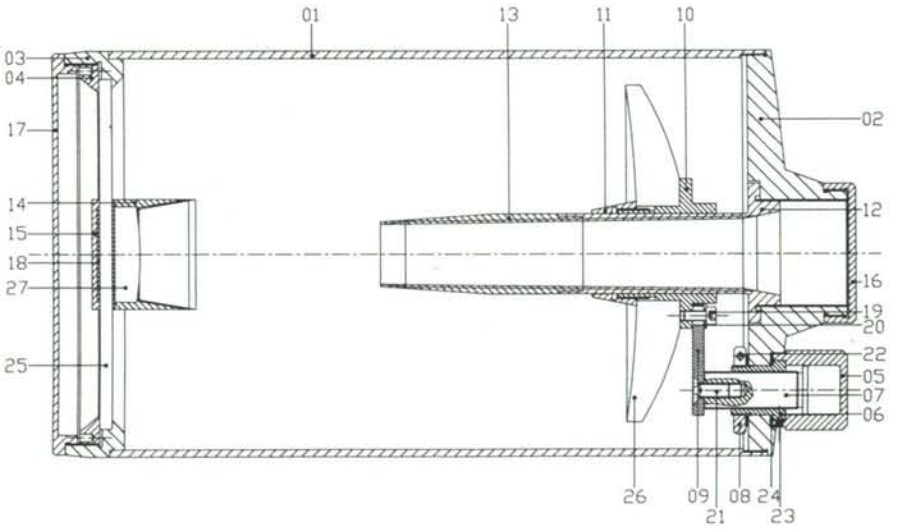
De hier beschreven longdistance microscoop heeft een opening van 130 mm en heeft voor de afstand "oneindig" als telescoop een brandpuntsafstand van 1500 mm. Systemen voor kortere waarnemingsafstand (= de afstand van longdistance microscoop tot het object) hebben een kortere brandpuntsafstand. Bij een longdistance microscoop wordt de waarnemingsafstand waarvoor een instrument is ontworpen de werkafstand genoemd. Er zijn, naast de uitvoering als telescoop, vier standaardsystemen. De werkafstanden hiervan zijn 550, 1000, 2000 of 5000 mm. In principe kan voor elke gewenste werkafstand groter dan 400 mm een speciaal ontwerp vervaardigd worden. Alle microscopen hebben bij de werkafstand een buigingbegrensde (zie Mikroniek (1994)2) afbeelding met een diameter van tenminste 15 mm in het focale vlak.

In figuur 1 is een doorsnede gegeven van het instrument. Grofweg kan de opbouw gesplitst worden in de volgende groepen:
optisch systeem,
tubusconstructie,
focusseerinrichting,
baffle-systeem,
additionele apparatuur.

Zoals reeds in de inleiding werd gesteld is de basis van de longdistance microscoop een telescoop. Het is niet de eerste keer dat dit gedaan wordt. Er is een amerikaans fabrikaat dat deze methode ook praktiseert, echter geen gebruik maakt van een Schmidt- optiek maar van het zogenaamde Gregory-Maksutov- systeem; zie figuur 2. Dat is een meniscus- lens-spiegel systeem met uitsluitend sferische vlakken. Hierbij is in het systeem een optisch vlak gemeenschappelijk: de holle zijde van de meniscuslens is gedeeltelijk verspiegeld en wordt zo als secundaire spiegel in het systeem gebruikt. Deze gemeenschappelijkheid lijkt wel handig maar geeft tevens een zeer sterke ontwerpbeperking. Slechts onder zeer bijzondere omstandigheden zijn er optische oplossingen mogelijk die een goede afbeeldingskwaliteit leveren. Het zou te ver voeren deze hier te behandelen. Een uitgebreide verhandeling is te lezen in het boek Telescope Optics, zie [1].



Figuur 2. De optische opbouw van een Gregory-Maksutov telescoop. Deze optische opbouw is ook, zij het met beperkingen, geschikt voor een longdistance microscoop.



Figuur 1. Doorsnede van de 130 mm longdistance microscoop. Enkele belangrijke onderdelen zijn: pos 25: de Schmidt-lens, pos 26: de sferische primaire spiegel, pos 27: de asferische secundaire spiegel, pos 6 tot en met pos 9: het focusseersysteem, pos 12: de primaire baffle, pos 14: de secundaire baffle, pos 10 tot en met 12: het geleidesysteem voor de primaire spiegel, pos 01: de tubus.

Een longdistance microscoop van Nederlands fabrikaat

Een ander nadeel met betrekking tot de kwaliteit is, dat bij een meniscus-ontwerp de kromtestralen van de diep doorgebogen lens speciale en nauwkeurige verhoudingen moeten hebben met de dikte en de brekingsindex van het optische glas waaruit deze is vervaardigd. Dit is niet alleen een zeer kritisch fabricage-aspect dat verre van gemakkelijk is, maar ook weer een beperking inhoudt voor het opheffen van afbeeldingsfouten. Dit is dus ook weer een ontwerpbeperking. Het toeval wil dat er een zeer klein aantal oplossingen bestaat waarbij beide beperkingen gemeenschappelijk kunnen worden toegepast. Helaas geeft dit wel een ontwerp dat een compromis is tussen bereikbare afbeeldingskwaliteit, aantal optische elementen c.q. optisch werkzame vlakken, de bouwgrootte en de werkafstand.

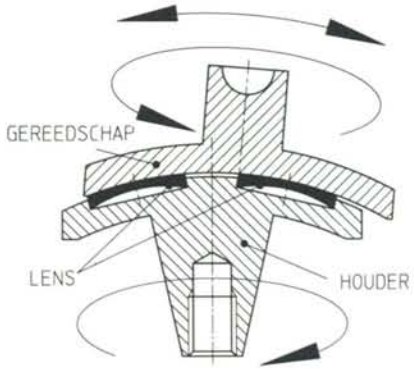
Een Schmidt-optiek heeft geen gemeenschappelijke vlakken. Het aantal beperkingen voor toepassing van de Schmidt-optiek wordt daarom niet begrensd door optische wetmatigheden maar door technische fabricagemogelijkheden. Daardoor zijn er meer constructieve vrijheden beschikbaar die kunnen resulteren in een hogere bereikbare optische kwaliteit dan bij het Gregory- Maksutov-systeem.
Nagenoeg ongeacht de dikte – de dikte wordt beperkt door de benodigde doorbuiging die nodig is in het produktieproces – van de Schmidt-lens kan elke willekeurig gewenste Schmidt-vorm gegenereerd worden. Dat alles maakt het ontwerp van een longdistance microscoop op basis van een Schmidt-optiek in ontwerp-technische zin zeer flexibel, terwijl er geen extra nadelige invloeden hoeven te zijn ten aanzien van de fabricage.

Het optisch systeem

Het optisch systeem bestaat uit drie elementen. Dit zijn, optisch gezien, drie totaal verschillende oppervlakken. De elementen zijn:
- een Schmidt-lens,
- een holle sferische spiegel,
- een bolle asferische spiegel.

Deze zijn uitgebreid besproken in het vorige artikel in Mikroniek.

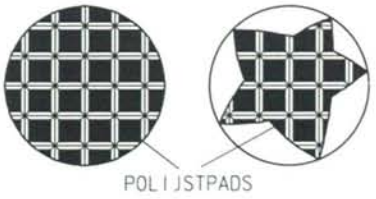
In normale optische systemen worden uitsluitend sferische (= bolvormige) oppervlakken toegepast. Deze kunnen op eenvoudige wijze conventioneel met zeer hoge nauwkeurigheid vervaardigd worden. Zijn de afmetingen gering, dan kan een aantal componenten op een gereedschap tegelijk bewerkt worden, zie figuur 3. Dit kan omdat een bol op elke willekeurige plaats een rotatie-symmetrie bezit ten opzichte van het middelpunt.
Anders ligt het bij niet-sferische vlakken. Deze bezitten slechts een as van symmetrie: de optische as. Asferen kunnen om deze reden uitsluitend als enkelstuk gefabriceerd worden. Dat maakt deze componenten nogal bewerkelijk en daarom duur. Daar tegenover staat dat de bereikbare optische kwaliteit van een daarop gebaseerd systeem zeer hoog is.Of het de moeite waard is hangt er dus van af hoe goed men in staat is deze oppervlakken te vervaardigen. Voor Opticon is dat geen enkel probleem. Opticon heeft zich vanaf de start niet alleen gespecialiseerd in het vervaardigen van hoogwaardige platte en sferische maar vooral ook asferische vlakken voor afbeeldende optische systemen. Typische voorbeelden hiervan zijn astronomische telescopen. Hierbij worden eisen gesteld aan de oppervlaktenauwkeurigheden van 1/20 golflengte van het licht (0,000028 mm) bij een diameter van bijvoorbeeld 400 mm of nog meer.
De bolle asferische spiegel in het Schmidt- Cassegrain-systeem is de omwentelingsfiguur van een ellips: een ellipsoïde. Ten opzichte van een sfeer heeft een ellipsoïde, die zijn beide brandpunten op de optische as heeft, aan de rand een andere kromming dan op de top. De afwijking ten opzichte van de sfeer is uitermate gering: slechts delen van een micrometer.
De theoretische vorm moet binnen zeer enge toleranties worden vervaardigd: de bovengenoemde 1/20 van de golflengte van het licht. Om dit te bereiken dienen bijzondere polijsttechnieken toegepast worden.
De afwijking ten opzichte van de zuivere sfeer is zo gering dat deze erin gepolijst kan worden. Allereerst wordt een zuiver sfeer vervaardigd, die vervolgens met speciaal polijstgereedschap wordt omgevormd tot de gewenste ellipsoïde.
Dit polijsten gebeurt op een zogenaamde pekbodem. De superfijngeslepen sferische vorm wordt op een pekbodem geperst en vervolgens gepolijst. In figuur 3 is dan het slijpgereedschap vervangen door een polijst gereedschap. Bij sferische vlakken heeft de pekbodem een vrij gesloten structuur omdat op elke plek evenveel gepolijst moet worden. Bij de fabricage van de ellipsoïde wijkt de vorm sterk af. Beide vormen zijn weergegeven in figuur 4. De merkwaardige vorm dient ervoor om de vorm van de ellipsoïde zo strak mogelijk te maken. Zou deze gerimpeld zijn, ook al zijn het nanometers, dan zou dit onmiddellijk zichtbaar worden in het contrast van de afbeelding. De contrastvermindering wordt veroorzaakt doordat het licht enigszins verstrooit op de "ribbels".



Figuur 3. De conventionele techniek voor het vervaardigen van zuiver sferische vlakken. De houder roteert terwijl het gereedschap heen en weer beweegt. Door de beweging over het hart krijgt het gereedschap automatisch een eigen rotatie.
Bij de vervaardiging van holle oppervlakken zijn de plaats van het gereedschap en de houder met elkaar verwisseld. Het bolvlak zit altijd beneden.

De Schmidt-lens

De fabricage van de Schmidt-lens is eveneens geen sinecure. De hoogte van het merkwaardig profiel is slechts en-

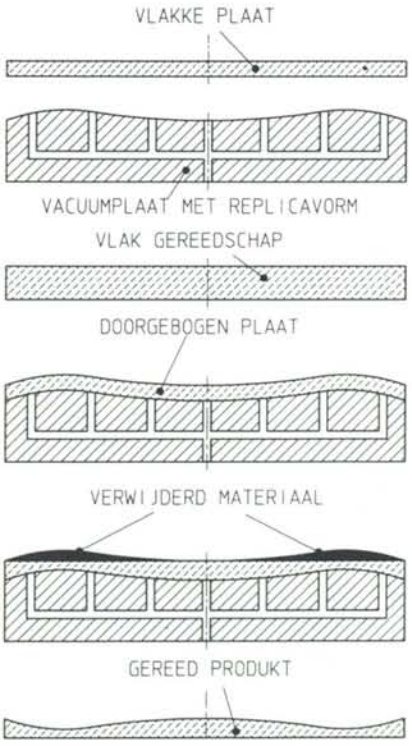


Figuur 4. Uitvoering van polijstgereedschappen door middel van pads voor de vervaardiging van sferische vlakken (links) en asferische vlakken (rechts).

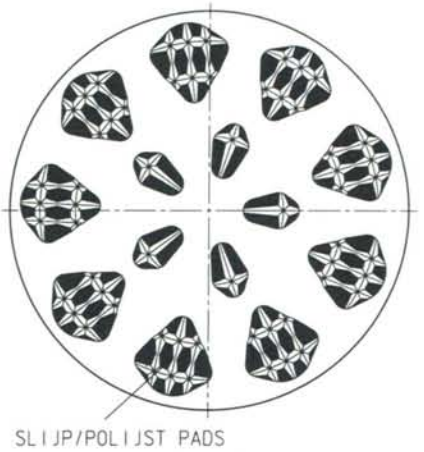
kele tientallen micrometers en die vorm dient binnen enkele tientallen nanometers aangehouden te worden. Het vervaardigen van de Schmidt-lens is op veel manieren mogelijk. De manier die de uitvinder, Bernard Schmidt, toepaste is beschreven in Mikroniek (1994)2. Deze methode is echter veel minder geschikt als de Schmidt-lenzen "klein" zijn en een "korte" produktietijd gewenst is. De moeilijkheid bij kleine afmetingen is dat de lens relatief stijf wordt. Om dan de benodigde doorbuiging te krijgen is een hoge onderdruk nodig. Dat is echter minder het probleem want de dikte is geen optische parameter. Het enige waar rekening mee dient rekening te worden te houden is dat de vacuümkamer voldoende stijfheid bezit opdat deze niet asymmetrisch vervormt. Het probleem bij de grote doorbuiging van de relatief dikke plaat zijn de mechanische spanningen die in het glas optreden. Bij een diameter van 130 mm en een dikte van 4 mm zitten deze gevaarlijk dicht in de buurt van de breuksterkte van het glas. Deze breuksterkte is bij de onbewerkte glasplaat vele malen hoger dan bij de glasplaat die in bewerking is. Oorzaak is het oneindig hoge aantal minuscule krasjes en putjes in het oppervlak ten gevolge van de slijpbewerking.

Dit werd ook onderkend door een amerikaanse fabrikant die vrij grote Schmidt-Cassegrain- telescopen vervaardigt. Deze bedient de amateur markt. Daardoor is het een consumentenartikel geworden, hetgeen betekent dat de Schmidt-lenzen in zeer grote aantallen vervaardigd moeten worden. Hij bedacht een replicatechniek – waarop hij twee US- octrooien verwierf – waarbij een zeer dunne glasplaat op een matrijs wordt aangezogen. De vorm van deze replica is tegengesteld aan die van de Schmidt-lens en komt overeen met het materiaal dat van de glasplaat verwijderd dient te worden. Het voordeel van deze techniek is dat de stijfheid bij de bewerking zeer groot is. De krachten die bij deze bewerking kunnen worden toegelaten mogen zeer groot zijn, waardoor met zeer hoge slijpsnelheden gewerkt kan worden. Toch kleven aan deze methode enkele nadelen. De twee belangrijkste zijn dat het gevaar voor thermische spanningen erg groot is als de bewerkingssnelheid te hoog is. Dit uit zich vaak in een niet strak oppervlak. Een ander, veel hinderlijker nadeel, is dat de replicamal perfect schoon moet zijn. Het kleinste stofdeeltje op de mal zorgt ervoor dat de glasplaat anders aanligt als volgens de theorie. Dit heeft tot gevolg dat de Schmidt-lens zeer lokaal niet aan de gestelde eisen voldoet. Dit heeft grote gevolgen voor de afbeeldingskwaliteit. Deze methode is weergegeven in figuur 5.

Een andere methode is die waarbij de vorm rechtstreeks in een vlakke gepolijste glasplaat wordt aangebracht. Daartoe wordt met een speciaal polijstgereedschap gewerkt. Dit is zodanig uitgevoerd dat de capaciteit tot afname van materiaal varieert en overeenkomt met de diepte die nodig is in de Schmidt-lens. Omdat bij het gebruik van dit gereedschap altijd een beweging op de plaat gemaakt wordt, zal een nauwkeurige vorm moeilijk realiseerbaar zijn. Dit lukt slechts met veel geduld en voortdurende aanpassing van het gereedschap. Een voorbeeld van zo'n gereedschap toont figuur 6.



Figuur 5. De fabricage van een Schmidt-lens door middel van een replicatechniek. Deze methode is geoctrooieerd (zie [4,5]).



Figuur 6. Een speciaal gereedschap voor het rechtstreeks polijsten van een Schmidt-vorm in een vlakke plaat.

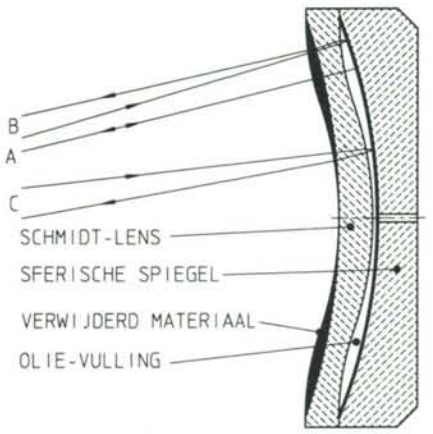
Bij hoogwaardige telescopen en microscopen zijn niet-strakke vormen van de Schmidt-lens niet toelaatbaar. Vandaar dat Opticon zocht naar een eigen fabricagemethode die het mogelijk maakt de Schmidt-lens nauwkeurig te maken en vooral tijdens het fabricageproces te kunnen controleren. De methode die toegepast wordt lijkt veel op de methode van Schmidt. In plaats van een metalen vacuümkamer wordt een holle zuiver sferische spiegel gebruikt. Deze is vervaardigd van bijvoorbeeld Zerodur, een glaskeramiek die in het temperatuurgebied rond 20 °C volledig maatvast is bij temperatuurwisselingen. De ruimte tussen de toekomstige Schmidt-lens en de spiegel wordt gevuld met een ontgaste vacuümolie (diffusie-olie). Deze olie is helder transparant. Door de bolvorm is de rand van de sferische spiegel exact rond. Vervolgens wordt de nog vlakke, binnen 0,00005 (1/10 golflengte), glasplaat op deze spiegel gelegd. Als alle lucht is ontweken, wordt met een plunjertje een weinig olie afgezogen. Dit gebeurt met een soort differentiaalpompje om met een grote slag een zeer klein volume te kunnen afzuigen. Wanneer de gewenste doorbuiging gerealiseerd is wordt het kanaal afgesloten. Aangezien een vloeistof niet samendrukbaar is, is nu een stijf werkvlak beschikbaar. Dit alles gebeurt bij een nauwkeurig gestabiliseerde temperatuur. De methode is weergegeven in figuur 7.
Vervolgens wordt, zoals bij de methode van Schmidt, een sfeer in de doorgebogen plaat geslepen en gepolijst. De

Een longdistance microscoop van Nederlands fabrikaat

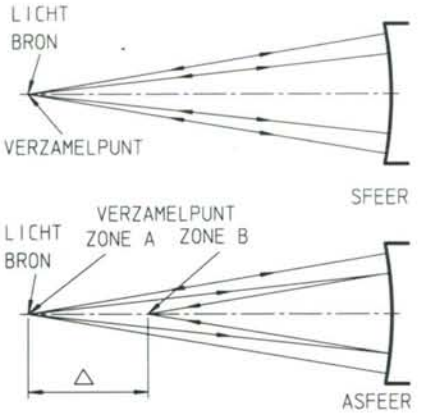
exacte vorm kan tijdens het proces gemeten worden door middel van een zogenaamde Foucaultproef. Hierbij wordt in het kromtemiddelpunt van de spiegel een zeer kleine (ca. 0,1 mm) felle lichtbron gebracht en vervolgens gekeken waar de verschillende zones van de lens- spiegelcombinatie een afbeelding van deze lichtbron maken. Aan de hand van deze liggingen kan exact berekend worden wat de vorm van het oppervlak is. Het principe van deze eenvoudige proef is afgebeeld in figuur 8.
In figuur 7 is de gang van drie lichtstralen schematisch weergegeven en hoe deze zich gedragen op drie verschillende plaatsen aan de Schmidt-lens.
Is de eindvorm bereikt, dan wordt de opstelling weer "belucht" en kan de Schmidt- lens er afgehaald worden, die nu gereed is voor de verdere behandelingen. Dit zijn het zorgvuldig schoonmaken en het aanbrengen van een meerlaags antireflexi-coating.

De tubus

De optische elementen zijn ondergebracht in een tubus. Deze buis heeft een aanmerkelijk grotere diameter dan de vrije opening van het instrument, namelijk 160 mm. Dit heeft een aantal bijzondere redenen. Een daarvan is het gemakkelijker onderdrukken van interne reflecties, maar daarover later meer. Een andere belangrijke reden zijn de thermische effecten. Zoals eerder in dit artikel was te lezen is deze longdistance microscoop afgeleid van een teles-



Figuur 7. Het procédé dat Opticon toepast bij het vervaardigen van de Schmidt-lens. De lichtstralen A, B en C zijn enkele van de vele lichtstralen waarmee met behulp van een Foucault-proef (zie tekst) de vorm exact kan worden bepaald.

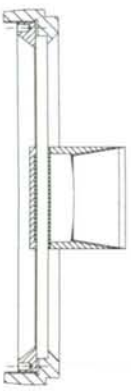


Figuur 8. Het principe van de Foucault-proef. Bij een sfeer hebben alle plaatsen op het oppervlak hetzelfde verzamelpunt als de lichtbron in het kromtemiddelpunt staat: het kromtemiddelpunt zelf. Bij een asfeer is dat niet het geval. Het onderlinge verschil van deze plaatsen is een maat voor de helling van het oppervlak op die plaats. Verschillende meetwaarden kunnen worden omgerekend naar de vorm van het oppervlak.

coop. Bij gebruik van een telescoop is toepassing, in tegenstelling tot een microscoop, veelal een buitenshuis gebeuren. Daarbij komt nog dat de helderste nachten in de winter voorkomen en het dan meestal erg koud is. De waarnemer straalt echter warmte uit. Deze wordt door de telescoop opgenomen via de tubus die dus warmer, eigenlijk is "minder koud" beter, wordt. Door de opwarming van deze buis ontstaan vooral aan de binnenzijde van de tubus luchtstromingen die verschillen in de brekingsindex van de lucht geven. Dit fenomeen kan in extreme vorm 's zomers gezien worden boven een heet wegdek. Daar is de lucht heftig in beweging hetgeen geconstateerd kan worden aan sterk trillende beelden. Waar deze laag gaat reflecteren hebben zich extreme situaties ontwikkeld en lijkt het alsof er water op het wegdek staat.
Zo erg zal het in een telescoop niet worden. Maar gezien de zeer hoge kwaliteitseisen – het scheidend vermogen van zo'n instrument is veel beter dan 1" (hoekseconde) – is voorstelbaar dat de invloed van thermische effecten zeer snel zichtbaar wordt. Veelal treden de snelle luchtstromingen op tot ongeveer 10 mm vanaf de tubuswand.

Voor de Schmidt-lens wordt een vatting toegepast die normaal gebruikelijk is. De secundaire spiegel is rechtstreeks op deze Schmidt-lens bevestigd, zie figuur 9. De bevestiging geschiedt met een speciale dubbelzijdige tape. Voordat de bolle spiegel gemonteerd kan worden is de achterkant hiervan zodanig vlak geslepen dat de optische as loodrecht op dit vlak staat. In een speciale inrichting worden de Schmidt-lens en de bolle spiegel nauwkeurig gecentreerd. Hierbij wordt gelet op de optische centrering, dus dat de optische as van de bolle spiegel samenvalt met die van de Schmidt-lens. Dit kan op een vrij eenvoudige wijze gecontroleerd worden. Met behulp van een laser wordt gekeken of de reflectie van een bundel aan de om zijn optische as draaiende Schmidt-lens en die van de bolle spiegel niet ten opzichte van elkaar bewegen. Omdat de Schmidt-lens zuiver uitgericht staat ten opzichte van een rotatie-as betekent bewegen van de reflex van de bolle spiegel dat deze laatste nog niet centrisch staat. Is dit eenmaal wel het geval dan wordt de bolle spiegel op de Schmidt-lens gedrukt.
De gebruikte dubbelzijdige tape is speciaal geselecteerd op zijn levensduur, het afwezig zijn van vloei- en kruipverschijnselen en natuurlijk zijn hechtvermogen.

De primaire spiegel is op een ongebruikelijke manier aangebracht. Normaliter worden deze in kleine instrumenten op dezelfde wijze gevat als een lens. In grote instrumenten wordt een ingenieus en ingewikkeld ondersteuningssysteem aangebracht dat compensatiesysteem wordt genoemd. Het doel hiervan is de doorbuiging en oplegvervorming in elke stand van de spiegel tot een minimum (1/20 golflengte of minder) te compenseren. De primaire spiegel in de longdistance microscoop wordt tevens



Figuur 9. De opsluiting van de Schmidt-lens en de bevestiging van de secundaire spiegel.

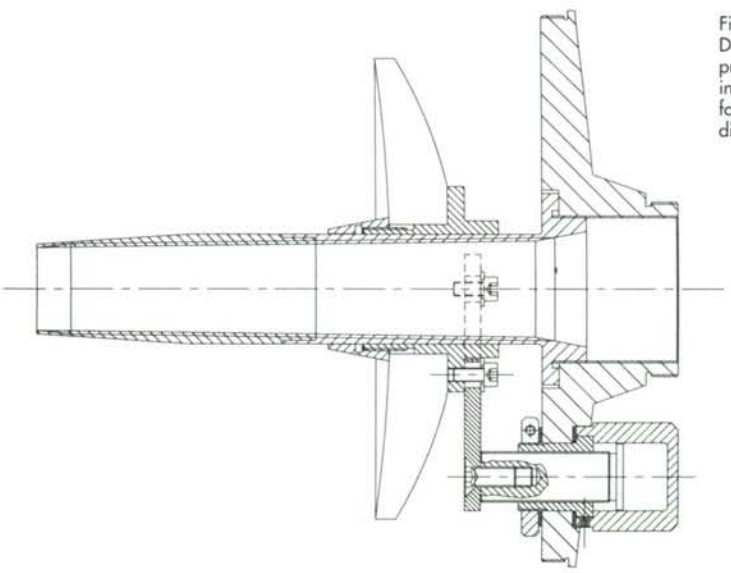
gebruikt voor de focussering door deze te verschuiven, zoals in Mikroniek (1994)3 werd besproken. Dit betekent dat de boring van de spiegel het hart is van het dragende systeem. De buis, die tevens een functie heeft in het baffle-systeem, is bevestigd aan de achterwand. Dit is weergegeven in figuur 10.

Bij de montage van de schuifbuis, die over de baffle-buis glijdt, in de spiegel, dient wederom grote aandacht te worden besteed aan de centrering. Ook hiervoor wordt gebruik gemaakt van een speciale inrichting. Bij het bevestigen van de spiegel mogen er geen spanningen optreden. Spanningen zijn de oorzaak van vervormingen en vervormingen groter circa 1/20 golflengte zijn niet toegestaan.

De focussering

Als een of meer elementen van een optisch systeem ten opzichte van elkaar bewogen worden tijdens het focusseren, dan kunnen er problemen ontstaan. Deze zijn er niet bij een "gewone" microscoop, omdat daarin nagenoeg zonder uitzondering de beeldvormende optische componenten ten opzichte van elkaar stil staan bij het focusseren. Dit is echter niet het geval bij een longdistance microscoop. Als de primaire spiegel niet exact over de optische as beweegt, zullen ten gevolge van het op een andere plek opvangen van de lichtbundels dwarsverplaatsingen ontstaan die optische verschillen kunnen geven. Tengevolge van spelingen kunnen de optische componenten kantelen, waardoor grote dwarsverplaatsingen ontstaan. Het kantelen kan worden geminimaliseerd als er geringe spelingen zijn, deze gering blijven en vooral het juiste smeermiddel is toegepast.

De verstelling gebeurt via een externe focusseerknop waarin de begrenzing van de slag is aangebracht. Deze plaats is gekozen om te voorkomen dat, als er aanslagen op de schuifbuis van de spiegel worden gezet, er onnodig grote krachten op de zeer nauwkeurige geleiding kunnen ontstaan. Deze krachten zouden in extreme gevallen kunnen leiden tot decentreringen en zelfs beschadigingen. Als de slagbegrenzing in de knop is aangebracht wordt altijd de geleiding nominaal belast.



Figuur 10.
De bevestiging van de primaire spiegel en de inrichting voor het focusseren van de longdistance microscoop.

Figuur 11. Verschillende typen van reflectie aan een oppervlak (zie tekst).

Het baffle systeem

In het artikel in Mikroniek (1994)3 bleek dat een spiegelinstrument dagblind is als het niet voorzien is van een baffle-systeem. Er valt licht dat niet deelneemt aan de beeldvorming in het brandvlak. Dat is ongewenst, want dit licht verhoogt het intensiteitsniveau in de afbeelding. Dit geldt zowel voor de reeds belichte als onbelichte delen. Een enorme reductie van het contrast is hiervan het gevolg. Om een indruk hiervan te geven dient het onderstaand voorbeeld.

Het contrast van optisch systeem is:

$$\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\%.$$

Hierin is I_{max} en I_{min} resp. de hoogste en laagste intensiteit die in een lijnrooster wordt gemeten.
Stel een systeem heeft een perfecte maximum afbeeldingskwaliteit, dan is $I_{max} = 1$ en $I_{min} = 0$ en het contrast:

$$\frac{1 - 0}{1 + 0} \times 100\% = 100\%.$$

Nu valt op deze zelfde afbeelding ongewenst licht. Stel dat dit slechts 5% is van het niveau. Dan wordt het contrast:

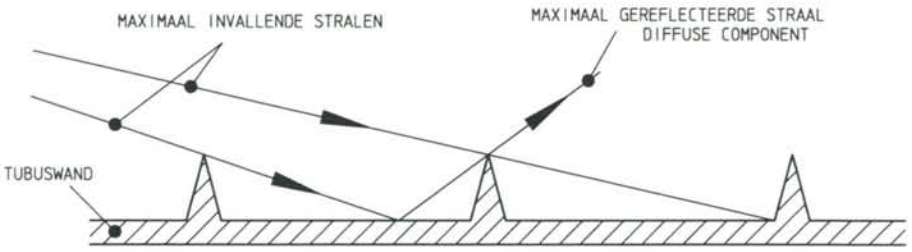
$$\frac{1{,}05 - 0{,}05}{1{,}05 + 0{,}05} \times 100\% = 90{,}9\%.$$

Het gaat dus erg hard en geeft aan dat niet alleen de geometrie van het baffle-systeem belangrijk is. Aan de wanden van de buizen ontstaan reflecties, die zoveel mogelijk moeten worden tegengegaan. Ook al zijn de onderdelen van zwart geanodiseerd aluminium, dan nog wordt er veel licht gereflecteerd. Deze hoge reflectie wordt veroorzaakt door het effect dat licht, dat onder zeer kleine hoeken op een oppervlak valt, de neiging heeft spiegelend te reflecteren. In figuur 11 zijn verschillende reflectiekarakteristieken gegeven. De eerste situatie is een zuiver spiegelende reflectie, de volgende een zuiver verstrooiende die ook wel Lambert-straler genoemd wordt. De laatste situatie geeft de meest voorkomende bij niet-gepolijste oppervlakken. Hieruit blijkt dat ongewenste reflecties in de buizen van het baffle-systeem en de tubus gemakkelijk kunnen optreden. Immers, aangezien de buizen allemaal gericht zijn in de kijkrichting kunnen de hoe-

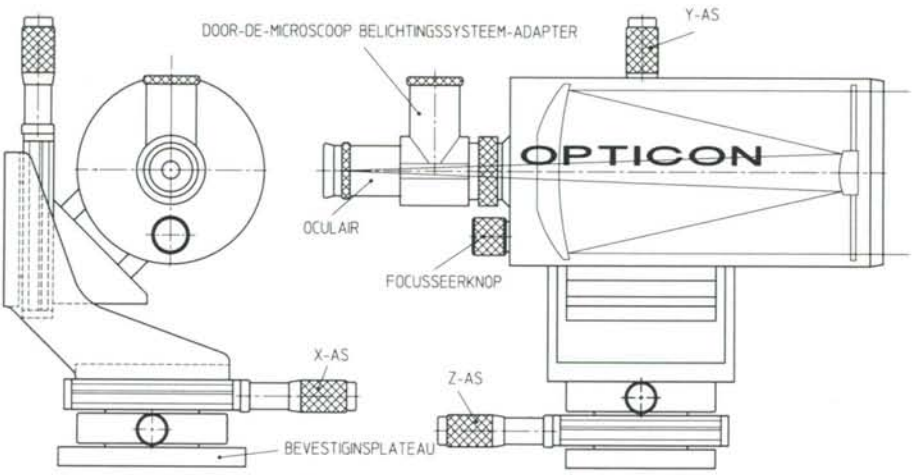
Een longdistance microscoop van Nederlands fabrikaat

ken daardoor erg klein worden en wordt de spiegelende component steeds groter.

Er zijn verschillende methoden om deze reflecties sterk te reduceren. De gemakkelijkste is die door te lakken. Een lak die over lange tijd een goed effect geeft is schoolbordenlak. Dit is een zwarte lak met kleine harde deeltjes die het oppervlak tijdens het drogen ruw laten worden. Helaas werkt deze lak slechts optimaal bij grote, vlakke, oppervlakken. In een buis, en zeker met kleine diameter, is het helaas niet mogelijk deze zodanig aan te brengen dat het effect maximaal is. Daarvoor is dus een andere oplossing gewenst. Goede resultaten worden bereikt met de lak Iriodine Feinsatin van de fa. Merck.
Een materiaal dat als geen ander in staat is licht te absorberen is zwart fluweel. Dit geldt vooral als het licht tegen de pool in op het materiaal invalt. Helaas heeft fluweel een nadeel dat het voor optische toepassingen nagenoeg onbruikbaar maakt: stofdeeltjes die gemakkelijk los laten en zo de optische componenten vervuilen. Deze vervuiling heeft hoofdzakelijk contrastverlies tot gevolg.
Een methode is het aanbrengen van diafragma- ringen op de juiste plaatsen.
Een veel toegepaste methode is een grove, schroefdraadachtige ril aan te brengen. Deze dient echter met grote voorzichtigheid te worden toegepast. Het traject waarover de ril aangebracht wordt mag niet te lang worden, omdat de toppen van deze "schroefdraad" niet oneindig scherp zijn en bij het anodiseren worden afgerond. Daardoor is de som van het aantal oppervlakken erg groot en kan het niveau van de reflecties hinderlijk hoog worden. Beter is het te werken met diafragma- ringen die afhankelijk van de geometrie, elk op een exact berekende plaats horen te staan. Het aantal ringen dient daarbij tot een minimum, maar wel het noodzakelijke aantal, beperkt te worden. In figuur 12 is weergegeven hoe de positie en afmetingen van deze ringen bepaald wordt. De diafragmaringen worden zodanig gepositioneerd dat vanuit het beeldvlak nergens een door invallend licht getroffen wand kan worden waargenomen. In de longdistance microscoop is een combinatie van al deze methoden toegepast.



Figuur 12. Het aanbrengen van extra ringen om te voorkomen dat aan de wand gereflecteerd licht op ongewenste plaatsen terecht komt.



Figuur 13. De opbouw van een longdistance microscoop op een XYZ-tafel. De microscoop is voorzien van een door-de-microscoop belichtingssysteem.

Additionele apparatuur

Om de waarneming te optimaliseren kan additionele apparatuur aan de longdistance microscoop worden aangebracht. Dit is op de eerste plaats natuurlijk een CCD-camera. Met een beeldbewerkingssysteem kunnen de waarnemingen bewerkt worden.
Een ander interessant feature is een belichtingssysteem dat in de kijkrichting met de longdistance microscoop meekijkt. Hiertoe is op de plaats van het oculair of de CCD- camera een hulpstuk met een lichtdeler aangebracht. Met behulp van een koud- lichtbron, die in het brandvlak staat, wordt een bundel door de longdistance microscoop op het object geprojecteerd. In figuur 13 is dit hulpstuk opgenomen. De plaats van deze projectie is altijd de plaats waar met de longdistance microscoop wordt waargenomen. Het grootste voordeel van een dergelijke belichting is, dat er vanuit de waarnemingsrichting geen schaduwen zichtbaar zijn. Deze bevinden zich natuurlijkerwijze altijd achter het waargenomen object.

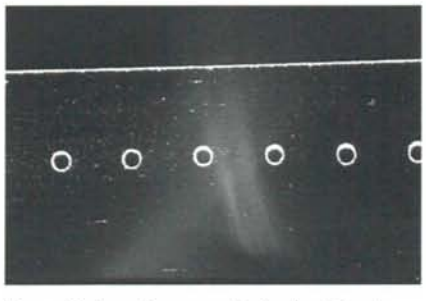
Een ander zeer interessant hulpstuk is een optisch systeem waarmee, in combinatie met een CCD-camera, het reeds vergrote beeld sterk kan worden vergroot. Hierdoor is mogelijk zeer kleine details of objecten goed te bestuderen.

Voor alledaagse toepassingen kan de longdistance microscoop direct op een zwaar fotostatief geplaatst worden. Om een object af te zoeken kan het systeem ook geplaatst worden op een XYZφ-inrichting. Hierdoor kan de longdistance microscoop in alle richtingen verplaatst worden. In verband met het hoge oplossend vermogen van de microscoop zijn sledes nodig van zeer hoge kwaliteit. Er worden tafels gebruikt die een slag maken van 40 mm en een nauwkeurigheid hebben van beter dan 0,001 mm, standaard met een micrometerinstelling. Een opstelling met een stappenmotor instelling is natuurlijk ook mogelijk. In dat geval kan, met behulp van een besturingsprogramma een volautomatische cyclus worden afgewerkt en kan de longdistance microscoop ingepast worden in een vision-systeem.

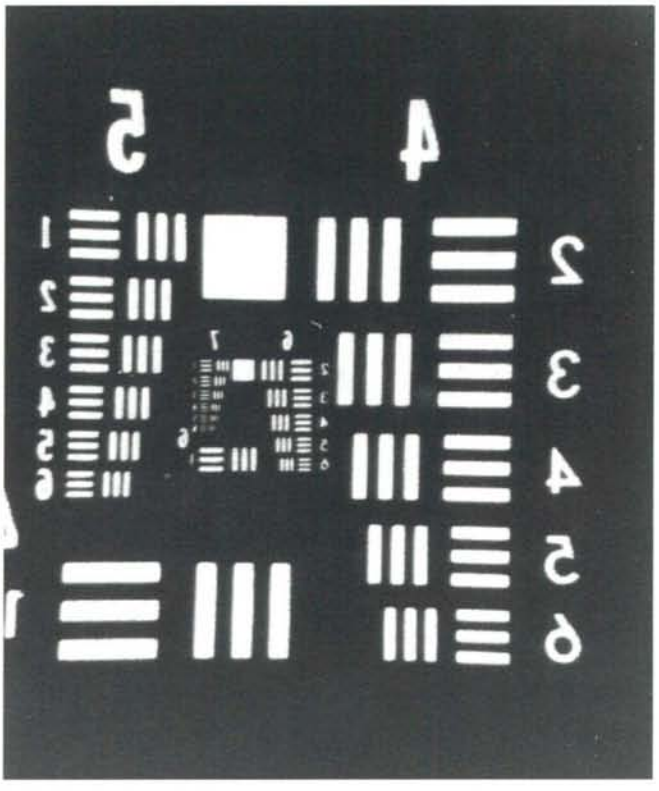
Figuur 14. De longdistance microscoop in combinatie met een CCD-camera en monitor.

Figuur 16. Inspectie van het venster van een LCD-display op een afstand van 2 meter.

Figuur 17. De suikerkristallen waaruit een suikerklontje is opgebouwd. Werkafstand 500 mm.



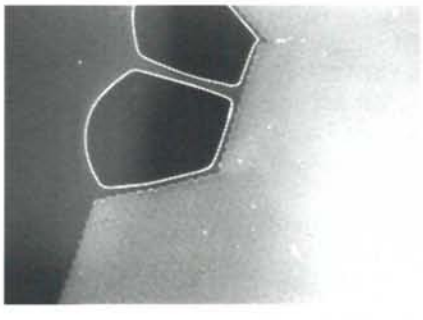
Figuur 18. Inspectie van gaatjes in glas. Diameter van de gaatjes is 0,3 mm. Werkafstand 500 mm.



Figuur 15. Weergave van het scheidend vermogen aan de hand van een testtarget van het National Bureau of Standards (USA). Het scheidend vermogen is beter dan 228 lijnparen bij een werkafstand van 400 mm.

Performance

Bij het ontwerpen en fabriceren van de longdistance microscoop is gestreefd naar de hoogst mogelijke afbeeldingskwaliteit. Het zou te ver voeren deze in extenso hier te behandelen. Over de bereikbare kwaliteit kan een indruk worden gekregen uit het artikel in Mikroniek (1994)2 en (1994)3. Gezien de grote werkafstanden is het scheidend vermogen van het systeem hiervan afhankelijk. In hoek uitgedrukt is het scheidend vermogen veel beter dan 1". Bij een afstand van 2 meter is dit beter dan 0,005 mm; voor andere afstanden is de waarde proportioneel.



Figuur 19. Inspectie van een glasfiber. Hierbij werd een additioneel optisch systeem aangebouwd en is een sterkere vergroting mogelijk. Afmeting van de fiber 0,1 mm. Werkafstand 500 mm.

Om een indruk te geven zijn in de figuren 14 tot en met 19 enkele voorbeelden gegeven, waarvan de onderschriften voor zich spreken.

Slotwoord

De traditie van de ontwikkeling van de microscoop, uitgevonden door Antoni van Leeuwenhoek in 1678, is in Nederland voortgezet. Met de ontwikkeling van de beschreven longdistance microscoop heeft de Nederlandse optische industrie een nieuw en waardevol instrument aan haar programma toegevoegd.

Auteursnoot

B. Postema en R. ter Horst zijn werkzaam bij Opticon te Groningen, fabrikant van de in dit artikel beschreven longdistance microscoop. Beide zijn verantwoordelijk voor de ontwikkeling en fabricage van nieuwe hoogwaardige optische systemen zoals deze microscoop, telescopen, speciale (miniatuur- tele)-objectieven in combinatie met CCD- camera's, precisie-optiek, etc.

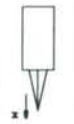
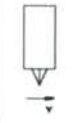
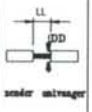
Literatuur

[1] Telescope Optics, Evaluation and Design; H.G.J. Rutten en M.A.M. van Venrooij. Willmann Bell inc. 3e druk 1993.
[2] Longdistance microscoop; H.G.J. Rutten, Mikroniek (1994)2, pag. 84.
[3] De Schmidt optiek; H.G.J. Rutten, Mikroniek (199)1, pag. 47.
[4] US-patent nr. 3837124 d.d. 24 sept. 1974.
[5] US-patent nr. 3837125 d.d. 24 sept. 1974.

Produktinfo

Programma lasersensoren

Het sensorprogramma van TPA, zie tabel, biedt een gevarieerd scala aan meetbereiken en nauwkeurigheden. Dit loopt van de nanosensor type LNS, werkend volgens het autofocusprincipe met een resolutie kleiner dan 10 nanometer bij een meetbereik van 14 µm, tot de schaduwmeetsensor type LBS die nog bruikbaar is bij een meetafstand van 10 m. Het overzicht toont de meetprincipes in samenhang met de specificatie van de diverse sensoren. Eruit blijkt dat in het TPA-programma voor bijna iedere nauwkeurigheidsklasse wel een oplossing voor een meetprobleem is te vinden. Voor bepaalde metingen, bijvoorbeeld diktemetingen, kan ook de bijbehorende software worden geleverd. De in de sensoren toegepaste laserdioden behoren tot de risicoklassen die geen gevaren inhouden.

Laser Distance Twin Nano Autofocus Velocity Beam Sensor							
T Y P E	*LDS 80*	*LDS 300*	*LTS*	*LNS*	*LAS*	*LVS*	*LBS*
meetafstand *mm*	80	175	15	2,3/26	30-500	30-100	LL max 10m
meetbereik *mm*	10 t/m 50	50 t/m 300	2,6 t/m 6	0,0088t/m0,300	6 t/m 100	1-1000m/min	DD 1-25
nauwkeurigheid %	<0,5	<1	<0,1		<0,2	<0,5	0,5(DD)
resolutie %	<0,1	<0,2	<0,01	0,07	<0,02	<0,1	0,1(DD)
laser GaAlAs *zichtbaar licht*	ja	ja	ja	nee	nee	ja	ja
infrarood	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
meetfrequentie *standaard*	10 of 100 kHz	10 of 100 kHz	100 kHz	100 kHz	3 kHz	100 kHz	3 kHz
optioneel	t/m 500 kHz	t/m 500 kHz	t/m 500 kHz	t/m 300 kHz	t/m 10 kHz		t/m 100 kHz
vereiste reflectiviteit %	>5 <95	>10 <90	>0,1 <99,9	0,2-100	>5 <95	>0,1 <99,9	
output standaard *Volt*	0-10	0-10	*+10/-10*	*+10/-10*	*+10/-10*	0-10	0-10
output opties *mA/RS232/BCD*	•	•	•	•	•	•	•
comparator o/c	•	•	•	•	•	•	•
afmetingen sensor *mm*	95•75•34	215•50•32	120•95•40	⌀ 20•64	40•40•130	40•40•150	40•40•100
gewicht sensor *gram*	300	400	700	100	300	300	300
temperatuurbereik °C	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50

Voor uitvoerige info:
TPA Systems BV
Toustruwe 5
6218 XX Maastricht
Telefoon: 043-437437
Fax: 043-434544.

Precisie-doorslijpmachine

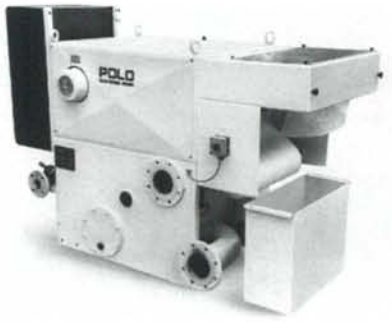
De doorslijpmachine Isomet 2000 van Buchler slijpt keramische materialen, plamaspraycoatings en vele soorten hooggelegeerde materialen snel en automatisch door.
Hoewel in eerste instantie bedoeld voor metallografische toepassing, zal hij op vele andere gebieden ook van nut kunnen zijn.

De microprocessor-gestuurde elektronica biedt de volgende voordelen voor de gebruiker:
- De doorslijpparameters kunnen optimaal worden ingesteld, zodat een gelijkmatige en reproduceerbare doorslijping wordt verkregen.
- Het variabele toerental kan worden ingesteld tussen 200 en 5000 omw./min.
- Een gewichtsinstelling van 100 tot 1000 gram met een automatische gewichtsbepaling van het monster en een ingebouwde micrometerverplaatsing voor het nauwkeurig positioneren van het monster.

Tevens is een serie diamantdoorslijpschijven ontwikkeld die een geringere deformatie en materiaaluitbreuk veroorzaakt. Dit leidt uiteindelijk tot reductie van de doorslijptijd en een kortere prepareertijd voor het bepalen van een microstructuur.

Voor uitvoerige info:
VIBA NV
Afdeling Geometrische Meettechniek en Materiaalonderzoek
Bleiswijkseweg 41
2712 PB Zoetermeer
Telefoon: 079-418881.

Aanzienlijke standtijdverlenging van koelsmeermiddel



Om bij verspanende bewerkingen een zo lang mogelijke standtijd van het koelsmeermiddel te bereiken, dient men dit op een dusdanige wijze te filtreren, dat voortdurend alle aanwezige verontreinigingen worden verwijderd.
Voor het reinigen van kleine en middelgrote hoeveelheden koelmedia is door Polo Filter-Techniek de Safi-T op de markt gebracht.
De werking van de Safi-T is eigenlijk betrekkelijk eenvoudig. De filter-unit bestaat uit een stalen container waarin een geperforeerde trommel draait. Om deze trommel en een hierop aansluitende afvoertafel beweegt een transportketting, die voor verplaatsing van het filterdoek zorgt. De ketting voorkomt

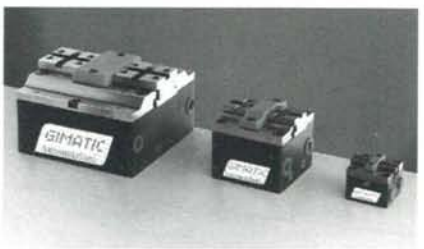
daarbij dat het doek direct met de trommel in aanraking komt, zodat een maximaal werkzaam filteroppervlak gerealiseerd wordt. Met behulp van een ventilator creëert men een zekere onderdruk, onder invloed waarvan het vervuilde koelsmeermiddel in het bassin door het filterdoek stroomt en gereinigd in de vacuümkamer terecht komt. Na verloop van tijd vormt zich zo op het doek een sliblaag, die op zijn beurt weer voor een verbetering van de filtratiegraad zorgt.
Er zijn drie modellen, met een capaciteit van respectievelijk 500, 1000 en 1500 dm^3/min.

Voor uitvoerige info:
Groneman BV
Postbus 24
7500 AA Hengelo
Telefoon: 074-551130
Fax: 074-551109.

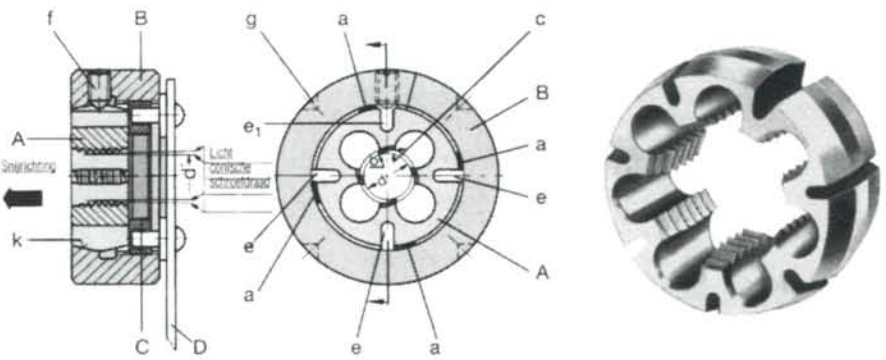
Parallelgrijpers

De compete MG-serie parallelgrijpers van Gimatie Automazioni omvat een drietal modellen, die elk met drie slaglengtes beschikbaar zijn. De kleinste grijper meet 28 x 28 x 24,5 mm en weegt niet meer dan 30 gram. De binnen deze reeks beschikbare typen, met een slag van 2 mm, 5 mm en 9 mm, zijn in staat een klemkracht van respectievelijk 70 N, 35 N en 18 N uit te oefenen. Het tweede model is bijna tweemaal zo groot: hier bedragen de buitenafmetingen 50 x 50 x 46 mm, terwijl de eigen massa op 200 gram komt. Bij een slag van achtereenvolgens 5 mm, 12 mm en 20 mm kan een kracht van achtereenvolgens 300 N, 160 N en 90 N worden verkregen. Van het derde model zijn de afmetingen 90 x 89 x 57 mm. Alle hier aangegeven krachten worden gerealiseerd bij een persluchtdruk van 0,6 MPa (6 bar). Bij deze pneumatische parallelgrijpers zou een herhalingsnauwkeurigheid van 0,01 mm zonder meer haalbaar zijn. De benodigde tijd voor het bekrachtigen van de grijperbekken varieert van slechts 0,10 s tot 0,15 s.
De behuizing is van een hardgeanodiseerde aluminiumlegering; de grijperbekken kunnen in hetzelfde materiaal, dan wel in gehard staal geleverd worden. Aansluiting van de persluchtleidingen is mogelijk met standaard instantkoppelingen. Ook voor het plaatsen van een eindschakelaar zijn van fabriekswege reeds voorzieningen getroffen.

Voor uitvoerige info:
Pneu/Tec BV
Postbus 416
2130 AK Hoofddorp
Telefoon: 02503- 36611
Fax: 02503- 32465



De complete MG-serie omvat een drietal modellen, die elk met drie slaglengtes beschikbaar zijn. De kleinste grijper meet 28 x 28 x 24,5 mm en weegt niet meer dan 30 gram.



A) Elastik-snijplaat, B) kapsel, C) drukplaat, D) spansleutel, a) druknokken, b) snijkant, c) radiale vrijloophoek, d) kerndiameter, d') axiale vrijloophoek, e) radiale groef, e1) borggroef, k) centreerkegel.

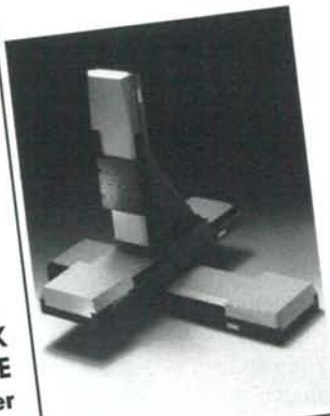
Instelbare snijplaten voor schroefdraadsnijden

Klemmende snijplaten, slechte oppervlaktekwaliteit en passingproblemen zijn te voorkomen met instelbare snijplaten -merknaam "Elastik"- voor het draadsnijden op conventionele draaibanken. Deze ronde, gesloten snijplaten hebben aan de voorzijde een kegelvormige buitenomtrek, waarop druknokken zijn aangebracht. Voor elke snijkant één, evenals een radiale groef naast elke nok. Deze snijplaat moet worden opgenomen in een speciaal kapsel, dat aan de voorzijde voorzien is van eenzelfde, nu inwendige kegel. Daarin wordt de plaat door middel van een drukplaat en een spansleutel onder spanning gebracht. De kegel zal hierdoor zodanig asymmetrisch vervormen dat de snijkant enigszins naar binnen beweegt en een radiale vrijloophoek ontstaat. Omdat die verplaatsing alleen optreedt aan de zijde die in de kegel wordt geperst, wordt de schroefdraad van elke snijkant daar tevens radiaal naar binnen gedrukt, wat een axiale vrijloophoek oplevert. Het gevolg van deze vervormingen is wel dat de flankendiameter kleiner wordt. Hoe meer voorspanning, hoe kleiner de schroefdraad. Onder de minimum voorspanning ligt de flankenmaat in het ISO 4h gebied, onder de maximum voorspanning in het 6g gebied. Ondermaatse schroefdraad is dus moeiteloos te fabriceren. Ook bij moeilijk bewerkbare materialen zoals roestvaststaal is deze snijplaat goed toepasbaar. De buitendiameter van het kapsel komt overeen met de eerstvolgende diameter in de reeks. Bij gebruik van een snijplaat van 20 millimeter diameter is de opnamediameter van de instelbare snijplaat plus kapsel dus 25 millimeter.

Voor uitvoerige info:
Viba NV
Bleiswijkseweg 41
2712 PB Zoetermeer
Telefoon: 079 - 418 881.

U eist een uitzonderlijke

POSITIONERINGS-NAUWKEURIGHEID



PHYSIK INSTRUMENTE is uw partner

De nieuwe serie lineaire translatoren (serie M 500 (100, 200 en 300 mm) garanderen u:

- nauwkeurigheid 1 micron
- positionerings-reproduceerbaarheid 0.1 micron (0.4 micron voor 300 mm uitvoering). Aandrijving middels stappenmotor of DC motor. Optioneel kan een Heidenhain-lineaal geintegreerd worden zodat absolute verplaatsingen bepaald kunnen worden.

Wij nodigen u graag uit tot een orientatie.

Voor uitgebreide informatie en produktkatalogus

Tel. 04959 - 3300
Fax 04959 - 1153

APPLIED LASER TECHNOLOGY

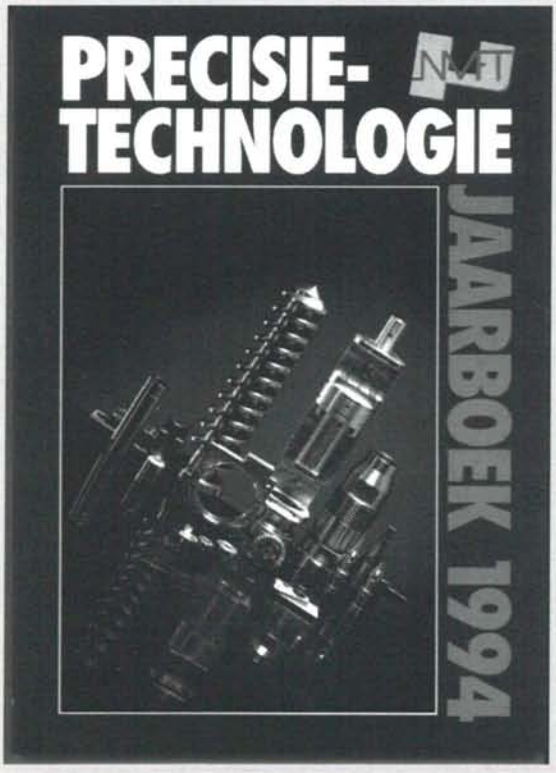
DENK NOU NIET DAT U MET UW HOOGGLANS- EN OPTISCH POLIJSTWERK BIJ ONS NIET WELKOM BENT

Polgron Optics and Polishing Techniques is de enige onderneming in Nederland die zelfstandig hoognauwkeurig polijstwerk verricht. Het polijsten van produkten met een oppervlakteruwheid van Ra 0,001 tot 0,002 micrometer en een vormnauwkeurigheid van 0,03 micrometer is met de door ons ontwikkelde techniek niet alleen haalbaar voor vlakke, maar zelfs voor sferische en a-sferische vormen. Die kunst laten we niet afkijken. Evenmin gunnen we u een blik op prototypes of matrijzen van de meest gerenommeerde bedrijven die bij ons op de werkbank kunnen staan. Wellicht voor u juist de verzekering dat uw opdracht bij Polgron in goede handen is.

POLGRON
OPTICS & POLISHING TECHNIQUES
Het grove onderscheid op 0,002 micrometer.

Zernikepark 2-4, 9747 AN Groningen, tel. 050-745738/fax 050-634596

Precisietechnologie jaarboek 1994



(prijs *f* 59,– ex btw 6%)

Precisietechnologie en fijnmechanische techniek voor het eerst in kaart gebracht.

Met een uitgebreid:
- Produkten- en bedrijvenregister van leveranciers en producenten

Met informatie over:
- NVFT, vereniging voor precisietechnologie;
- Mikropool, een onderlinge dienstverlening van NVFT-leden;
- Opleidingen Fijnmechanische Techniek;
- Ontwikkelingen in het vakgebied.

Voor inlichtingen en bestellingen Buro Jet, de heer N.J.H. van den Brink
tel. 070 – 3990000, fax 070 – 3902488
NVFT-leden ontvangen het jaarboek kosteloos.

KOPER / MESSING / ALUMINIUM

Voor 't geval dat u 't nog niet wist.:...

enorme voorraden

en korte levertijden

beheersen onze handelswijze!

Onze voorraad platen, staven, buizen, draad, profielen etc. is groot, erg groot zelfs.
En deze voorraad wordt voortdurend op peil gehouden, want lange levertijden zijn bij ons taboe.
Vraag omgaand informatie. We zijn snel te toetsen!

KOPER E-Cu/SF Cu	MESSING Ms 58/Ms 60 Pb/Ms 63	ALUMINIUM 50 ST/51 ST/28 ST/54 S
● - 3 t/m 250 mm	● - 1 t/m 350 mm	● - 3 t/m 500 mm 51 ST + 28 ST
■ - 4 t/m 200 mm	■ - 2 t/m 150 mm	■ - 4 t/m 200 mm 51 ST + 28 ST
⬢ - 6 t/m 60 mm	⬢ - 2 t/m 110 mm	⬢ - 5 t/m 36 mm 28 ST
▬ - 6 x 2 t/m 100 x 60 mm	▬ - 3 x 2 t/m 100 x 80 mm	▬ - 10 x 2 t/m 150 x 75 mm 50 ST + 28 ST
○ - buis t/m 106 mm	◠ - 6 x 3 t/m 40 x 6 mm	◎ - buis/holstaf t/m 300 mm 50 ST/51 ST/28 ST
	✹ - kartel 5 t/m 23 mm	● plat + vierkant óók in kortspanig 28 ST
	◎ - buis/holstaf t/m 180 mm	

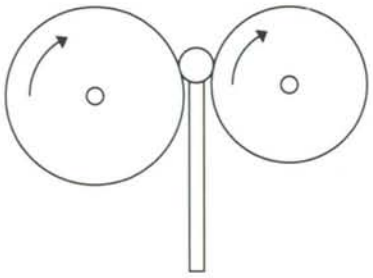
SALOMON'S METALEN B.V.

Voorsprong door Voorraad!

GOTENBURGWEG 24,
9723 TL GROININGEN TEL. 050-421200 FAX 050-416892

FIRMA CENTERLESS

Middenweg 145F - 1394 AH Nederhorst den Berg -
Telefoon 02945 - 4269 - Fax 02945 - 1751



- Numeriek draaien.
  (500 tussen de centers X ∅ 400)
  tot ∅ 65 mm vanaf staf.
- Centerloos slijpen - doorvoeren tot ∅ 100.
- Läppen-insteken en profileren
  tot ∅ 80 mm.
- Numeriek langdraaien
  t/m ∅ 20 mm.
- Numeriek frezen met palletwisselaar
  op bewerkingscentra.

MECHANICAL PARTS PRODUCTION
Delft Instruments

MPP DELFT INSTRUMENTS

Röntgenweg 1, 2624 BD Delft
Postbus 483, 2600 AL Delft
Telefoon: 015 - 698500
Fax: 015 - 571352

MPP
MPP (Mechanical Parts Production) is een dynamisch bedrijf met tientallen jaren ervaring op het gebied van fijnmechanische fabricage en comakership, een ervaring opgedaan bij de vervaardiging van onderdelen voor de apparatuur van Delft Instruments.

Kwaliteit
Inzet, toewijding en kunde staan bij MPP hoog in het vaandel. Zo kan MPP een uitstekende kwaliteit van haar produkten waarborgen. Bij MPP wordt dan ook volgens ISO 9002 gewerkt.

Co-makership
Dankzij de jarenlange ervaring in het samenwerken met anderen voor fabricage van onderdelen, bouwden de MPP-medewerkers een grote expertise op in het projectmatig werken, waarbij het co-makership altijd als uitgangspunt geldt. Dit betekent dat al bij de ontwikkelingsfase van een produkt wordt meegedacht.

Doelstelling
MPP wil met de klanten Comakership relatie opbouwen. Een relatie die gebaseerd moet zijn op een wederzijds vertrouwen in elkaars mogelijkheden en die gericht is op zo gunstig mogelijke marktcondities voor die klant. Nauwe samenwerking en goede afspraken moeten leiden tot de juiste prijs/prestatie verhouding.

Kontaktpersonen:
W.H.H. Evertsz
tel: 015 - 698666
H.J. Berbée
tel: 015 - 698538

Precisie...
daar zijn wij sterk in!

Opgericht in 1919 heeft Esmeijer zich ontwikkeld tot een van de toonaangevende ondernemingen in zijn branche.

Vooral voor fijnmechanische- en hoognauwkeurige bewerkingen omvat het leveringsprogramma een nagenoeg compleet aanbod aan machines en gereedschappen van wereldwijd gerenommeerde topfabrikanten.

Een wezenlijk onderdeel van onze contacten met klanten bestaat uit gedegen voorlichting, technische adviezen, demonstraties en het inbedrijfstellen en servicen van geleverde machines door gespecialiseerde onderhouds-technici.

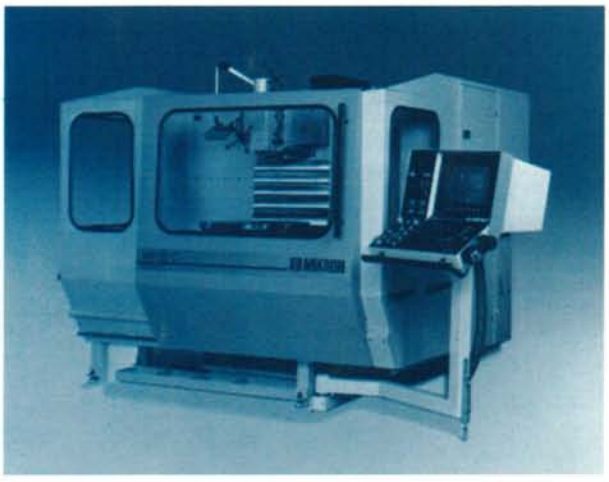
Precisie, daar leven wij al 75 jaar van.

Voor meer informatie of documentatie:
Telefoon 010-415 27 88, Fax 010-437 89 66

1919 - 1994

ESMEIJER SINDS 1919 UW PARTNER VOOR DE HOOGSTE PRECISIE

Schaublin
Voor hoogwaardige draai- en freesbewerkingen.
Conventionele- en CNC uitvoeringen.
Draaien tot Ø 250 mm.
Frezen XYZ tot 700 x 500 x 400 mm.



Mikron
Voor alle freesbewerkingen van klein tot groot.
Conventionele- en CNC-uitvoeringen.
Bewerkingscentra.
Werkbereik XYZ tot 2000 x 800 x 1000 mm.

Fehlman
In één opspanning co-boren, kotteren, frezen.
Conventionele- en CNC uitvoeringen.
Werkbereik XYZ tot 2100 x 435 x 500 mm.

esmeijer

ESMEIJER BV • INDUSTRIEWEG 110 • 3044 AT ROTTERDAM • POSTBUS 11077 • 3004 EB ROTTERDAM • TEL. 010-415 27 88 • FAX 010-437 89 66