

Meten tijdens de vervaardiging van vormproducten

Citation for published version (APA):

Visman, R., Vliet, van, W. P., & Schellekens, P. H. J. (1991). *Metten tijdens de vervaardiging van vormproducten*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**PROJECT: METEN TIJDENS DE VERVAARDIGING VAN
VORMPRODUKTEN**

EINDRAPPORT

28 juni 1991

CENTRUM VOOR PRODUKTIE TECHNIEK

Ir. R. Visman

TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

**Ir. W. van Vliet
Prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens**

INHOUD

	pagina
1 Inleiding	2
2 Projectbeschrijving	3
3 Literatuuronderzoek	5
4 Bedrijfsinventarisatie	24
5 Produktinventarisatie	28
6 Evaluatie	32
7 Vervolgprojecten	34

BIJLAGEN

- I Bedrijfsenquête
- II Literatuuroverzicht, verantwoording.
- III Akoestische Methoden

1 INLEIDING

Bij de vervaardiging van vormproducten van metaal en kunststof is de verkorting van de doorlooptijd een belangrijke doelstelling voor de ondernemer. Daarnaast worden steeds hogere eisen gesteld aan de kwaliteit van het produkt. Binnen dit project wordt produktkwaliteit gekwantificeerd door meetbare termen als maatvoering, vorm en oppervlaktegesteldheid en door de bepaling van de aanwezigheid van vormelementen en eventuele defecten daaraan. Het vervaardigingsproces kan beter beheerst worden als de terugkoppeltijd van de kwaliteitsinformatie kort is. Dat betekent dat tijdens de fabricage (in-proces) of tussen de fabricagestappen (inter-proces) gemeten moet worden.

Deze studie beoogt het gebruik van sensoren en elektronische en optische meetsystemen binnen de metaal- en kunststofverwerkende industrie te onderzoeken en ontwikkelmogelijkheden te definiëren. Daarnaast moet inzicht worden verkregen in het gebruik van sensoren in een productie-omgeving.

Daartoe zal onderzoek worden verricht aan:

- het huidige gebruik van sensoren en meetsystemen binnen de genoemde productieprocessen
- het potentiële gebruik van bestaande sensoren en meetsystemen met modificaties
- ontwikkelrends vanuit R/D *technology-push) en vanuit de gebruikers (market-pull)

Het onderzoek zal zich richten op technologische aspecten, niet op organisatorische en logistieke problemen. Het is de bedoeling dat de binnen het onderzoek gegenereerde kennis het gebruik van geavanceerde sensoren en meetsystemen bij de producerende industrie zal bevorderen. Daarnaast zullen ontwikkelrichtingen en mogelijkwerwijs specifieke produktideeën aangeven worden.

2 PROJECTBESCHRIJVING

2.1 Probleemgebied

Het kader, waarbinnen het project wordt uitgevoerd, wordt als volgt aangegeven:

- 1 het onderzoekgebied beperkt zich tot de vervaardiging van vormproducten van metaal of kunststof
- 2 het accent zal liggen op vervaardiging d.m.v. verspanende bewerkingen, maar andere processen zullen meegenomen worden, voorzover de meetproblematiek vergelijkbaar is (gieten, plaatbewerking)
- 3 de produktbeschrijving en de technische specificaties zijn vastgelegd; binnen het project wordt geen kwaliteitsinformatie teruggekoppeld naar de constructeur/ontwerper
- 4 het project houdt zich bezig met de technische kwaliteitsbeheersing van afmetingen, vormen en oppervlaktegesteldheid m.b.v. meetmiddelen; het project houdt zich niet bezig met administratieve, logistieke of educatieve doelen
- 5 de studie vindt plaats tegen een achtergrond van de toepassing en implementatie van mechatronica in de produktietechniek

Volgens de hedendaagse opvatting vindt kwaliteitscontrole plaats als onderdeel van het productieproces, wat zich o.a. daarin uit dat de metingen worden uitgevoerd door productiepersoneel. De kwaliteitsafdeling met als allesomvattende taak de verantwoordelijkheid voor het eindproduct, heeft o.a. als deeltaken:

- de ontwikkeling van controleprocedures en meetmethodieken
- de calibratie van meetmiddelen en machines
- de aanschaf van meetmiddelen

Doel van de kwaliteitscontrole is de beheersing van het productieproces. Hierbij worden de procedures en methodieken in belangrijke mate bepaald door de technische mogelijkheden van de meetmiddelen.

Tijdens deze studie wordt in samenwerking met producerende bedrijven gedefinieerd:

- hoe momenteel meetmiddelen worden ingezet en hoe de procedures en methodieken lopen
- waar verbeteringen denkbaar zijn in procedures en methodieken en hoe deze vertaald moeten worden naar eisen aan de meetmiddelen

In samenwerking met leveranciers en R/D-instellingen wordt gedefinieerd:

- wat de ontwikkelrends van dit moment zijn
- wat de haalbaarheid op korte en middellange termijn is van de gedefinieerde eisen

Een aantal onderwerpen, die met name onderzocht zullen worden zijn:

- het gebruik van sensoren in bewerkingscentra voor de meting van geometrische kenmerken en oppervlaktegesteldheid. Hieronder vallen de optimale toepassing van bestaande sensoren en mogelijkheden voor andere, contactloze typen (akoestisch en optisch)
- de implementatie van 3-D meetmachines op de werkvloer en de ontwikkeling van nieuwe meetmethoden, die sneller werken met behoud van nauwkeurigheid (laser-scanning, moiré, beeldbewerking)

2.2 Fasen

- 1 Inventarisatie van in gebruik zijnde middelen, methodieken en procedures.
 - Opstellen van een enquête voor producerende bedrijven; interviews aan de hand van de enquête
- 2 Inventarisatie van beschikbare technische middelen en ontwikkelrends
 - marktonderzoek, contact met leveranciers
 - literatuuronderzoek
 - contact met R/D instellingen
- 3 Definitie van ontwikkelrends
 - modificaties van bestaande meetmiddelen
 - ontwikkeling van nieuwe middelen, selectie en beschrijving van kansrijke ontwikkelprojecten
- 4 Eindrapport

2.3 Uitvoering

Voor het project is opdracht gegeven door SCME te Delft, waargenomen door W. van Zeggeren. Het wordt uitgevoerd door het Centrum voor Produktietechniek. De projectcoördinator, c.q. uitvoerder namens het Centrum is R. Visman.

Binnen het kader van het project heeft SCME de heer W. van Vliet van de T.U.E. in dienst genomen, die werkzaamheden verricht o.l.v. de projectcoördinator. De begeleiding namens de T.U.E. ligt in handen van P. Schellekens.

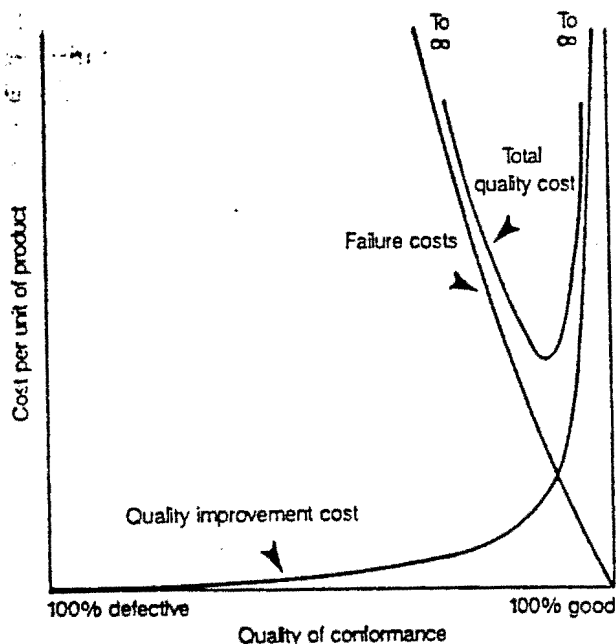
In fase 3 werd een deelopdracht gegeven aan TPD-TNO.

3 LITERATUUR ONDERZOEK

3.1 Inleiding

Door een toenemende vraag naar hogere kwaliteit en concurrerende prijzen van producten worden fabrikanten genoodzaakt om hun productieprocessen beter te gaan beheersen [1]. Dit houdt in dat de kwaliteitscontrole goed georganiseerd en gedefinieerd moet zijn. Dat is ook van belang in verband met de voor de EG van kracht geworden wet ten aanzien van de produktaansprakelijkheid.

In het verleden was de kwaliteitscontrole, dat wil zeggen de controle van het produkt, vooral een eindcontrole [2]. Dit betekende in het algemeen dat pas een goed- of afkeuroordeel werd gegeven als de toegevoegde waarde maximaal was. Tegenwoordig probeert men steeds meer de kwaliteitscontrole te integreren met het productieproces, zodat (half-)fabrikaten er in een vroeg stadium uit verwijderd kunnen worden. Hierdoor blijft de economische schade beperkt. Uiteraard bestaat er een optimum tussen de inspanningen die men moet doen om deze economische schade te beperken en de kosten die inspectie met zich meebrengt (zie figuur 1).



Figuur 1: Model voor de optimale kwaliteitskosten [41].

Jones, [2] (zie fig. 2) zet procesautomatisering naast fabrieksautomatisering. Binnen het CIM concept van het laatste zal het echte vervaardigingsdeel zich verder ontwikkelen tot een procesconcept, waarbij kleine series discrete werkstukken voor een continue stroom van output zorgen. Hiervoor zijn meetsystemen nodig, die in het proces en zonder verstoring kwaliteitskenmerken kunnen meten. De meetresultaten worden teruggekoppeld naar het bewerkingsproces, zodat dit beheerst kan worden.

Kwaliteitskenmerken zijn bijvoorbeeld de afmetingen van een produkt of de bepaling van de aanwezigheid van geometrische elementen. Een voorbeeld van dit laatste werd gevonden bij het stansen van scheermesjes. Indien een inkeping in een mesje ontbreekt is dit niet bruikbaar. De aanwezigheid en de grootte van deze inkeping dient dus gecontroleerd te worden.

In veel bedrijven die zich bezig houden met massaproductie is de kwaliteitscontrole door middel van het meten van de geometrie van producten ingeburgerd, omdat het daar rendabel is om specifieke (niet-flexibele) opstellingen te bouwen, die de meting tijdens het fabricageproces uitvoeren.

Bij de productie van kleinere series is dit meestal nog niet het geval, omdat controlesystemen hiervoor flexibel en universeel moeten zijn. Productiebedrijven moeten voor kleine series hogere produktiesnelheden realiseren gekoppeld aan een betere kwaliteit. Deze hogere produktiesnelheden eisen echter ook een snellere en meer flexibele controle om produktie-uitval te verminderen. Een snellere controle kan alleen gerealiseerd worden door reeds tijdens het productieproces relevante grootheden te meten en terug te koppelen.

In relatie tot kwaliteitsbeheersing wordt vaak gesproken over machine-capability en process-capability. Hierin wordt de machine-capability bepaald door de intrinsieke eigenschappen van de machine, die gemeten kunnen worden als hij onbelast draait. Hij kan bijvoorbeeld verbeterd worden door te corrigeren voor thermische invloeden en mechanische afwijkingen. Als een gereedschap en een werkstuk worden toegevoegd ontstaat process-capability. Deze omvat invloeden van machine, gereedschap, werkstuk en alle interacties daartussen. Beide bevatten systematische en toevallige afwijkingen.

Systematische afwijkingen ontstaan bijv. door de statische belasting van het werkstuk door spanmiddelen en snijgereedschap en door de gereedschapsslijtage. Toevallige afwijkingen ontstaan bijv. door het dynamische gedrag van het werkstuk door trillingen en door gereedschapsbreuk.

De procescapability kan worden verbeterd door systematische afwijkingen te verminderen door te corrigeren vanuit voorgaande ervaring (berekening van de invloed van statische spanningen of temperatuureffecten, resulterend in software correcties) of door ze te meten en de meetresultaten terug te koppelen naar de besturing (gereedschapsslijtage). De invloed van toevallige afwijkingen moet verminderd worden door continu of intermitterend te meten. Kwaliteitskenmerken worden gemeten om te kunnen voldoen aan gespecificeerde produktfuncties en/of om het proces te beheersen.

In de kwaliteitsbeheersing worden drie typen controles uitgevoerd [1], die worden aangeduid met de (Engelse) termen:

- pre-process;
- in-process;
- inter-process;
- post-process.

Hierin is een proces een bewerking of een reeks bij elkaar behorende bewerkingen die nodig zijn voor de vervaardiging van een produkt of een onderdeel van een produkt.

- "Pre-process" meten betekent dat produktkenmerken gemeten worden, voordat met de bewerking wordt begonnen. Dit kan nodig zijn om bewerkingsparameters in te stellen. Een voorbeeld is het nabewerken van gaten in gietstukken met hoge diameter en oppervlakte toleranties, maar lage positie toleranties.
- "In-process" meten geeft aan dat tijdens een bewerking metingen worden verricht aan het produkt of aan procesparameters. Men weet dan [3] voor elk tijdstip de momentane grootte van de gemeten parameters, waardoor de tijdsduur tussen het vervaardigingstijdstip en het controletijdstip minimaal is. Dit maakt, indien het proces zich daartoe leent, een directe terugkoppeling naar de bewerkingsmachine mogelijk, zodat de geometrische afwijkingen welke in het werkstuk worden geïntroduceerd door de systematische afwijkingen van de bewerkingsmachine worden verkleind. Een nadeel is dat de meetapparatuur geschikt moet zijn om in een bewerkingsomgeving te kunnen functioneren.

- "Inter-process" geeft aan dat er gemeten wordt tussen bewerkingsstappen. Het heeft alleen betekenis indien een produkt een aantal dicht opeenvolgende bewerkingen moet ondergaan [3]. Dit heeft als voordeel dat de meetapparatuur enigszins geïsoleerd kan worden van de bewerkingsomgeving, terwijl het tijdsverloop tussen het fabricagetijdstip en het controletijdstip relatief klein kan worden. Een nadeel is dat terugkoppeling pas kan plaatsvinden na een trendanalyse, omdat anders het gevaar bestaat dat gecorrigeerd wordt voor toevallige afwijkingen in het bewerkingsproces.
- "Post-process" meten geeft aan dat na een volledige bewerking of na een serie bewerkingen wordt gemeten. Het voordeel van deze manier van kwaliteitscontrole is dat elk daartoe geschikt meetapparaat kan worden ingezet, onafhankelijk van het bewerkingsproces. Nadelen zijn echter dat er relatief veel tijd verstrijkt tussen het vervaardigings-tijdstip en het controletijdstip en dat alleen een goed- of foutoordeel over het desbetreffende produkt kan worden gegeven [3].

Na de bepaling van geometrische grootheden kunnen bijvoorbeeld procesparameters worden veranderd of gereedschappen vervangen.

Een controle geïntegreerd met het productieproces brengt specifieke problemen met zich mee t.o.v. de uitvoering in een reguliere meetkamer. De omgeving vormt een grote storende factor om meettechnisch tot goede resultaten te kunnen komen, door bijv. [3]:

- trillingen;
- temperatuur(gradienten);
- stof;
- materiaalspanen;
- koelvloeistof;
- lucht-/nevelwervelingen.

Hierbij treden bij inter-proces meten minder storingen op dan bij in-proces meten.

Deze invloeden vormen tot op heden een drempel om, geïntegreerd met het productieproces, metingen uit te voeren aan geometrische grootheden van werkstukken. Er wordt veel onderzoek gedaan aan verschillende meettechnieken voor verschillende bewerkingsprocessen om deze problemen op te lossen.

Ook blijkt uit de literatuur de behoefte aan meetmiddelen, die inzetbaar zijn op de productievloer, naast de machines. Doordat vaak kleine series geproduceerd worden, moeten deze middelen snel omgesteld kunnen worden door productiepersoneel. De eisen aan de nauwkeurigheid blijven gelijk of worden hoger.

Meetbare geometrische kwaliteitskenmerken zijn:

- lengtematen;
- vorm;
- posities;
- oppervlakteparameters.

Bij de definitie van oppervlaktegesteldheid worden 3 parameters onderscheiden, die het oppervlak beschrijven bij een toenemende frequentie en een afnemende amplitude van de verstoring:

- 1 vlakheid;
- 2 waviness;
- 3 ruwheid.

Al deze parameters vragen om verschillende meetmiddelen.

In het kader van dit project is van de volgende, arbitraire, gevraagde onnauwkeurigheid van meetmiddelen uitgegaan voor toepassingen in de:

- verspanende industrie : 0,002 mm;
- plaatverwerkende industrie : 0,02 mm;
- gietindustrie : 0,2 mm.

South, [51] geeft een lijst van veel gebruikte toleranties en de daarbij horende meeton nauwkeurigheden, zoals die in de Amerikaanse industrie van toepassing zijn:

Applications	Typical tolerances (mm)	Measurement tolerances required (mm)
Plastic/rubber molded parts	0.1	0.01
Stamped parts	0.05	0.005
Semiconductors	0.0002	0.00002
Disk heads	0.0002	0.00002
Precision tooling	0.005	0.0005
Artwork/PC boards	0.25	0.025
Etched parts	0.05	0.005
Punched parts	0.25	0.025
Machined parts	0.15	0.015
Cutting tools	0.25	0.025
Optical parts	0.05	0.005
Fiber optics	0.025	0.0025

Meetmiddelen binnen het kader van dit rapport worden ingezet om:

- 1 pre-, in-, inter-, of post-proces te meten;
 - 2 vorm, lengte, positie of oppervlak te meten of aanwezigheid te bepalen.
- Afhankelijk van het proces varieert de vereiste meeton nauwkeurigheid van 1 μm tot 0,1 mm.

Bij de verdere uitwerking van deze studie is er geen aandacht gegeven aan het bepalen van de aanwezigheid van vormelementen.

Vertaald naar concrete meetmiddelen hebben we ons gericht op:

- 1) coördinatenmeetmachines;
- 2) vorm- en lengtemetingen met behulp van camera's in de 2D-ruimte en de 3D-ruimte;
- 3) optische- of akoestische sensoren voor het meten van afstanden.

Daarnaast is gezocht naar literatuur over contactloze meetmethoden om de vlakheid van grote oppervlakken (groter dan 0,25 m²) met hoge nauwkeurigheid te kunnen vaststellen. Hierbij moet gedacht worden aan meeton nauwkeurigheden van 1 μm en kleiner. Helaas is hierover niets gevonden. Wèl zijn er voldoende optische technieken (interferometrie) bekend om kleinere oppervlakken met deze nauwkeurigheid en beter te kunnen meten.

Met optische methoden voor de meting van grote oppervlakken, die werken met gestructureerd licht, zoals Moiré en fotogrammetrie worden vooral de vorm en de aanwezigheid van defecten bepaald.

In dit literatuur onderzoek is niet gekeken naar holografische en speckle- meettechnieken. Hiervan is verondersteld dat de mogelijkheden voor een directe toepassingen in een productie-omgeving (zoals omschreven in de projectdefinitie) vooralsnog gering zijn.

Het onderzoek naar akoestisch methoden is als bijlage toegevoegd.

3.2. Contactloze sensoren voor de geometrische meettechniek

3.2.1 Inleiding

In het kader van dit project is uitsluitend gekeken naar optische en akoestische meettechnieken- en sensoren om afstanden te meten, en dan nog uitsluitend naar meettechnieken die in aanmerking komen om te worden toegepast in een industriële omgeving.

Contactloze meettechnieken hebben een aantal voordelen ten opzichte van de mechanische meettechnieken:

- hoge meetsnelheid, waardoor evt. ook aan bewegende werkstukken gemeten kan worden [8, 10, 46, 51];
- er kan geen beschadiging of vervorming optreden van het te meten object door mechanische aantasting en er treedt geen slijtage op van de meetapparatuur [2, 46];
- het is mogelijk om zeer kleine objecten met een hoge informatiedichtheid of zeer grote objecten te meten die mechanisch niet, of slechts met grote inspanningen, te meten zijn [46].
- de meetmethode is niet gevoelig voor elektrische of magnetische storingen.

Belangrijke nadelen van dit moment zijn, dat de kostprijs over het algemeen hoger ligt dan bij mechanische sensoren [23], dat de betrouwbaarheid onder productie-omstandigheden nog niet altijd bewezen is en dat er nog niet veel uitontwikkelde optische meettechnieken zijn voor een industriële omgeving [63].

Voor 1-dimensionale metingen berusten de methoden op:

- meting van de looptijd; het tijdsverschil tussen het uitzenden van een lichtpuls en de detectie van de reflectie wordt gemeten.
- meting van het faseverschil; in wezen dezelfde methode als hierboven, alleen wordt hier het faseverschil gemeten van een sinusvormig gemoduleerde golf.
- meting m.b.v. een lichtscherf; met een laser wordt een dunne lijn op een voorwerp geprojecteerd. De projectie wordt met een camera afgebeeld. Uit de afbeelding wordt de vorm van het voorwerp teruggerekend.
- triangulatie; in wezen dezelfde methode als hierboven, alleen wordt hier een punt geprojecteerd.
- astigmatische focussing; deze methode wordt in autofocussystemen gebruikt. Met een cilinderlens wordt een focusvlek op een kwadrantdetector afgebeeld. De ellipticiteit van de vlek is een functie van de afstand tot het object.

Voor 2-dimensionale metingen komen in aanmerking:

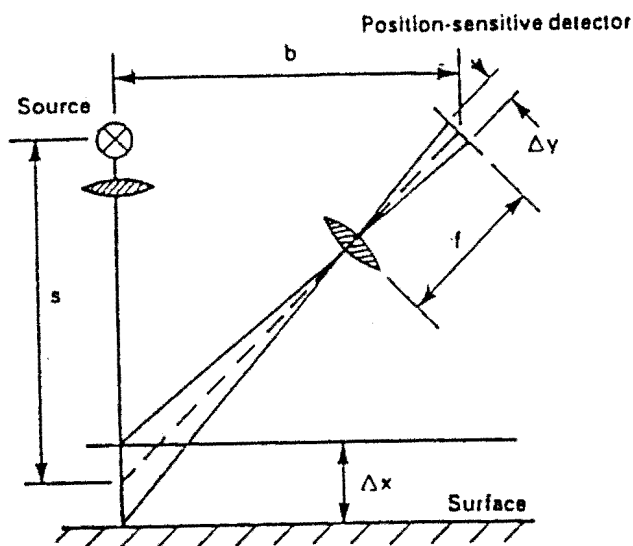
- metingen met gestructureerd licht; een rooster wordt op een werkstuk geprojecteerd. Met camera's wordt een beeld gevormd. Via triangulatie-berekeningen wordt het oppervlak teruggerekend. Een variant hierop vormt de Moiré-techniek, waarbij twee roosters worden gebruikt, die samen een Moiré-patroon vormen.
- systemen op basis van beeldbewerking; afgezien van de hierboven genoemde toepassingen worden contouren opgezocht en de posities van overgangen op de sensor berekend.

Tiziani [42] geeft in een tabel een vergelijking van de haalbare resolutie van een aantal optische meettechnieken.

Verfahren	Auflösung
Radiometrische Verfahren: - Einkanal - Zweikanal - Weißlicht-Fokussierverfahren	30 nm
Astimatische Fokussierverfahren	0,1 μm
Auswertung der Kantensteilheit im Bild	0,1 μm
Lichtschnittverfahren	10 μm
Strukturierte Beleuchtung - Moiré	50 μm
Triangulation	0,1 % vom meßbereich
Interferometrie	0,1 nm
Specklebewegung	1 μm
Radarverfahren - Laufzeitmessung - Phasenmessung	1 mm 0,3 mm

3.2.2 Triangulatiesensor

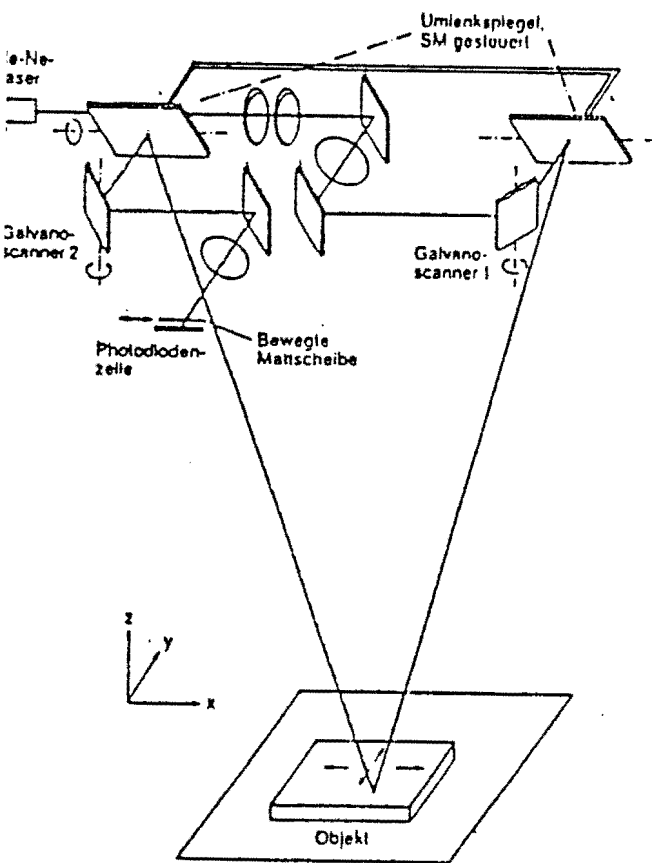
Door een laserdiode wordt een goed gedefinieerde lichtbundel naar een oppervlak gestraald. Dit oppervlak, dat een zekere ruwheid heeft, reflecteert strooilicht dat met een lens op een positiegevoelige-detector (psd) wordt afgebeeld (zie figuur 2). Als het oppervlak een translatie x ondergaat dan zal de lichtvlek op de detector een verschuiving y ondergaan. Tussen x en y bestaat een lineaire relatie [6, 12, 25, 30, 31, 42, 54].



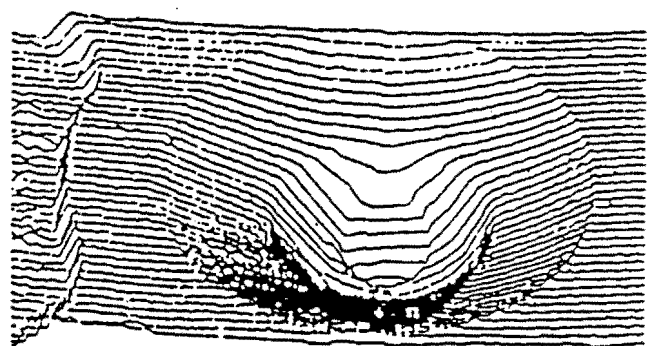
Figuur 2: Meting van de verplaatsing door middel van de triangulatiemethode [21].

Door de optische lay-out kan het meetbereik van de sensor variëren tussen 1 mm tot enkele meters (praktijk: ongeveer 1 meter). De resolutie van de sensor ligt tussen de 0,1 % en 0,01 % van het meetbereik. De in de praktijk maximaal haalbare meetnauwkeurigheid is 0,1 % van het meetbereik (tot ongeveer 10 μm) [21, 25, 29]. De hoogste in de literatuur vermelde onnauwkeurigheid is 1 μm . De eigenschappen van de lichtvlek bepalen de meetnauwkeurigheid. Bij gepolijste oppervlakken is de terugverstrooide intensiteit zo laag, dat geen afstand gemeten kan worden. Pas bij geslepen oppervlakken ($R_z = 12$) ligt de onnauwkeurigheid meestal bij de door de leverancier gespecificeerde waarde [25, 29, 30, 31]. Ook de verdeling van de verstrooiing heeft invloed op de nauwkeurigheid van de meting. Met een psd wordt het zwaartepunt van de intensiteitsverdeling van de lichtvlek gemeten. Dat betekent dat een fout wordt geïntroduceerd als deze inhomogeen is. Verder wordt de meetnauwkeurigheid beïnvloed door de hoek waaronder het te meten oppervlak wordt aangestraald. O.a. Philips heeft een triangulatiesensor ontwikkeld met twee psd's, waarbij deze meetproblemen worden ondervangen. De afwijking t.g.v. een inhomogene lichtverdeling kan ook verminderd worden door met CCD lijnarrays te werken. Hierbij worden de grenzen van de lichtvlek bepaald door kantdetectie.

De sensor is niet geschikt voor het meten van kleine objecten [12], zodat de toepassingen vooral te vinden zijn bij het meten (of scannen) van relatief grote oppervlakken. Door de introductie van roterende spiegels worden hoogteprofielen van lijnen en oppervlakken bepaald. Zo wordt een systeem beschreven, waarbij het hoogteprofiel van een oppervlak van 150 x 150 mm wordt gemeten met een raster van 200 meetpunten per lijn en een laterale onnauwkeurigheid van 0,3 mm [19, 42]. Het principe wordt weergegeven in figuur 3. Figuur 4 laat een 3D-beeld zien van een met dit principe gemeten cilinderkop van een motor.



Figuur 3 : Scannende sensor gebaseerd op het triangulatieprincipe [42]



Figuur 4 : 3D-beeld van een gescande cilinderkop [42]

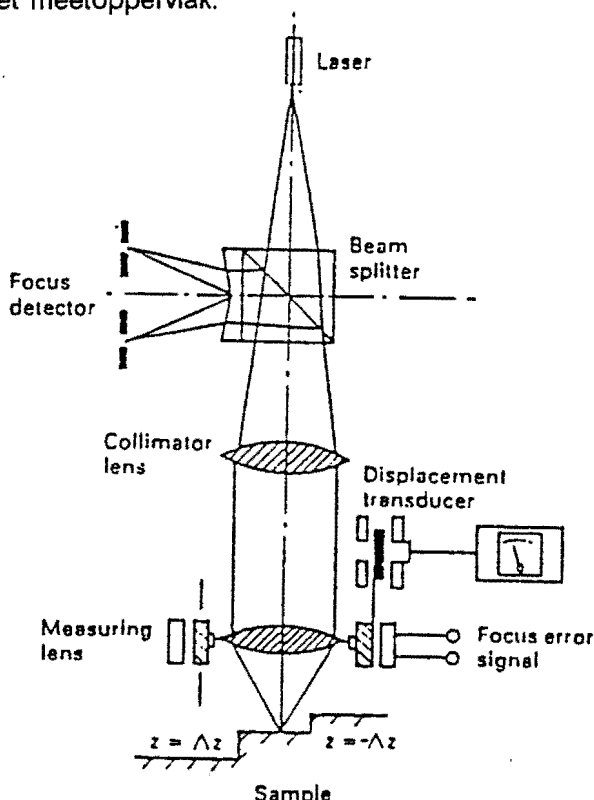
Bij de toepassing van triangulatie sensoren in meetmachines blijft de bereikbaarheid van kleine vormelementen een probleem [26]. Zeiss levert een triangulatietaster op een 'dreh-schwenk' inrichting, waarmee contouren gevolgd kunnen worden [25]. De meetafstand is 150 mm, het meetbereik 60 mm. De lichtvlek heeft een diameter van 0,3 mm. De meetnauwkeurigheid is $4\mu\text{m}$ bij een meetfrequentie van 40 Hz. Maar ook hier kunnen door de vrij grote meetafstand kleine vormelementen niet bereikt worden. De taster wordt voornamelijk gebruikt bij het scannend meten van vrije vormen, zoals bij de toepassing van triangulatiesensoren in een productieomgeving geldt nog, dat stof en omgevingslicht de meting kunnen verstoren. In de automobieliindustrie worden ze gebruikt bij de meting van carbody-delen en kleimodellen [6, 12]. In de vliegtuigindustrie worden ze wel gebruikt om romp- of vleugeldelen te meten en voor het meten van turbineschoepen [31].

3.2.3 Lambda-sensor

De lambdasensor werkt volgens een van het triangulatieprincipe afgeleide meetmethode [29]. Hij meet de (scan-)tijd die een laserbundel nodig heeft om van een referentiepunt te bewegen naar een punt op het oppervlak van het meetobject [29, 42]. Het meetbereik ligt tussen de 25 mm en de 10.000 mm [29]. De resolutie bedraagt 0,0015 % van het meetbereik. De meetnauwkeurigheid van de lamda-sensor ligt in de orde van grootte van 0,01 % van het meetbereik. Afgezien van de hoge nauwkeurigheid is een voordeel van de lambda-sensor dat hij in grote mate onafhankelijk is van de stand van het meetoppervlak ten opzichte van de optische as van de sensor [29].

3.2.4 Autofocussensor

Door een dynamisch focuseringssysteem is deze gevoelige sensor in staat om snelle oppervlaktevariatiës te volgen [19, 23]. De divergerende bundel van een halfgeleider laser wordt door een lens gecollimeerd (zie figuur 5) en vervolgens door een tweede lens gefocusseerd op het meetoppervlak.



Figuur 5: Meting van de verplaatsing d.m.v. dynamische focussing [21]

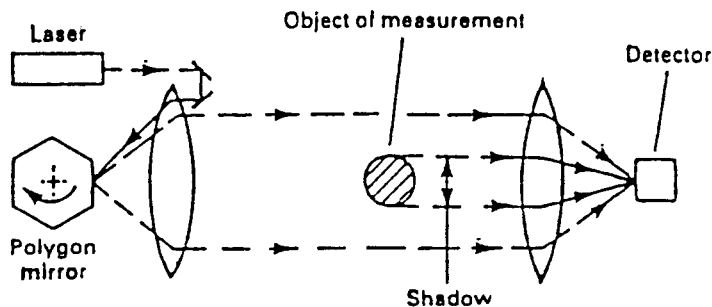
De gereflecteerde bundel wordt vervolgens door hetzelfde lenzenstelsel en een halfdoorlatende spiegel via een bundelsplitser op twee fotodiodes geprojecteerd. De meetsignalen van de twee fotodiodes, vormen een maat voor de focusering, die bijgesteld wordt door de focuseringslens te verplaatsen. Deze is verbonden met een inductieve verplaatsingsopnemer.

Het meetbereik kan, afhankelijk van de optiek, variëren van 3 μm tot 300 μm , waarbij de resolutie respectievelijk kan variëren van 0,003 μm tot 0,3 μm . De meetsnelheid kan oplopen tot 500 Hz [21, 23]. Het systeem is voor vrijwel elk oppervlak geschikt omdat zelfs bij een reflectie van 1 % nog gemeten kan worden.

Toepassingen van dit meetsysteem zijn er vooral bij het precisiepositioneren van objecten en bij het meten van oppervlakteparameters.

3.2.5 De laser-scanner

De laserscanner is ontwikkeld voor de statische en dynamische meting van diameters. Een laserbundel wordt door een roterend polygoon afgebogen, zodat hij via een lens een vlak doorloopt. Via een tweede lens valt de bundel op een fotodetector (zie figuur 6) [20, 21]. Indien zich tussen de twee lenzen een voorwerp bevindt, dan wordt de fotodiode afgedekt gedurende een periode waarvan de tijdsduur afhangt van de diameter van het voorwerp en van de scansnelheid van de laserbundel.



Figuur 6: Meting van de diameter van een as door middel van de laser-scanning [21].

De scansnelheid kan variëren tussen de 45 Hz en 660 Hz, terwijl de scanbreedte kan oplopen van 1 mm tot 450 mm [21]. De resolutie kan variëren van 0,1 μm tot 5 μm . Voordeel van deze meetmethode is dat ze relatief ongevoelig is voor trillingen en slingeringen van het te meten object. Daarnaast kan het systeem redelijk eenvoudig beschermd worden tegen vervuiling.

Dit meetprincipe wordt ingezet om diameters en vormafwijkingen van ronde werkstukken te controleren [20, 21].

3.3 De CCD-camera

3.3.1 Inleiding

De CCD-camera gebruikt een solid-state sensor, die beeldinformatie omzet in potentiaalverschillen. Deze informatie wordt verzameld en serieel uitgevoerd als een analog video-sig-naal. Nadat dit gedigitaliseerd is wordt de beeldinformatie opgeslagen en verwerkt in een computer [35, 37, 41].

Voordelen van de CCD-camera ten opzichte van een conventionele elektronische camera zijn:

- kleiner formaat;
- minder kwetsbaar voor mechanische belastingen;
- betere geometrische definitie van het beeldveld [36].

Met de ontwikkeling van de CCD-camera en de daar aan gekoppelde beeldverwerking is een optisch meetmiddel verkregen dat in bepaalde toepassingen kan concurreren met mechanische meetmiddelen. Naast het uitvoeren van meetoperaties probeert men de CCD-camera in te zetten voor visuele inspecties van objecten als vervanging van de mens. Camera's worden in de meettechniek vooral ingezet op de volgende gebieden [24]:

- meten van defecten van oppervlakken
- meten van grote vormafwijkingen, zoals de afwezigheid van vormelementen
- meten van kleine vormafwijkingen in de geometrie van vormelementen

O.a. met behulp van camera's moet het fabricageproces verder geoptimaliseerd worden om een constante kwaliteit te kunnen waarborgen.

De voordelen zijn al onder 3.2.1 genoemd.

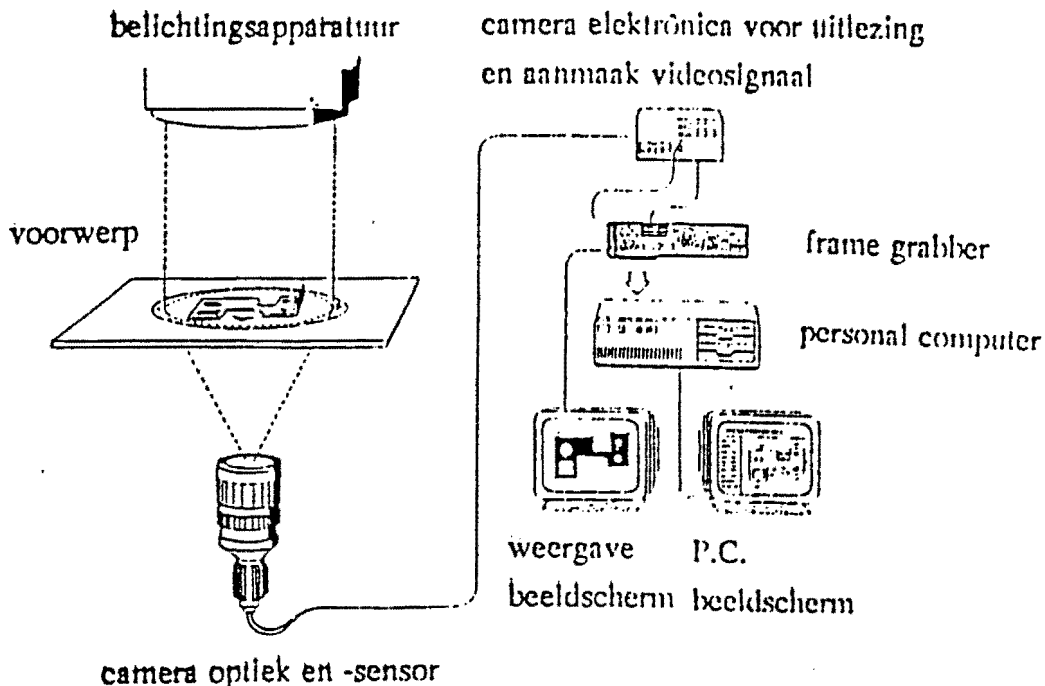
Daarenboven zijn in vergelijking met visuele controle, met name van defecten, de voordelen:

- de beoordeling is manonafhankelijk
- de methode kan goed opgenomen worden in een geautomatiseerd systeem

Een belangrijk nadeel is dat de hardware (camera, beeldbewerkingssysteem, interface en de belichting), benodigd om metingen optisch te kunnen uitvoeren, vaak veel duurder is dan vergelijkbare mechanische meetapparatuur.

De CCD-camera bevat een optische sensor (de Charge Coupled Device) die een 2D-beeld van een voorwerp kan opnemen, dat vervolgens kan worden opgeslagen in het geheugen van een computer.

De sensor bestaat uit een groot aantal lichtgevoelige elementjes (pixels) in een matrix. Elk van de pixels kent aan een beeldpunt ($10 \times 10 \mu\text{m}$) een grijswaarde toe. Zo wordt het beeld opgedeeld in 512×512 pixels, elk met 256 grijswaarden. Voor processen waarbij de meet-snelheid van belang is worden de grijswaarden door het aanleggen van een drempel verdeeld in zwart en wit. Dit gebeurt bij de inspectie van produkten die in massa worden geproduceerd (zie figuur 7).



Figuur 7: Uitvoering van een beeldverwerkend systeem [35].

Een beeldbewerkingssysteem wordt opgebouwd uit de volgende elementen:

- de belichting
- de CCD-camera met objectief
- de sturing van de camera
- de camera-interface, 'frame-grabber'
- de computer, vaak een P/C
- programmatuur

Indien alleen een zwart-wit beeld wordt gegenereerd dan is de maximaal bereikbare meet-
onnauwkeurigheid één pixel. De daarbij horende meetonnauwkeurigheid van het voorwerp
hangt af van de vergroting van de optiek.

Indien een beeld wordt opgebouwd uit grijswaarden dan kan gebruik worden gemaakt van
sub-pixel interpolatietechnieken. Ten behoeve van randdetectie van objecten kunnen daarmee
meetonnauwkeurigheden worden gehaald van 0,1 pixelgrootte. Bij een matrix-camera wordt
hierdoor de meetonnauwkeurigheid 0,02% van het meetgebied.

Een andere uitvoering van een CCD-camera is de lijncamera met één rij pixels. Voordelen
van de lijncamera zijn:

- het systeem is goedkoper, doordat de sensor eenvoudiger van opbouw is;
- de camera is sneller doordat de uitlezing van de beeldinformatie eenvoudiger is; de
data-input naar de computer is lager
- de resolutie is hoger, doordat er sensoren zijn met maximaal 4096 pixels

Een nadeel van dit type sensor is dat een vlak beeld niet in één keer kan worden opge-
bouwd maar uit een aantal beeldlijnen moet worden samengesteld, zodat er een mecha-
nische beweging toegevoegd moet worden. Met subpixel-interpolatis is de meetonnauw-
keurigheid van een lijncamera maximaal 0,0025 % van het meetgebied.

De kwaliteit van het opgeslagen videobeeld is afhankelijk van:

- de belichting die wordt gebruikt om het voorwerp te belichten [43, 44, 45], waarbij de
optimale belichting afhangt van het voorwerp en de aard van de randen van de geo-
metrie-elementen waaruit het object is opgebouwd;
- de kwaliteit van de afbeeldingsoptiek van de camera [43, 44, 45];
- de kwaliteit van de elektronica die het beeld op de sensor overzet naar het beeldge-
heugen in de computer [35].

Bij geometrische metingen worden vormelementen softwarematig benaderd door algoritmen.
Voor specifieke meetproblemen worden specifieke algoritmen ontwikkeld. Voor de brede
toepassing van deze meetmethode vormt dat een belangrijke belemmering. Daarom worden
nu meer universele algoritmen ontwikkeld voor een breed toepassingsgebied, waarbij voor-
lopig geldt dat een universeel algoritme niet voor alle soorten randen even betrouwbaar is
[43].

Bij de ontwikkeling van cameratechnieken voor produktinspectie stuit men op het probleem
dat het inlezen van de videobeelden vaak niet nauwkeurig genoeg is om er geometrische
metingen mee te kunnen uitvoeren. Verder is de tijd, nodig voor de beeldbewerking soms te
lang. Hier wordt veel ontwikkelingsinspanning gestoken in parallele computers.

Vooraf bij de inspectie voor massa produkten worden camera's gebruikt. Een voorbeeld
hiervan is de controle op geometrische dimensies van gestanste scheermessen. Er is ook
veel literatuur over 2D geometrische metingen met camera's.

3.4 De coördinatenmeetmachine

3.4.1 Inleiding

Een van de meetmiddelen die steeds meer wordt toegepast bij geometrische controles van werkstukken is de CNC-coördinatenmeetmachine. De basisfunctie van deze machine is relatief eenvoudig, namelijk het vastleggen van coördinaten van een ruimtelijk object ten opzichte van een nauwkeurige referentie.

De machine is altijd opgebouwd uit 3 geleidingen met meetlinialen die loodrecht ten opzichte van elkaar zijn geconfigureerd en aldus een coördinatensysteem opspannen. Soms is de 3D-meetmachine ook nog uitgerust met een rotatietafel en/of met een palletwisselaar [2, 5]. Sinds hun introductie rond 1970 hebben deze meetmachines een grote ontwikkeling door-gemaakt waarbij het toepassingsgebied is uitgebreid van de klassieke meetkamer (post-process) tot de zelfstandige meetcel of geïntegreerd in de produktielijn (inter-process). De meetmachine kent een aantal voordelen [1, 4, 5, 13, 14, 15, 16]:

- universeel; inzetbaar voor het meten van geometrische elementen;
- flexibel: snelle en economisch verantwoorde aanpassing van software om andere geometrische elementen te meten;
- nauwkeurig: binnen grenzen een voorspelbare meetonnauwkeurigheid ongeacht de vorm van het te meten object. Dit is te danken aan het feit dat steeds van hetzelfde meetsysteem gebruik wordt gemaakt.
- economisch: bij gebruikmaking van de mogelijkheden van de meetmachine economischer dan de vele andere meetmiddelen;
- snelheid: een voorwerp kan met relatief grote snelheid worden gemeten, gecombineerd met een automatische data-opslag.

Als belangrijkste nadelen kunnen worden genoemd:

- coördinatenmeetmachines zijn relatief duur;
- veelal is een geconditioneerde meetruimte nodig om van de gespecificeerde meetonnauwkeurigheid gebruik te kunnen maken.

De 3D-meetonnauwkeurigheid ligt tussen 0,2 mm en 0,003 mm. Hij is afhankelijk van de grootte van de meetmachine en de omgevingscondities waaronder de machine moet opereren.

Een belangrijk onderdeel van de machine is het tastersysteem [2]. Hiermee worden ofwel mechanische ofwel optisch de coördinaten van een " aangetast " punt bepaald.

Zowel de machine als de tastersystemen maken op dit moment nog steeds belangrijke ontwikkelingen door [1, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 15, 18, 25 br]. Er wordt veel werk verricht aan meetmachines om ze geschikt te maken voor inzet op de werkvloer. De ontwikkeling, waarbij deze omkast worden tot een meetcel moet gezien worden als een voorlopige oplossing. Er wordt veel werk besteed aan de temperatuurhuishouding, die de meetmachines geschikt moet maken voor een omgeving met sterk wisselende temperaturen. Aangezien moderne verspaningsmachines geleverd worden als afgesloten systeem, is er weinig vuilbelasting te verwachten. Alleen in omgevingen, waar vuil minder goed beheerst wordt, zoals gieterijen moet de meetmachine alsnog omkast worden. Het werkstuk moet uiteraard wel ontdaan worden van snijvloestof en bewerkingsresten voor het gemeten kan worden. Daarnaast worden meetmachines uitgerust met contactloze triangulatie tasters en CCD-camera's, die de meting sneller maken.

Een belangrijk hulpmiddel voor de integratie van de meetmachine is het tasterwisselsysteem [62], waardoor gedurende het uitvoeren van een meetprogramma automatisch van taster(configuratie) kan worden gewisseld. Dit biedt dus de mogelijkheid om produkten in principe onbemand te meten.

3.4.2 Snelheid, versnelling van de machine [1, 4, 5]

Circa 60 % van de tijd die een object op de meetmachine doorbrengt is effectieve meettijd (zie figuur 8) zodat het bij de meeste meetmachines zeker zin zal hebben om de maximale snelheid te vergroten. Hierdoor kunnen meerdere produkten per tijdseenheid worden gemeten. Daarnaast zal het zin hebben om de versnellingen te vergroten zodat de machine eerder zijn maximale snelheid bereikt en weer stilstaat.

Het vergroten van de snelheid en de versnellingen zal vooral effect hebben bij machines die grotere produkten moeten meten waarbij de meetpunten relatief ver uit elkaar liggen. Bij dit alles dient wel te worden meegenomen dat de ernst van de schade bij botsingen groter kan zijn en dat het dynamisch gedrag van de machine moet worden afgestemd op de hogere snelheden en versnellingen.

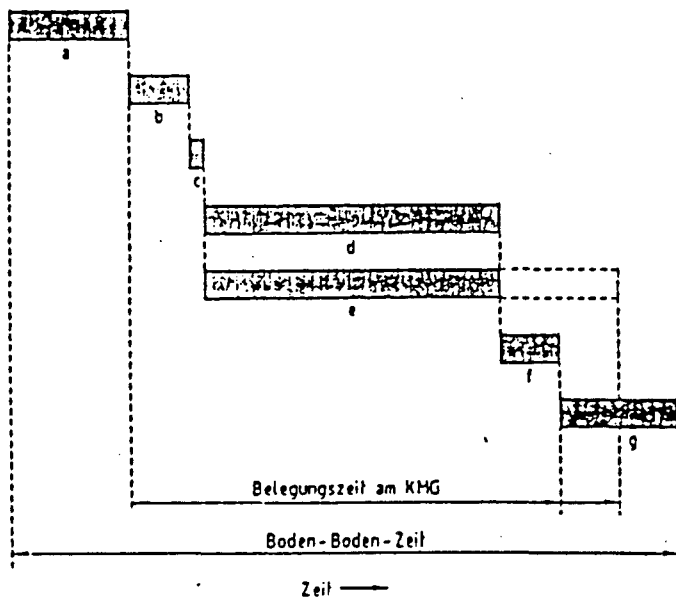


Bild 4. Zeitanteile für einen Meßauftrag
a: Werkstück aufspannen, b: Werkstück zuführen, c: Starten des Meß-
laufs, d: Messen, e: Protokollieren, f: Werkstück abführen, g: Werk-
stück abspannen

Figuur 8: Tijdsbestedingen bij het meten van een object [4].

3.4.3 Materialen [1, 4, 5, 52]

Omdat steeds hogere eisen worden gesteld aan de meetnauwkeurigheid onder slechte meetcondities, moeten het dynamisch en thermisch gedrag van de meetmachines worden verbeterd [1]. Het dynamisch gedrag van de machine is van belang omdat dit een maat is voor de manier waarop de machine reageert op trillingen van interne of externe oorsprong. Dit gedrag beïnvloedt de meetnauwkeurigheid [16].

Het dynamisch gedrag van de machine wordt door drie grootheden bepaald [52]:

- de statische/ dynamische stijfheid [5, 52];
- de massaverdeling van de machine [52];
- de demping in de constructie [52].

Om het totale dynamisch gedrag van de machine te verbeteren moeten de elementen van de machine licht van constructie en stijf zijn en ze dienen stijf met elkaar verbonden te zijn.

Daarnaast moet de demping van de totale constructie hoog zijn.

Er wordt ook getracht om de effecten van eindige statische stijfheid te beperken door middel van constructieve verbeteringen [52].

Om de nauwkeurigheid van de machine te kunnen garanderen in een ruimte waarin de temperatuur redelijk snel kan variëren (productie-ruimte) dient het materiaal van de meetmachine de temperatuur goed te geleiden en dient de warmtecapaciteit klein te zijn. Hierdoor ontstaan geen ongewenste vervormingen en wordt na korte tijd weer een stabiele toestand bereikt, waarin metingen kunnen worden uitgevoerd [4,16,64].

3.4.4 Softwarecorrectie [5,13].

Softwarecorrectie heeft de laatste jaren bij meetmachines een steeds grotere betekenis gekregen doordat hiermee afwijkingen kunnen worden gecorrigeerd die anders niet, of slechts met hoge kosten, kunnen worden vermeden. Een voorbeeld hiervan is de softwarematige correctie van geometrische afwijkingen van geleidingen. Ze hebben rechtheids- en rotatie-afwijkingen. Daarnaast heeft een meetmachine ook nog drie haaksheidsafwijkingen en drie liniaalafwijkingen. Meetpunten kunnen softwarematig gecorrigeerd worden voor de totale afwijking die de machine op die posities heeft.

In de praktijk worden de meeste nauwkeurige meetmachines al gecorrigeerd voor uitzetting van de meetlinialen.

Daarnaast leveren sommige fabrikanten machines met temperatuursensoren die op het te meten object kunnen worden bevestigd. De computer kan dan corrigeren voor het temperatuurverschil dat bestaat tussen de meetlinialen en het meetobject [4]. Dit levert echter niet het altijd het gewenste resultaat op, bijvoorbeeld doordat er een temperatuurgradiënt aanwezig is in het meetobject.

In de toekomst zal de meetmachine worden gecorrigeerd voor afwijkingen van de geleidingen die het gevolg zijn van de thermische belasting uit de (productie-)omgeving [5, 13], alhoewel snelle temperatuursveranderingen te allen tijde vermeden dienen te worden [16]. Door temperatuursinvloeden gaat de meetmachine uitzetten en vervormen, effecten die in de tijd gezien dus niet constant zijn. Om dit te realiseren zal echter nog veel onderzoek nodig zijn naar de effecten van temperatuurgradiënten op de structuur van de meetmachine.

Doordat een meetmachine uit bewegende delen bestaat treden er altijd trillingen op die invloed kunnen hebben op de meetresultaten. Door de afwijkingen geïntroduceerd door het dynamisch gedrag van de machine te meten en te analyseren wordt onderzocht of voor deze afwijkingen softwarematig gecorrigeerd kan worden.

3.4.5 Tastersystemen [5]

Vrijwel alle meetmachines die op dit moment in gebruik zijn werken met een mechanisch tastersysteem. Dit betekent dat de meetmachine alleen coördinaten van een object kan vastleggen door contact te maken met het object. Bij mechanische tastersystemen kunnen twee basisprincipes worden onderscheiden:

- de metende tastersystemen;
- de schakelende tastersystemen.

Het voordeel van de schakelende tastersystemen is dat deze goedkoper zijn, lichter van gewicht zijn en minder omvangrijk dan de metende tastersystemen. Een van de belangrijkste nadelen van schakelende tastersystemen is echter dat ze door hun fysisch principe minder nauwkeurig zijn dan de metende tastersystemen. Ten gevolge van de steeds nauwkeuriger wordende meetmachines zullen de (schakelende) tastersystemen een steeds groter aandeel hebben in de totale meetnauwkeurigheid van de meetmachine [9]. In de toekomst kan dan ook verwacht worden dat onderzoeksactiviteiten zich zullen richten op de verbetering van deze schakelende tastersystemen [59].

Op dit moment worden meetmachines op de markt gebracht die zijn uitgerust met een mechanische taster gecombineerd met een optische taster [6, 8]. Dit kan een triangulatietaster zijn of een CCD-camera met een belichting.

Het voordeel van een optisch systeem is dat hiermee zeer snel voorwerpen en geometrieën kunnen worden gemeten die anders niet, of zeer moeizaam, met een mechanisch tastersysteem gemeten zouden moeten worden [48]. Voorbeelden hiervan zijn flexibele producten zoals folies en rubber onderdelen en zeer kleine radii en boringen [6].

Met een dergelijk systeem kan gemeten worden met een reproduceerbaarheid van respectievelijk $4,3 \mu\text{m}$ en $1,3 \mu\text{m}$, afhankelijk van de ingestelde vergroting [61].

De voordelen van triangulatiesensoren [6, 12, 18, 21, 25, 29] zijn, dat ze zeer snel oppervlakken kunnen scannen, een groot meetbereik hebben met een acceptabele meeton nauwkeurigheid en dat ze zijn eenvoudig te bedienen zijn [6].

3.4.6 Ruwheidsmeters voor coördinatenmeetmachines

Ten gevolge van technologische ontwikkelingen is het belangrijk om ruwheidsparameters, waarmee een oppervlak kan worden beschreven, te kennen [48]. In praktisch alle gevallen worden ruwheidsparameters vastgesteld met behulp van ruwheidsmeters die op een vaste lokatie staan opgesteld of met handruwheidsmeters. Ruwheidsparameters worden in de productie onder andere gemeten om de slijtage en de kwaliteit van gereedschappen vast te stellen.

Op dit moment is er ook een ruwheidsmeetsysteem dat wordt gehanteerd, door een coördinatenmeetmachine [7]. De ruwheidsmeter wordt hierbij op de plaats van de taster gehangen. De meetmachine wordt alleen gebruikt om de taster op een bepaald oppervlak te plaatsen. De voortbeweging van de tasternaald wordt door de ruwheidsmeter zelf verzorgd. De ruwheidsmeter heeft zijn eigen referentie en gebruikt niet de geleiding van de meetmachine. Deze ruwheidsmeterunit kan worden gebruikt met een automatisch tasterwisselsysteem.

3.5 Andere toepassingsgebieden

3.5.1 Gereedschapscontrole

Door de verdere automatisering van het bewerkingsproces is er ook behoefte aan beheersing van de kwaliteit van het gereedschap. Door de bewerking slijt de snijkant en verder is er gevaar voor breuk. In [63] worden verschillende methoden beschreven om contactloos deze metingen te verrichten. Bij slijp- en freesbewerkingen kan de slijtage in-proces gemeten worden door een lichtvlekje te projecteren op de snijkant. De hoeveelheid terugverstrooid licht is een functie van de slijtage. De meetmethode is uitvoerig bestudeerd onder laboratoriumomstandigheden, maar wordt nog niet industrieel toegepast. De geclaimde onnauwkeurigheid bedraagt $1 - 3 \mu\text{m}$.

Een alternatief is de spleetdetectie, waarbij de afstand tussen het werkstukoppervlak en een vast punt op het gereedschap continu wordt gemeten. Hiervoor is een optische methode onderzocht, die berust op triangulatie. De onnauwkeurigheid is $2 - 4 \mu\text{m}$, maar de meting wordt verstoord door snijolie. Alleen een pneumatische systeem wordt op de markt aangeboden, maar hiervan wordt de nauwkeurigheid aangetast door temperatuur effecten en oppervlakte ruwheid van het werkstuk [63].

Bij een intermitterend proces kan inter-proces gemeten worden. Een voorbeeld hiervan is een systeem bestaande uit een microscoop en een CCD-camera, die op de machine worden geïnstalleerd [43]. Tussen twee bewerkingsgangen wordt het gereedschap voor de microscoop gepositioneerd en de slijtage en eventuele beschadigingen van de snijkant kunnen worden bepaald. De dimensies van het beitelpunt worden gerelateerd aan een referentieobject dat dezelfde randkenmerken heeft als de beiteland.

Hierdoor zijn de afwijkingen ten gevolgen van belichting voor de beitel en het referentie-object hetzelfde. Voordat een meetcyclus start wordt eerst het referentie-object gemeten om het camera-systeem in te stellen. Het totale systeem kan met een meetnauwkeurigheid van maximaal 2,5 μm een beitelnulpunt instellen.

3.5.2 Oppervlaktemeting

Door de vraag naar een hogere produktkwaliteit is er behoefte aan meetmethoden voor oppervlaktparameters met de volgende eigenschappen:

- snelheid, zodat 100% gemeten kan worden
- meten van vlakken, eventueel in combinatie met defect-analyse
- mogelijkheid tot automatisering

Hierdoor wordt intensiever gekeken naar contactloze meetmethoden. Voor oppervlakte metingen zijn een aantal methoden in ontwikkeling:

- directe profielmeting met autofocus, eventueel triangulatie en interferometrie
- indirecte oppervlaktemeting, zoals verstrooiing en spikkelmethode

De standaard ruweidsmeting is de contactstylus met een puntradius van 1 - 12 μm . Een probleem vormt de vergelijking van optische methoden met de stylusmeting. Zonder al te diep op de verschillende technieken in te willen gaan geven we onderstaand in een aantal tabellen karakteristieke meetwaarden:

Tabel 1 Geräte für das autofokus-Verfahren [19]

Gerät (Hersteller)	Meßbereich μm	Auf-abstand nm	Meß durchm. nm	Fokus- μm
RM 600 Laser Stylus (Rodenstock, München)	± 300 ± 30 ± 3	± 200 ± 20 ± 2	1	1
Focodyn (Rodenstock) optische Mikrotaster für Perthometer	max. ± 250	keine Angabe	0,9	1
UB 16 Präzisionsopt. Längenmeßsystem (Breitmeiler, Stuttgart)	± 500 ± 50	0,5 % des Meß- bereichs	2	1,7 (Standard)

Tabel 2 Interferometrische Phasenmeßgeräte mit CCD camera

Gerät	Topo-2D	Top-3D
Vertikale Höhenauflösung (unabhängig von der Vergrößerung)	$\pm 0,1 \text{ nm}$	$\pm 0,3 \text{ nm}$
Laterale Bereichsauflösung	$\pm 1,3 \mu\text{m}$	$\pm 4,0 \mu\text{m}$
Profilbereich	1,3 mm	1,0 x 1,0 mm ²
Meßabstand	----- 4,5 mm -----	
Max. Höhenbereich	----- 5,2 μm -----	

Tabel 3 Streulicht-Oberflächenmeßgerät

Gerät (Hersteller)	Meßbereich	dynam. Messung Objektgeschw. v
RM 400 (Rodenstock, München)	$R_z \approx 0,05 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$	möglich: v beliebig
Profile Analyzer RM 500 (Rodenstock)	$R_z \approx 0,05 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$: $\alpha \approx 20^\circ$ bis 2°	möglich: Rauheit: v beliebig: Formabweichung: $v \leq 0,4 \text{ m/s}$
Automation 500 (Automation W + R, München)	$R_z \approx 0,01 \mu\text{m}$	möglich: bzw. v keine Angabe

Van een seriematig vervaardigd werkstuk moeten vaak afwijkingen aan het oppervlak worden gecontroleerd. Dit zijn beschadigingen, vuil, afwerkings- en materiaalfouten. Met belichting via een refrorreflector wordt in een camera een beeldcontrast opgebouwd, onafhankelijk van de invalshoek en de kromming van het oppervlak. Het beeld wordt gedigitaliseerd, waarna met een computer de oneffenheden worden geclassificeerd. Met het in [58] beschreven principe kunnen oppervlakken van 10 cm breed worden gecontroleerd. Deze methode is geschikt om onder andere de lakafwerking van autocarrosseriën te controleren.

3.5.3 Lengtemeting in de bewerkingsmachine

Metingen kunnen in-proces of inter-proces worden uitgevoerd. [3] geeft een lange lijst van voorwaarden, waaraan in-proces meetapparatuur moet voldoen:

- het meetinstrument mag geen invloed uitoefenen op de werking van de machine of op de bewerking zelf
- de meetresultaten moeten onafhankelijk zijn van de eigenschappen van machine en werkstuk en van omgevingsinvloeden, zoals vuil, spanen, snijolie, trillingen en temperatuurverloop
- het meetinstrument moet betrouwbaar zijn en het moet weinig onderhoud vergen
- het meetinstrument moet eenvoudig te calibreren zijn
- de onnauwkeurigheid moet liggen tussen 0.01 - 0,001 mm

Deze voorwaarden zijn dermate zwaar, dat tot nu toe alleen bij slijpbewerkingen in-proces de diameter van het werkstuk gemeten wordt met inductieve opnemers. Er zijn andere meetinstrumenten in ontwikkeling waar met name de onafhankelijk van omgevingsinvloeden bij industrieel gebruik nog niet is opgelost.

Voor inter-proces metingen zijn de mogelijkheden wat ruimer, omdat dan het werkstuk gereinigd kan worden voor de meting. Er zijn machines die zijn uitgerust met verschillende soorten tasters om van ingespannen werkstukken afmetingen te meten.

In [63] wordt een overzicht gegeven van verschillende sensoren:

type	methode	onnauwk., (μm)
mechanisch	roller	10
	kaliber	6
optisch	micrometer	10
	reflectie	10
pneumatisch	drukmeting	2 - 10
ultrasoon	looptijd	4
elektronisch	inductief	10
	capacitief	10

Pneumatische sensoren worden industrieel toegepast [63]. Als echter de omtreksnelheid van het werkstuk hoger wordt dan circa 1/3 van de uitstroomsnelheid van de lucht, treden dermate grote afwijkingen op, dat niet meer volgens de calibratie gemeten kan worden. Verder is het dynamisch gedrag van de sensoren slecht, zodat alleen gemiddelde waardes worden gemeten.

3.5.4 2D-meetbanken en profielprojectoren

Profielprojectoren met camera's en andere contactloze meetsystemen kunnen vanuit een CAD-systeem worden geprogrammeerd, waarbij mbv. de ingebouwde gegeneraliseerde algoritmen automatisch de aangegeven kanten worden aangetast. De programmering is ingewikkelder dan die van een contacttaster, omdat de belichting en de beeldvergroting hier ook een rol spelen.

In de literatuur worden een aantal voorbeelden gegeven van meetsystemen met matrix-camera's:

produkt	vormelement	onnauwk. mm	meetgebied mm	meettijd s
stansdeel	lengte,diam.	0,08	45 x 60	0,5/maat
rubberring	diam.	0,04	30 x 22	2,5
veer	lengte	0,05	30 x 40	0,5/maat
draaideel	lengte	0,05	30 x 40	1,5
Vickers putje	lengte	0,004	2 x 3	1
gereedschap voorstelling	lengte	0,002	5 x 6,8	1,2

3.5.5 3D-meettechnieken

Met behulp van Moiré-technieken is het mogelijk om coördinaten vast te leggen van ruimtelijke objecten [27, 49]. Het is mogelijk om on-line metingen aan objecten te verrichten, doordat de beeldbewerkingstijden drastisch gereduceerd zijn door de toepassing van snelle, -parallele computers.

Met behulp van deze methode is het mogelijk om deuken en bollingen van enkele tientallen micrometers in carrosseriedelen van auto's te detecteren [38].

Ook is het mogelijk om met deze methode bijvoorbeeld modellen te digitaliseren zodat de coördinaten in een CAD/CAM-systeem kunnen worden geladen of met een CAD-model kunnen worden vergeleken.

De Moiré techniek in zijn huidige staat van ontwikkeling maakt vormmetingen mogelijk met een hoogteonnauwkeurigheid van 10 - 100 μm bij een meetbereik van meer dan 100 mm. Het meetvlak is maximaal 1 m², waarin 10⁵ coördinaten per sec. kunnen worden berekend. In een industrieel systeem worden precisiecomponenten met een diameter van 200 mm. gemeten. Voor 65000 meetpunten wordt binnen 20 s. de hoogte gemeten met een onnauwkeurigheid van 0,4 μm . Bij een ander systeem worden ruimtelijke objecten met een diepte tot 200 mm gemeten met een onnauwkeurigheid van beter dan 0,02% van het gezichtsveld. Dit is instelbaar tussen 100 - 1000 mm. 250.000 beeldpunten worden binnen 1 s. gemeten [27,38,42].

Onder praktische omstandigheden is de resolutie circa 1/25 van de lijnafstand; onder laboratoriumcondities kan dit oplopen tot 1/100. De laterale resolutie wordt bepaald door de cameramatrix. Bij een 1024 x 1024 pixel sensor is subpixel interpolatie mogelijk tot 1/2 (onder laboratoriumcondities tot 1/10). Omdat bij Moiré een lijndichtheid van meer dan 1000 lijnen over het beeldveld gebruikt kan worden, wordt de resolutie 0,01 % van het meetgebied.

4 BEDRIJFSINVENTARISATIE.

4.1 Inleiding, werkwijze.

De bedrijfsinventarisatie is uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen in de meetproblematiek, zoals die in producerende bedrijven aanwezig is. De hiervoor door het project gestelde kaders waren:

- productie van discrete producten van metaal of kunststof in enkelstuks of kleine series
- beheersing van maatvoering, vorm en oppervlaktegesteldheid
- verbeterde procesbeheersing, leidend tot minder uitval en verkorting van de doorlooptijd

Binnen het project werd onderzocht:

- het huidige gebruik van sensoren en meetsystemen
- het potentieel gebruik van bestaande sensoren en meetsystemen met modificaties
- ontwikkelrends, waaronder 'technology-push' en 'users-pull'

Dit alles met een accent op mechatronica; contactloze positie-sensoren, machine vision en scannende meetmethoden.

Om een breed inzicht te krijgen is een globale verdeling van te bezoeken bedrijven opgezet. Er zijn drie klassen van bedrijven gedefinieerd:

- 1 bedrijven met een eigen ontwikkelafdeling, waarvan de aanpak van meetproblemen als kennis in het project is ingevoerd.
- 2 bedrijven met specifieke meetproblemen, die al of niet zijn opgelost
- 3 bedrijven, die een doorsnede geven van in gebruik zijnde meetmethodieken en meetmiddelen.

Deze laatste groep is als volgt onderverdeeld:

produktiemethode	verspanen		vormen		vervormen plaatbewerking
seriegrootte	enkelst.	serie	enkelst.	serie	serie

Geprobeerd is om in elke groep minstens 1 bedrijf te bezoeken. Daarnaast zijn bedrijven bezocht in de klassen 1 en 2.

Als voorbereiding van de bezoeken is een vragenlijst opgesteld.(zie bijlage)

Een aantal bedrijven is tweemaal bezocht, eerst om kennis te maken, de projectbeschrijving toe te lichten en om een beeld te krijgen van de bedrijfsactiviteiten en de specifieke aanpak van kwaliteitsbeheersing. Tijdens het tweede bezoek werd meer in detail ingegaan op specifieke aspecten, waaronder het meten tijdens het proces (in of inter) en het gebruik van meetmachines.

Bij de bezoeken werd de vragenlijst als richtlijn gebruikt, hij werd niet uitputtend behandeld. De bezoekverslagen zijn ter goedkeuring aan de bedrijven voorgelegd.

4.2 Bezoeken, bevindingen

In totaal zijn 13 bedrijven bezocht en wel volgens de volgende verdeling:

	klein (<100 man)	middel (100 tot 500 man)
gereedschapsmakerij	1	1
machinefabriek voor eindprodukten	1	3
machinefabriek voor produktiemiddelen		2
plaatwerkerij		3
gieterij		2

Het zwaartepunt ligt bij middelgrote bedrijven, omdat:

- al spoedig werd bevestigd dat kleine bedrijven zelden vooruitlopen bij de toepassing van geavanceerde middelen
- grote bedrijven meestal opgesplitst zijn in kleinere eenheden, die zelfstandig opereren.

Bij vrijwel alle bezoeken kwam het onderwerp machine-capability, c.q. proces-capability ter sprake. Voor alle bedrijven geldt, dat de mogelijkheden van het eigen machinepark goed bekend moeten zijn en bewaakt moeten worden. Een aantal bedrijven laat een afnametest door derden uitvoeren bij levering. Een aantal laten tijdens het periodieke onderhoud de leverancier de machine controleren, sommige laten dit doen door een onafhankelijke instantie. De hierbij behorende procedures en middelen vallen buiten het bestek van dit onderzoek. De proces-capability wordt bepaald door de machine-capability en door variabelen, zoals de temperatuur, statische en dynamische belastingen, smering en koeling, gereedschap en werkstukmateriaal. Al deze parameters moeten beheerst worden om een werkstuk volgens specificaties te kunnen vervaardigen. Proces-capability wordt gedeeltelijk door ervaring opgebouwd; hij kan produktspecifiek zijn of specifiek voor een groep gelijksoortige produkten.

In de werkvoorbereiding worden machines gekozen, die de produktspecificaties aankunnen (machine-capability). Er kunnen dan nog afwijkingen optreden op vorm- en plaatstoleranties van de kleine afmetingen door variatie van de procesparameters (proces-capability).

Ook voor de meetmiddelen is de capability-benadering van toepassing, opdat de meetresultaten eenduidig kunnen worden uitgelegd. De kwaliteitsdienst zorgt voor procedures, voor de aanschaf van meetmiddelen en verzorgt de controle hierop. Zij heeft hiervoor standaarden in huis. Zij doet metingen bij de opstart van nieuwe produkten. Hierbij worden functionele maten t.a.v. het proces en t.a.v. de produktfunctie gemeten.

Een ander algemeen kenmerk was, dat de kwaliteitscontrole zelf over het algemeen wordt uitgevoerd door het productiepersoneel. Dit gebruikt daarvoor eenvoudige handmeetmiddelen, zoals hoogtemeter, schuifmaat en micrometer. Soms, niet altijd, houdt het productiepersoneel meetresultaten bij voor procescontrole of om de produkten te kunnen voorzien van meetrapporten. In enkele gevallen werden statistische methoden gebruikt om het proces te bewaken. Er is een behoefte om de meetresultaten automatisch op te slaan en te verwerken.

In geval van ingewikkelde produkten maakt het productiepersoneel gebruik van numeriek bestuurde meetmachines, waarvoor het meetkamerpersoneel het programma heeft geïnstalleerd. In geval van serieproductie heeft het personeel vaak de beschikking over produktspecifieke meetmiddelen, die gebruikt worden voor maten, die steekproefsgewijs of zelfs 100% gecontroleerd moeten worden, kalibers en mallen. Hierbij treedt voor de kwaliteitsdienst het keuzedilemma op van een universeel meetmiddel versus een goedkoper produktgebonden meetmiddel. Daarnaast worden vaak produkteigenschappen, die direct aan het proces gekoppeld kunnen worden 100% visueel gecontroleerd. In het geval van enkelstuks fabricage worden alle functionele produktmaten gecontroleerd door het productiepersoneel; in eerste instantie met handgereedschap en als dat tekort schiet met een meetmachine.

Het produkt wordt voorzien van een testrapport. Meetmachines worden zeer intensief gebruikt: overdag voor nieuwe produkten en de aanmaak van programma's voor aanloopseries, 's-nachts voor routinemetingen.

Bewerkingsmachines met een gereedschapswisselsysteem zijn soms voorzien van een taster, die gebruikt kan worden voor:

- het bepalen van de positie van een werkstuk
- het bepalen van karakteristieke maten,
- produktherkenning

Met deze informatie kan de besturing worden ingesteld of gecorrigeerd, of er kan een nabewerking plaatsvinden. In verschillende gevallen werd de voorziening niet gebruikt, omdat;

- de meting ten koste gaat van bewerkingstijd
- extra regels aan de machine geprogrammeerd moeten worden.

Voor het meten van karakteristieke maten (tussen bewerkingsstappen) moet het produkt eerst schoongeblazen worden. De meetnauwkeurigheid wordt beïnvloed door temperatuurinvloeden als de machine voor de meting afgezet moet worden. De meetprocedure zelf is meestal kort, in de orde van enkele minuten. Wij hebben geen machine gezien, waarbij de taster werd gebruikt om tussen bewerkingsstappen maten te controleren.

De voorziening werd wel gebruikt bij de bewerking van gietstukken voor de bepaling van een referentiefraam aan het begin van de bewerkingscyclus.

Ook een 'toolchecker' werd niet gebruikt, omdat het machinetijd zou kosten. In plaats daarvan werd de standtijd van de gereedschappen bewaakt.

Bij een bedrijf werd het gereedschap na elke bewerking met een camera gecontroleerd op breuk of andere defecten.

Bij bewerking van vlakke plaat werd elk produkt visueel gecontroleerd op braamvorming, omdat dat een indicatie geeft van de slijtage van de stempels. Bij numeriek bestuurd persen werd alleen het eerste produkt gecontroleerd op de geometrische specificaties om de instellingen en de programmatuur te controleren. Dit gebeurde met handmeetgereedschap.

Bij het buigen en zetten van plaatmateriaal in een kantbank treden hoekafwijkingen op door variatie in de materiaaleigenschappen. Verder zou bij overgang van kleine naar grote produkten de bombering bijgesteld moeten worden, wat veel insteltijd vergt. Voor deze bewerking is er behoefte aan een in-proces meetsysteem, dat de terugvering van het omgezette produkt meet.

De nauwkeurigheden, zoals die gebruikelijk zijn bij de diverse produktmethoden:

verspanen, gereedschapsmakerij	0,001 - 0,02 mm
verspanen, machinefabriek	0,01 mm
plaatwerk, ponsen, snijden	0,2 - 0,3 mm
gietwerk	0,1 - 0,4 mm

4.3 Conclusies

1. Alle procescontrole begint bij machinebeheersing; bij het vaststellen van de machine-capability bij afname en d.m.v. periodieke keuringen. De compensatie van temperatuureffecten in de bewerkingsmachine is in onderzoek. In de praktijk lost men dit probleem nu gedeeltelijk op door de machine te laten doordraaien of eerder aan te zetten. De machine moet de produktspecificaties aankunnen.
2. Daarna komt de beheersing van de proces-capability. In geval van serieproductie kan na een eerste produkt of een aanloopserie overgestapt worden op statistische controle. In geval van enkelstuks productie moeten alle functionele produktmaten gemeten worden.

- 3 Tijdens het onderzoek bleek dat bij bedrijven met < 100 man vaak het accent binnen de kwaliteitsbeheersing ligt bij de organisatie op de werkvloer. Er is geen duidelijke behoefte aan geavanceerde meetmiddelen, eventueel wel aan een betere beheersing van meetdata. Kleine bedrijven gebruiken vooral handmeetmiddelen, eventueel een kleine meetmachine.
4. QC is een onderdeel van het productieproces. Metingen worden uitgevoerd door het productiepersoneel, zo dicht mogelijk bij de werkomgeving. Doel is de beheersing van het proces, zodat het stabiel verloopt.
Hieruit volgen de gewenste eigenschappen van meetmiddelen:
 - universeel (omstelling per produkt via de software);
 - snel (niet ten koste van produktietijd);
 - nauwkeurig genoeg voor de produktspecificaties;
 - te gebruiken in de productie-omgeving.
 De kwaliteitsdienst is verantwoordelijk voor het eindprodukt en ontwikkelt daartoe procedures en methodieken. Hij schaft meetmiddelen aan en calibreert ze.
- 5 Het meten in de bewerkingsmachine beperkt zich vooralsnog tot de bepaling van referenties en het positioneren van werkstukken.
- 6 Geavanceerde meettechnieken zullen veelal eerst door grotere bedrijven worden toegepast.
7. Fabrikanten van zeer nauwkeurige produkten hebben specifieke meetproblemen. Uitgaande van een grondig begrip van de produktfuncties meten ze veel en hebben ze veel proceskennis in huis. Toch blijven ook daar vaak meetproblemen onopgelost.
- 8 Bij de produktie van (kleine) series worden statistische metingen uitgevoerd met het doel verloop in het proces te detecteren. Het streven is een stabiel productieproces.
- 9 Het hierbij behorende streven naar een korte terugkoppeltijd door in-proces of inter-proces te meten wordt o.a. bemoeilijkt doordat het produkt niet schoon is en door temperatuurinvloeden.
- 10 Bij de produktie van (kleine) series is aan de kant van de meetmiddelen de keuzemogelijkheid tussen een vrij beperkt inzetbare meerpuntsmeetopstelling en een universeel inzetbare (dure) meetmachine; verplaatsing van "hardware tooling" naar "software tooling".
- 11 Automatische gereedschapscontrole met optische technieken wordt in de produktie nog weinig toegepast.
- 12 Meetmachines hebben vaak verschillende functies in het productieproces: controlemeting van een lopend produkt, naast ondersteuning bij de aanloop van een nieuw produkt.
- 13 Bij de huidige inzet van meetmiddelen, - aan de machine - tussen de machines - in de meetkamer -, neemt de complexiteit, c.q. nauwkeurigheid van de meetmiddelen toe. De vraag is, of dit uit nood geboren is en of niet uiteindelijk de nauwkeurige metingen aan de machine gedaan zouden moeten worden. Echter, gezien de stand van de techniek lijkt de verwezenlijking hiervan voor alle geometrische metingen nog zeker 5 jaar in de toekomst te liggen. Het is wel mogelijk, dat deelgebieden eerder gerealiseerd zullen worden.

5 PRODUKTINVENTARISATIE

5.1 Inleiding

Er is vooral gekeken naar optische en akoestisch meetsystemen. De optische zijn onderverdeeld in:

- triangulatie
- autofocus
- tijdsinterval
- CCD-lijnarray
- CCD-vlakarray
- laserscanner

Als bronnen zijn bezoekverslagen, datasheets en overzichtsartikelen gebruikt.

5.2 Nederland

Voorzover ons bekend is zijn er in Nederland 3 producenten van optische geometrische meetsystemen voor industriële toepassingen en 1 producent van CCD camera's. Ook zijn er een aantal ingenieursbureaus, die in opdracht speciale systemen op klantenspecificatie leveren. De lasnaadvolger van Delft Instruments laten wij verder buiten onze beschouwingen. De andere bedrijven zijn TPA Systems in Maastricht en Applied Laser Technology in Asten.

Leverancier	TPA	TPA	ALT
Meetprincipe	autofocus	triang.	tijdsinterval
meetafstand, (mm)	10-1000		125-400
meetbereik, (mm)	2-200	10,20,50	125-200
onnauwkeurigheid, (μ m)	1-100	50,100,200	0,01%
meetfrequentie, (Hz)	3000	10000	450
meetvlek, diam (mm)			0,6
oppervlak	3-97%R	>10%R	

Bij TPA kan de triangulatiesensor naar keuze worden voorzien van een p.s.d. of van een CCD-lijnarray.

De producent van CCD-camera's is HCS Vision Technology in Eindhoven. Voor zover ons bekend is, leveren zij geen complete meetsystemen als eindproduct.

De Delftse Machinefabriek levert een 2D-meetsysteem, waarbij de camera wordt gebruikt voor handmatige, contactloze aantasting. Het meetbereik loopt tot 300 x 1500 mm met een onnauwkeurigheid van 0,1 mm.

5.3 Sensoren

Van de vele optische sensoren die op de markt worden aangeboden, geven we ter vergelijking van een aantal de specificatie:

Naam	Quadriga	UBM		
Type	triangulatie 2 CCD linearrays	autofocus		
Meetafstand, (mm)	65 - 125			
Meetbereik, (mm)	25,60	0,1 - 1		
Meetfrew. (Hz)	1000	130		
Onnauwk. (μ m)	20,50	0,01%		
Meetvlek, (mm)	0,15-0,3			

Naam	Renishaw	Astec	Keyence	DME
Type	triang.	Michelson*	triang.	triang.
Meetafstand, mm	20		43	30
Meetbereik, mm	4	0,1	6	30
Meetfrew. Hz	50	200 μ m/s		250
Onnauwk. μ	2	0,2	0,5	3
Meetvlek, mm		0,2	0,05	

* de interferometer is geïntegreerd op een siliciumchip

5.4 Meetsystemen

Het Fraunhofer Instituut IPA in Stuttgart doet onderzoek aan een meetmachine met een camera naast de taster. Dit systeem wordt door Zeiss op de markt gebracht. Van een vlak onderdeel, een industrieel product werden de kritische maten gemeten met een profielprojector met handmatige aantasting in 30 min. Met een numeriek bestuurd meetmachine met mechanische aantasting werd hetzelfde meetprogramma doorlopen in 13 min. en met het genoemde hybride systeem in 4 min. De CCD camera haalt een onnauwkeurigheid van 0,01 mm.

Daarnaast ontwikkeld IPA twee 2D-meetsystemen voor het meten van vlakke platen. Eén systeem heeft een CCD-camera, die op een xy frame loopt over het werkstuk, dat van onder wordt belicht. De programmatuur herkent lijnen en cirkels vanuit het meetprogramma (contactloze aantasting). Het meetbereik is 1 x 2 m met een onnauwkeurigheid van 0,01 mm.

Verder heeft IPA een 2D meetsysteem ontwikkeld op basis van een Rollei camera met een CCD-sensor, die in het beeldvlak gepositioneerd wordt. De camera heeft een vaste plaats t.o.v. het werkstuk. De onnauwkeurigheid is van de orde van 0,1 mm bij een meetveld van enkele meters. Door de sensor te verplaatsen wordt het meetveld vergroot met behoud van de onnauwkeurigheid.

URW, Hamburg levert een laserscanner, werkend volgens het triangulatieprincipe, die het hoogteprofiel van een vlak meet. De laserbundel en de beeldbundel worden met een spiegel langs een as bewogen. De totale scanner beweegt op een slede langs de andere as. Binnen een meetgebied van 150 x 60 x 800 mm wordt een meetraster gelegd met scanlijnen op 1 mm onderlinge afstand en meetpunten op 0,5 mm onderlinge afstand per lijn. De hoogte wordt gemeten met een onnauwkeurigheid van 0,01 mm. De scanner wordt bijv. gebruikt voor de meting van cilinderkoppen.

CyberCAM levert een dergelijk systeem, waarbij echter als sensor een vlak CCD element wordt gebruikt, zodat maar 1 spiegel nodig is.

Een aantal bedrijven levert laserscanners volgens het lichtschermpincipe (3.2.5)

naam	Keyence	TTB	Schneider
toepassing		gereedschap in machine	2-assig systeem x y
meetgebied,mm	29	100	125 x 1000
resolutie, μ m	10	1	0,3
meetfrequentie,Hz	500		5

Stiefelmayer levert een laserscanner, werkend volgens het looptijdprincipe. De laserbundel wordt door twee spiegels over het meetoppervlak bewogen. De looptijd van de gereflecteerde bundel wordt gemeten en omgezet in plaatsinformatie. Het meetgebied is 450 x 450 x 460 mm, waarbinnen met een onnauwkeurigheid van ten hoogste 0,4 mm wordt gemeten. De scanner is nog in ontwikkeling. Er is nog niet veel praktijkinformatie, zoals het gedrag als functie van het reflecterend vermogen van het object.

Volkswagen heeft voor eigen gebruik een meetsysteem ontwikkeld, gebaseerd op fotogrammetrie voor de meting van bodyparts. Een projector beeldt een raster af op het werkstuk. Met een aantal camera's wordt het raster opgenomen. Door combinatie van de opnames wordt de vorm teruggerekend. Met dit meetsysteem kunnen grote (enkele m) objecten worden opgemeten met een onnauwkeurigheid van 0,1 mm.

EOS in Munchen levert een systeem dat werkt in een Moiré opstelling. Bij een meetgebied van maximaal 300 x 300 mm wordt van 512 x 512 punten de hoogte gemeten met een onnauwkeurigheid van 0,04 mm.

Er zijn verscheidene profielprojectoren met een camera voor contactloze kantaantasting. De aantasting kan handmatig zijn of voorgeprogrammeerd. IPA Stuttgart heeft samen met Schunk Werth de Inspector ontwikkeld, die binnen een meetgebied van 150 x 150 mm meet met een onnauwkeurigheid van 2,5 μ m. De Inspector is bedoeld voor 2D metingen aan kleine werkstukken. Voor gereedschapscontrole levert Sasse een profielprojector met camera met een meetgebied van 250 x 450 mm en een onnauwkeurigheid van 4 μ m.

BPI levert een projector met een bereik van 760 x 760 mm en een onnauwkeurigheid van 0,1 mm

5.5 Conclusies

- 1 Voor contactloze lengtemeting is er een ruim aanbod van optische sensoren. Voor triangulatie-sensoren loopt de gespecificeerde onnauwkeurigheid van 0,01% tot 0,5% van het meetbereik met een minimum van 1 μ m. De meetfrequentie varieert van 50 Hz voor de meest nauwkeurige sensor tot 1 KHz voor de meest onnauwkeurige. De nauwkeurigheid wordt begrensd door externe factoren, zoals de oppervlakteruwheid en de meethoek. In het gebruik heeft de triangulatiesensor beperkingen door zijn afmetingen en de meetafstand.
- 2 Autofocus-sensoren worden vooral gebruikt voor de bepaling van oppervlakteparameters. De onnauwkeurigheid loopt van 0,01% tot 0,05% van het meetbereik met een minimum van 10 nm.

- 3 Er zijn 2D- en 3D-meetsystemen verkrijgbaar met CCD-camera's voor lengtemeting. Het belangrijkste voordeel is de tijdwinst, die geboekt wordt door softwarematige aantasting. De meeton nauwkeurigheid wordt gespecificeerd tussen $2,4 \mu\text{m}$ en $10 \mu\text{m}$. (o.a. als functie van het meetveld). De systemen zijn:
- een camera naast een taster in een 3D-meetmachine
 - een camera op een x,y frame in een 2D-meetmachine
 - een camera op een vaste positie met een sensor in een x,y frame (on nauwkeurigheid $0,1 \text{ mm}$)
 - een camera in een profielprojector
- 4 3D-triangulatiesystemen met scanspiegels worden geleverd voor de profielmeting van vlakken. De hoogteon nauwkeurigheid is $0,01 \text{ mm}$.
- 5 Laserscansystemen volgens het schaduwprincipe worden geleverd voor de meting van gereedschappen en rotatiesymmetrische produkten. De resolutie wordt gespecificeerd tot minimaal $0,3 \mu\text{m}$.
- 6 Andere optische meetsystemen voor 3D metingen zijn nog in de ontwikkelfase. Eventueel worden ze ontwikkeld en gebruikt uitsluitend voor eigen gebruik.

6 EVALUATIE

In de projectbeschrijving zijn een aantal doelstellingen geformuleerd. Voor de evaluatie worden deze als volgt heringedeeld.

- 1 Beschrijving van de algemene behoeften binnen de technische kwaliteitscontrole (QC), gekoppeld aan de algemene ontwikkelrichting van meetmiddelen.
- 2 Analyse van meetsystemen op machines:
 - behoeften van de gebruiker (hoe worden de middelen nu ingezet, waar zijn verbeteringen denkbaar, wat zijn de daaruit volgende functionele specificaties)
 - aanbod op de markt (met name in vergelijking met de functionele specificaties)
 - ontwikkelrends volgend uit het literatuuronderzoek, zowel modificaties als geheel nieuwe systemen
- 3 Analyse van meetsystemen op de werkvloer:
 - behoeften van de gebruiker
 - aanbod op de markt
 - ontwikkelrends
- 4 Diverse meetproblemen.

6.1 Algemene behoeften en ontwikkelrends

De machine-capability moet verhoogd worden o.a. door een betere beheersing van temperatuurinvloeden. Daarmee worden ook de eisen aan de beheersing van de proces-capability hoger, gekoppeld aan een hogere produktkwaliteit, gespecificeerd door de afnemers.

Kleine, niet gespecialiseerde bedrijven geven geen ontwikkelrichting aan. De behoeften worden gedefinieerd door:

- grote en middelgrote ondernemingen
- sterk gespecialiseerde ondernemingen.

Aangezien QC een onderdeel is van het produktieproces worden de metingen uitgevoerd door produktiepersoneel. Hieruit volgen eisen, die gesteld moeten worden aan meetmiddelen:

- universeel (omstelling per produkt via software)
- snel (niet ten koste van produktietijd)
- nauwkeurig genoeg, gekoppeld aan de vraag van de markt
- te gebruiken in de produktie-omgeving, d.w.z. niet beïnvloed door temperatuurvariaties, trillingen, bewerkingsresten en vuil
- geen verstoring van het bewerkingsproces

Het doel van QC bij seriefabricage is de stabilisatie van het proces (procesautomatisering vs. fabrieksautomatisering). Dit houdt o.a. in de behoefte aan een korte terugkoppeltijd, dus in-proces of inter-proces meten.

In produktieprocessen worden van meetsystemen de volgende onnauwkeurigheden gevraagd:

- verspanen, 0,002 mm
- plaatbewerken, 0,02 mm
- gieten, 0,2 mm

6.2 Meetsystemen op de machine

Meten op de machine beperkt zich tot lengtemeting (het positioneren van werkstukken en het bepalen van referenties) en ruwheidsmeting.

In-proces meting van de slijtage van gereedschappen is in ontwikkeling. Het meest belovende systeem heeft een pneumatische sensor, die echter onder productie-omstandigheden nog niet geheel voldoet.

In-proces meten aan werkstukken in verspaningsprocessen lijkt nog ver weg door de verstoringen door het proces zelf; spanen en snijolie. Bij plaatbewerking zijn deze verstoringen niet aanwezig.

Inter-proces meten aan werkstukken en gereedschappen is veel dichterbij. Als de temperatuurinvloeden en geometrie-afwijkingen softwarematig gecompenseerd kunnen worden (of als gemeten kan worden t.o.v. een extern referentiefraam) kunnen in principe met de huidige generatie van sensoren lengtematen bepaald worden, mits het werkstuk of het gereedschap schoon is. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het meetsysteem van de machine.

Daarbij geldt, dat:

- mechanische tasters betrouwbaar zijn maar langzaam
- optische tasters snel zijn, maar minder betrouwbaar. Verder moeten ze onder verschillende hoeken kunnen meten.

De gevraagde onnauwkeurigheid is 0,01 - 0,001 mm.

De toepasbaarheid moet uitgewerkt worden voor verdere industriële implementatie.

Meting van oppervlakteparameters hoeft niet veel verder weg te zijn, omdat de sensoren beschikbaar zijn. De problematiek is in wezen gelijk aan die van afstandmeting.

In de specificatie van optische sensoren wordt de laterale onnauwkeurigheid niet gedefinieerd.

Voor contactloze lengtemeting is er een ruim aanbod van optische sensoren. Voor triangulatie-sensoren loopt de gespecificeerde onnauwkeurigheid van 0,01% tot 0,5% van het meetbereik met een minimum onnauwkeurigheid van 1 μ m. De meetfrequentie varieert van 50 Hz voor de meest nauwkeurige sensor tot 1 KHz voor de meest onnauwkeurige. De nauwkeurigheid wordt begrensd door externe factoren, zoals de oppervlakteruwheid en de meethoek. In het gebruik heeft de triangulatiesensor beperkingen door zijn afmetingen en de meetafstand.

Er is behoefte aan een optische sensor met kleine afmetingen met een groot meetbereik (20 mm) en een korte meetafstand (15 mm). De nauwkeurigheid moet van dezelfde orde zijn als van een mechanische sensor, onafhankelijk van de meethoek (+/- 45 gr.) en de reflectie van het meetoppervlak.

Er wordt inspanning gestoken in de ontwikkeling van een mechanische sensor met een hoge meetsnelheid.

Volgens de conclusies van bijlage III kunnen in principe akoestisch werkende sensoren op de machine afstanden meten met een nauwkeurigheid van 10^{-4} van de meetafstand. Hierdoor werken ze in hetzelfde gebied als optische sensoren. Een voordeel van akoestische sensoren is dat ze eventueel in een vloeistof (snijolie) goede resultaten geven. Er worden commercieel nog geen specifieke systemen voor geometrische metingen aangeboden.

6.3 Meetsystemen op de werkvloer.

Deze meetsystemen worden inter-proces gebruikt. Ze meten lengte, vorm en oppervlak.

CMM's hebben meerdere functies in het productieproces: controlemeting van een lopend produkt, ondersteuning bij de aanloop van een nieuw produkt. De meetonnauwkeurigheid is minimaal 3 μm , oplopend tot 100 μm .

Er zijn 2D- en 3D-meetsystemen verkrijgbaar met CCD-camera's voor lengtemeting. Het belangrijkste voordeel is de tijdwinst, die geboekt wordt door softwarematige aantasting. Verder kunnen kleine vormelementen beter optisch dan mechanisch gemeten worden. De meetonnauwkeurigheid wordt gespecificeerd tussen 2,4 μm en 10 μm . (0,2% van het meetveld).

De beschikbare systemen zijn:

- een camera naast een taster in een 3D-meetmachine
- een camera op een x,y frame in een 2D-meetmachine
- een camera op een vaste positie met een sensor in een x,y frame (onnauwkeurigheid 0,1 mm) voor een groot meetveld
- een camera in een profielprojector

CCD camera's voor de bepaling van vormafwijkingen werken met algoritmes. Deze zijn wel ontwikkeld voor serieprodukten, maar nog niet voldoende voor universele toepassingen.

Deze generatie camerasystemen voldoet aan de nauwkeurigheidseisen voor plaatbewerking en gietwerk en aan de eisen voor verspaning bij kleine meetvelden. De toepasbaarheid moet verder ontwikkeld worden voor industriële implementatie..

In het algemeen kunnen deze meetmachines vanuit CAD geprogrammeerd worden.

Laserscansystemen volgens het schaduwprincipe worden geleverd voor de meting van gereedschappen en rotatiesymmetrische produkten. De resolutie wordt gespecificeerd tot minimaal 0,3 μm . Gezien de gevoeligheid voor omgevingsinvloeden zijn dit stand-alone meetsystemen.

Andere optische meetsystemen voor 3D metingen zijn nog in de ontwikkelfase. Alleen prototype systemen worden op de markt getoond. Eventueel worden ze ontwikkeld en gebruikt voor eigen gebruik.

Bij de ontwikkeling van meetsystemen, die in 3 dimensies werkstukken kunnen meten, wordt de meeste inspanning gestoken in CMM's, ten opzichte van bijvoorbeeld optisch werkende systemen. Vooralsnog zullen CMM's hun voorsprong in de markt niet verliezen. De tijd, dat de vormholte van een matrijs in enkele seconden kan worden vastgelegd, is nog niet aangebroken. Voor contactloze meetmethoden is de combinatie van μm -onnauwkeurigheid met een meetvlak van 1 m^2 voor een metalen werkstuk op korte termijn niet te verwachten.

Van de andere systemen zijn er veelbelovende publikaties over Moiré en andere technieken met gestructureerd licht. De hoogste ons bekende specificatie onder laboratorium-omstandigheden is een onnauwkeurigheid van 0,4 μm voor 65000 meetpunten binnen 20 s. op een oppervlak met een diameter van 200 mm. De systemen vragen veel rekencapaciteit. Door de inzet van snelle, parallelle computers komen toepassingen dichterbij.

Onwikkelingen aan meetmachines richten zich op de beheersing van temperatuurvariatiës en trillingen om hun inzet op de werkvloer mogelijk te maken.

De toekomst voor CMM's ligt bij systemen met een CCD camera en een gereedschapswisselsysteem, waarin naast mechanische tasters ook een (verbeterde) triangulatiesensor kan worden opgenomen. De machines zijn zo geconstrueerd, dat de nauwkeurigheid minder wordt beïnvloed door temperatuurvariatiës. Het restant onnauwkeurigheid wordt verwerkt door sensoren en software correcties. Hij wordt op de werkvloer gebruikt met alleen een omkasting in een vuile omgeving.

7 VERVOLGPROJECTEN

7.1 Onderzoek voor industriële implementatie

7.1.1 Sensoren in verspaningsmachines

7.1.1.1 Inleiding

Volgens de evaluatie zijn voor het meten van de geometrie van het werkstuk en het gereedschap de technische middelen beschikbaar. Ze worden echter nog niet veel gebruikt, doordat de toepassing niet optimaal is aangepast aan het proces en de werkwijze.

7.1.1.2 Doelstelling

Het bevorderen van de implementatie van geometrie-sensoren in bewerkingsmachines voor het inter-process meten van werkstukken en gereedschappen. De implementatie moet leiden tot verkorting van de doorlooptijd en vermindering van fabricagefouten.

7.1.1.3 Werkwijze

- uitgaande van de informatie die verzameld is voor het project, wordt een overzicht samengesteld van op de markt beschikbare meetsystemen;
- aan de hand van praktische ervaring bij huidige industriële gebruikers wordt een sterkte-zwakte analyse uitgevoerd;
- de gevonden knelpunten worden in (een) proefopstelling(en) onderzocht en indien mogelijk worden oplossingen ontwikkeld;
- de bruikbaarheid van de gevonden oplossingen wordt getest in een industriële omgeving;
- de resultaten worden via een workshop of seminar en via publikaties bekend gemaakt.

7.1.1.4 Uitvoering.

CPT

TUE

Leverancier sensoren

Leverancier machines

7.1.1.5 Looptijd en kosten

De looptijd is 1 jaar voor de definitie-fase, gevolgd door 3 jaar voor de ontwikkeling van een werkend systeem. ✓

7.1.2 Contactloze 2D metingen

7.1.2.1 Inleiding

Voor geometrische metingen aan vlakke werkstukken met een uitgebreidheid van meer dan 1 m² worden meetmachines geleverd met CCD-camera's. De meetmethode berust meestal op een combinatie van de volgende technieken:

- positionering langs een x,y frame (de camera t.o.v. het werkstuk of het matrix-array in het beeldvlak)
- kantaantasting of contourmeting met behulp van een algoritme

De meetmachine loopt automatisch een meetprogramma door.

7.1.2.2 Doelstelling

Het bevorderen van de implementatie van contactloze 2D meetmachines. Deze moet leiden tot verkorting van de doorlooptijd.

7.1.2.3 Werkwijze

- Bij potentiële industriële gebruikers wordt een inventarisatie gemaakt van meetprocedures van vlakke producten. Enkele representatieve producten worden geselecteerd en gemeten op de traditionele manier.
- Van enkele op de markt aangeboden systemen worden karakteristieke functies bepaald. In eerste instantie denken wij hierbij aan:
 - a de camera van Rollei met het positioneerbare matrix-array, die door het IPA-Stuttgart ontwikkeld is
 - b een meetmachine met een camera in een x,y frame met de bijbehorende programmatuur, zoals bijvoorbeeld het eveneens door IPA ontwikkelde systeem
- de representatieve producten worden op de contactloze meetmachines gemeten en de resultaten en procedures worden vergeleken met de traditionele metingen.
- een evaluatie van de onderzoeksresultaten wordt opgesteld en verspreid d.m.v. publicaties en een workshop/seminar

7.1.2.4 Uitvoering

CPT
TUE
IPA

7.1.2.5 Doorlooptijd en kosten

De doorlooptijd is 6 maanden als beide systemen parallel getest kunnen worden en 9 maanden als ze na elkaar getest worden.

7.1.3 Hybride 3D meetmachines

7.1.3.1 Inleiding

Zeiss levert een meetmachine met een CCD camera, die in de tasterhouder is geïntegreerd. Verder kan bij Zeiss een optische taster worden opgenomen in een instelbare 'dreh-schwenk' arm. Beide systemen kunnen de benodigde meettijd drastisch verkorten. De hoogst haalbare meetnauwkeurigheid en de inzetbaarheid van beide systemen zijn afhankelijk van het werkstuk.

7.1.3.2 Doelstelling

Het opstellen van een sterkte-zwakte analyse van een 3D meetmachine, uitgerust met een CCD-camera en een triangulatie-taster in een 'dreh-schwenk' houder.

7.1.3.3 Werkwijze

- van een groep bedrijven worden 5 representatieve producten geselecteerd met een breed scala van meetopgaven
- op een 3D meetmachine, die is uitgerust met alle bovengenoemde meetmiddelen wordt de meetnauwkeurigheid van elk van deze middelen binnen een meetkubus bepaald
- voor de 5 producten wordt de meest optimale meetprocedure ontwikkeld en getest.
- het resultaat wordt d.m.v. publikaties verspreid

7.1.3.4 Uitvoering

CPT
TUE
Zeiss

7.1.3.5 Looptijd en kosten

De looptijd bedraagt 6 maanden.

7.2 Sensorontwikkeling

7.2.1 Ontwikkeling van een contactloze geometrie-sensor

7.2.1.1 Inleiding

In de evaluatie van worden de voor- en nadelen van contactloze aantasting besproken. Het is onze overtuiging, dat met de beschikbare kennis (state-of-the-art) een sensor ontwikkeld kan worden op basis van een optische techniek, die de voordelen behoudt maar een aantal van de nadelen uitschakelt.

7.2.1.2 Doelstelling

Het opstellen van de functionele specificaties van een optische sensor voor de bepaling van plaats en afstand ten opzichte van werkstukken van metaal of kunststof met een onnauwkeurigheid van 1 μm langs 3 onderling loodrechte ruimtelijke assen. De sensor evenaart in 'performance' de mechanische taster en heeft daarnaast de voordelen van contactloze aantasting zoals snelheid en het niet verstoren van het meetoppervlak.

7.2.1.3 Werkwijze

- uitgaande van de informatie, verzameld voor het project wordt een overzicht opgesteld van:
 - a optische meettechnieken voor de bepaling van plaats en afstand
 - b eisen voor de bepaling van plaats en afstand in een industriële omgeving
- hieruit wordt een analyse gemaakt van beperkingen van technieken a) ten opzichte van eisen b)
- aan de hand van de analyse wordt een functionele specificatie opgesteld voor een optische taster
- een ontwikkelprogramma voor een taster wordt opgesteld

7.2.1.4 Uitvoering

CPT
TUE
TPA

met microscoops!

7.2.1.5 Looptijd en kosten

De looptijd bedraagt 6 maanden.

7.2.2 Ontwikkeling van een meetmethode voor de bepaling van de oppervlakteparameters van oppervlakken groter dan 0,25 m^2

7.2.2.1 Inleiding

Tijdens de bedrijfsinventarisatie bleek bij een aantal bedrijven de behoefte te bestaan aan een meetsysteem, waarmee betrekkelijk snel oppervlakte parameters, zoals vlakheid, waviness en ruwheid bepaald kunnen worden voor grote oppervlakken (voorlopig vastgesteld op groter dan 0,25 m^2). Voor grotere oppervlakken wordt gebruik gemaakt van elektronische waterpassen en voor kleine oppervlakken van optische (interferometrische) meetmethoden. Voor het doelgebied hebben beide systemen hun tekortkomingen.

7.2.2.2 Doelstelling

Op basis van beschikbare technologie de selectie van een meetprincipe voor de bepaling van oppervlakte parameters, dat zo goed mogelijk voldoet aan de eisen die worden gesteld door industriële gebruikers. Het meetsysteem moet binnen een redelijke tijd de parameters van grote oppervlakken kunnen bepalen.

7.2.2.3 Werkwijze

- de behoeften van industriële gebruikers worden geïnventariseerd;
- uitgaande van de informatie, die voor het project is verzameld wordt een overzicht opgesteld van relevante optische en akoestische meettechnieken, inclusief hun beperkingen;
- uitgezet tegen de behoeften worden kansrijke meetmethoden geselecteerd en meer in detail onderzocht;
- voor één of twee meetmethoden wordt een ontwikkelprogramma opgesteld.

7.2.2.4 Uitvoering

CPT
TU's
TNO

7.2.2.5 Looptijd

De looptijd van deze definitie-fase bedraagt 1 jaar.

7.2.3 Ontwikkeling van een lijnsensor voor kantbanken

7.2.4 Ontwikkeling van een herleidbare meetmethode voor de bepaling van de polijstkwaliteit van metalen oppervlakken

Beide projecten voldoen aan een industriële behoefte. In de periode dat dit rapport werd samengesteld, was bij de auteurs geen meetmethode bekend die zelfs in potentie het desbetreffende probleem zou kunnen oplossen. Indien er interesse is om de projecten verder te ontwikkelen moet begonnen worden met een voorstudie met een looptijd van circa 3 maanden.

7.2.5 Vormmetingen

Meetmethoden met behulp van "structured light", zoals Moiré en fotogrammetrie, worden in het buitenland industrieel toegepast. Voorzover ons bekend is heeft in Nederland nog geen industrie zich hieraan gewaagd. Het Centrum voor Produktietechniek overweegt om een werkgroep op te richten van geïnteresseerde bedrijven en instituten met het doel ontwikkelingen te inventariseren en te volgen, eventueel resulterend in eigen ontwikkelprojecten of implementatie-studies.

7.2.6 Ontwikkeling van een akoestische afstandssensor voor gebruik op een bewerkingsmachine

Uit het literatuuronderzoek van bijlage III blijkt, dat akoestische technieken wellicht geschikt zijn voor nauwkeurige afstands⁴meting op een bewerkingsmachine. Elders wordt onderzoek verricht, dat echter nog niet heeft geresulteerd in een commercieel product.

Algemene opmerking:

Door de implementatie van contactloze, optische meetmethoden is er een nieuw kennisgebied c.q. probleemgebied bijgekomen voor de meettechnicus.

VRAGENLIJST

1. Algemene informatie:

- omvang bedrijf, zelfstandig of deel groep/concern;
- plaats in de markt (marktsector, marktaandeel);
- omzet;
- aantal werknemers;
- soort produkten enz.

2. Produktinformatie

2.1 Algemene informatie:

- welke produkten;
- seriegrootte;
- afmetingen produkt;
- mate van produktie-automatisering.

2.2 Specifieke informatie m.b.t. enkele geselecteerde, representatieve produkten:

- soort materiaal;
- functionele eigenschappen van het produkt, eigenschappen die van belang zijn voor het functioneren van het produkt. Voorbeelden hiervan zijn referentie vlakken, opnamepennen of -gaten, vorm- en plaatstoleranties en oppervlaktegesteldheid;
- bewerkingsprocessen en bewerkingscondities (vooral met het oog op de reinheid van het oppervlak, van belang bij het meetproces).

3. Procesinformatie, met name m.b.t. de maatvoering Meetmethodieken en middelen

- #### 3.1.
- de nauwkeurigheid van de positionering van een produkt op een referentie en de reproduceerbaarheid van de positionering;
 - wordt slechts gebruik gemaakt van één referentie of van verschillende;
 - wat is de positionering van de referentie;
 - welke middelen worden gebruikt.

3.2. De belasting waaraan een produkt blootstaat:

- temperatuurbelasting;
- bewerkingskrachten, elastische en/of plastische deformatie;
- fixatiekrachten, elastische en/of plastische deformatie.

3.3. Nauwkeurigheid van het bewerkingsproces.

3.4. Procesbeheersing:

- betrouwbaarheid (reproduceerbaarheid);
- nauwkeurigheid waarmee men een produkt kan produceren;
- eventueel de kwaliteit van de terugkoppeling van de produktcontrole naar de produktie;
- wordt er steekproefsgewijs gemeten.

Hoe wordt gemeten:

- waar wordt in het proces gemeten, aan de machine, tussen de machines of in de meetkamer;
- welke metingen worden verricht en met welke meetmiddelen;
- met welke nauwkeurigheid worden deze verricht.
- waar in het proces vindt de inspectie plaats;
 - * reeds tijdens de produktie (inproces, interproces);
 - * nadat het produkt vervaardigd is (postproces).

3.5 Tegen de achtergrond van een kortere doorlooptijd, complexere produkten met nauwere toleranties:

- hoe is de situatie nu;
- waar zitten de zwakke plekken, wat zou men willen verbeteren;
- wat zijn hiervan de consequenties.

BIJLAGE II: Literatuuroverzicht

Referenties

1. Elshennawy, A.K., The role of inspection in automated manufacturing.
In: Computers ind. Engng, Vol. 17, 1989.
2. Jones, B.E., Sensors in industrial metrology.
In: Journal of the Physics E, Vol. 20, september 1987.
3. Vesper, B., Optische sensoren für die in-process-messung an runden werkstücken, dissertatie Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1988.
4. Neumann, H.J., Koordinatenmeßtechnik in die Fertigung Integrieren.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 35, (1990), 10.
5. Weckenmann, A., Koordinatentechnik in Umbruch.
In: Technisches Messen, 57 (1990), 3.
6. Koch, K.-P., Briefing: optomechanical metrology.
In: Sensor Review October 1989.
7. Golz, H.U. e.a., Integration eines Tastschnittgeräts zur Rauheitsmessung in ein Koordinatenmeßgerät.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 35, (1990), 12.
8. Company Report, Measuring centre has optical and mechanical probing.
In: Precision Engineering, April 1989, Vol. 11, 2.
9. Modjarred, A., Hajdukiewics, P., Entwicklung eines kleinen, neuartigen und hochpräzisen 3D-Mestasters für Koordinatenmeßgeräte, VDI-Berichte Nr. 836, 1990.
10. Weisig, S., Koch, K.-P., Kombinierte optische und mechanische Antastung erweitert die Einsatzmöglichkeiten von Koordinatenmeßgeräten.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 35, (1989), 9.
11. Tlusty, J., Andrews, G.C., A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining, Annals of the CIRP, Vol. 32/2/1983.
12. Somerville, L., Modjarred, A., Laser Adds Light Touch to CMMs.
In: Machine and Tool BLUE BOOK, April 1987.
13. Weule, H., e.a., Von Meßraum zur Meßzell.
In: VDI-Z, bd. 129, (1987), 7.

14. Technisch Bulletin Mitutoyo, 1990, 13.
15. Albert, M., The CMM Is a Shop Floor Tool.
In: Modern Machine Shop, February, 1989.
16. Fix, S., CMMs move closer to the action.
In: Machine and Tool BLUE BOOK, December 1989.
17. Mitsui, K., In-process sensors for surface roughness and their applications.
In: Precision Engineering, October 1986, Vol. 8, 4.
18. Seitz, G., e.a., 3-D-Koordinatenmessung durch optische Triangulation.
In: Feinwerktechnik & Messtechnik, 94 (1986), 7.
19. Slavik, J., Höfler, H., Optische Rauheitsmessung.
In: Feinwerktechnik & Messtechnik, 96 (1988), 6.
20. Janocha, H., Willkner, L.U., Flexible Meßzelle zur Qualitätssicherung beim Schleifen.
In: Technisches Messen, 55 (1988), 9.
21. Hanke, G., Schäfer, G., Applying optical measurement techniques.
In: Sensor Review, January 1990.
22. Warnecke, H.-J., Ahlers, R.-J., Einfluß der Oberflächenrauheit auf die optische Antastung.
In: Werkstattstechnik, 77 (1987), 6.
23. Sprow, E., Surface Measurements: new challenges.
In: Tooling & Production, March 1989.
24. Keferstein, C.P., Antastverfahren und Genauigkeit bei der Geometriemessung mit Bildverarbeitung.
In: Technisches Messen, 55 (1988), 12.
25. Koch, K.-P., e.a., Koordinatenmessung mit einem Laser-Triangulationstaster.
In: Feinwerktechnik & Messtechnik, 96 (1988), 6.
26. Ahlers, R.-J., Rauh, W., Opto-elektronische Koordinatenmeßgeräte und ihre Einbindung in Qualitätssicherungssysteme, VDI-Berichte, Nr. 836, 1990.
27. Langer, H., Elektro-optische Formprüfung an Freiformflächen, VDI-Berichte, Nr. 836, 1990.
28. Yanagi, K., et al., An Automatic Measurement System for Cutter Edge Configuration by Lateral Scanning of a Laser Beam, Annals of the CIRP, Vol. 39, 1, 1990.
29. Jansen, J.O.M., Contactloos meten met triangulatie-sensoren.
In: Metaal & kunststof, 10 (1990), 5.
30. Jütte, F., Einsatz von Lasersensoren in der Fertigungsmesstechnik.
In: Sensor Magazin, 3, 1989.

31. Warnecke, H.-J., e.a., Möglichkeiten der Bildverarbeitung in der Koordinatenmeßtechnik.
In: Werkstattstechnik, 76 (1986), 8.
32. Batchelor, B.G., et al., Automated visual inspection, IFS Publications Ltd., UK, 1985.
33. Jähne, B., Digitale Bildverarbeitung, Springer Verlag, 1989.
34. Vliet, R.G. van, Beeldverwerking, collegedictaat Capita Selecta uit de meettechniek, nr. 5734, Technische Universiteit Eindhoven, 1990.
35. Verhoeven, G.H.W., Voorstudie voor de ontwikkeling van een camerameetsysteem voor toepassing in de geometrische meettechniek, WPA-rapportnummer 1039, Technische Universiteit Eindhoven.
36. Nawrath, R., Paul, H.-H., 2D-Koordinatentechnik für Mikron-Strukturen auf Halbleiter-Masken.
In: Technisches Messen, 55 (1988), 9.
37. Lenz, R., Grundlagen der Videometrie, angewandt auf eine ultra-hochauflösende CCD-Farbkamera.
In: Technisches Messen, 57 (1990), 10.
38. Breuckmann, B., Optische 3D-Meßsysteme für Online-Anwendungen.
In: Technisches Messen, 57 (1990), 10.
39. Cielo, P.G., Optical Techniques for Industrial Inspection, Academic Press, Inc., San Diego, 1988.
40. Bretsch, J., Automated Inspection Systems for Industrie, IFS Publications Ltd., UK, 1981.
41. Schulze Wilbrenning, B., Geometrie optisch erfassen.
In: Industrie-anzeiger, 1988, 52.
42. Tiziani, H.J., Automatisierung der optischen Qualitätsprüfung.
In: Technisches Messen, 55 (1988), 12.
43. Dorion, T.D., Computer vision based station for tool setting and tool form measurement.
In: Precision Engineering, October 1989, Vol. 11, 4.
44. Dorion, T.D., High precision gaging with computer vision systems.
In: Industrial Metrology, 1 (1990).
45. Spitzley, A., Messen mittels optoelektronischer Bildauswertung.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 33, (1988), 12.
46. Warnecke, H.-J., Keferstein, C.P., Modellgestützte Bildverarbeitung in der Fertigungsmesstechnik.
In: Robotersysteme, 4 (1988).
47. Hodson, N., Engineering vision for PCB assembly.
In: Sensor Review, 7, april 1987.

48. Malle, K., Fertigungsmesstechnik: Kofortabel und Qualitätssicherend.
In: VDI-Z, 132 (1990), 10.
49. Suzuki, M., Kanaya, M., Applications of Moiré Topography Measurement Methods in Industry.
In: Optics and Lasers Engineering, 8 (1988).
50. Arets, J.M.A., Accurate edge detection and gauging with CCD-cameras, afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven, 1989 (Opm.: vertrouwelijk).
51. South, K., Burke, W.J., Automatic Video Inspection - Eye on the Future.
In: Quality, October 1987.
52. Grimbergen, P.A., Een concept voor een 3D-meetmachine. afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven, rapportnummer WPA 970, november 1990.
53. Schwartz, W.H., Vision Systems for PC Board Inspection.
In: Assembly Engineering, 8, 1986.
54. Janocha, H., Gallmeier, M., Rupprecht, K., Ein Vergleich optoelektronischer Triangulationssensoren für Aufgaben der Qualitätssicherung.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 35 (1990), 4.
55. Weil, C., Berührungslos messen ist Trumpf.
In: Werkstatt und Betrieb, 124 (1991), 2.
56. Brücker, F., Lange, B., Meten van gerichte oppervlakte-reflectie.
In: Metaal & Kunststof, 11, 6.
57. Bodschwinn, H., Einsatzmöglichkeiten optischer Verfahren zur Rauheitsmessung in der Industriellen Fertigung, VDI-Berichte Nr. 659, 1987.
58. Marguerre, H., Grijswaarden tonen fouten.
In: CA techniek.
59. Butler, C., Shams, I., Precision co-ordinate measurement using a fibre optic touch probe, conference paper, 28th Matador Conference April 1990.
60. Knutton, P., Checking out the downtime savings.
In: Machinery and Production Engineering, March 1989.
61. Firmenschrift Carl Zeiss, Technische Daten OMC 850, Optisch-mechanisch Meßzentren.
62. Golz, H.U., Automatische Tasterwechseleinrichtung für Koordinatenmeßgeräte.
In: Qualität und Zuverlässigkeit, 35 (1990), 5.
63. Shiraishi, M., Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes:
Part 1: In-process techniques for tools;
Part 2: In-process techniques for workpieces;
Part 3: In-process techniques for cutting processes and machine tools.

64. Teeuwsen, J.W.M.C., Performance evaluation and a quality control system for three coordinate measuring machines, thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1989.
65. Ahlers, R.-J., Die optische Rauheitsmessung in der Qualitätstechnik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1986.

Verantwoording literatuuronderzoek

1. Inleiding

Bij dit literatuuronderzoek is onderzocht welk soort meetmiddelen (sensoren) er op dit moment al worden toegepast in de industrie om geometrische grootheden vast te leggen tijdens of tussen bewerkingsprocessen.

Daarnaast is onderzocht welke ontwikkelingen er nog te verwachten zijn voor deze groep van meetmiddelen.

Bij de beschrijving van de bevindingen is uitgegaan van de meetmiddelen die kunnen worden toegepast om geometrische grootheden van een object binnen bepaalde nauwkeurigheidsgrenzen vast te stellen. Een andere mogelijkheid zou zijn geweest om de mogelijke bewerkingsprocessen in de verspanende-, giet- en plaatverwerkende industrie te analyseren welke zich lenen om te worden gestuurd aan de hand van geometrische metingen aan (half-)fabrikaten.

Van deze laatste mogelijkheid is geen gebruik gemaakt om de volgende redenen:

het aantal toegepaste bewerkingsprocessen in genoemde industrieën is zeer groot. Hierdoor zou een deel van de beschikbare tijd voor de literatuurstudie verloren gaan aan een procesinventarisatie met een grote kans op onvolledigheid;

-voor de verschillende bewerkingsprocessen zijn vaak dezelfde meettechnieken mogelijk, zodat hierdoor voor de verschillende processen eenzelfde beschrijving van meettechnieken nodig zou zijn, hetgeen niet zinvol is.

2. Restricties

Gedurende de gesprekkenronde met de diverse bedrijven is het kader waarbinnen het literatuuronderzoek is uitgevoerd een aantal keren bijgesteld en zijn restricties voor het literatuuronderzoek vastgesteld. Hierbij is rekening gehouden met een tweetal randvoorwaarden :

- vanuit de verspanende-, giet- en plaatverwerkende industrie moet belangstelling bestaan voor de te onderzoeken meetmiddelengroep welke kan worden toegepast voor de bewaking van een proces;
- er moeten gegronde vermoedens bestaan dat voor de te onderzoeken (groep) meetmiddelen nog belangrijke innovaties mogelijk zijn. Doel van dit project is om onder andere een richting te definiëren voor toekomstig onderzoek op dit gebied.

3. Literatuuronderwerpen

Concreet is in de eindfase van het literatuuronderzoek gezocht naar publikaties, rekening houdend met de doelstellingen van het project, welke betrekking hadden op de volgende onderwerpen:

- 1) coördinatenmeetmachines;
- 2) snelle contourmetingen met behulp van camera's in de 2D-ruimte en eventueel in de 3D-ruimte;
- 3) optische- of akoestische sensoren voor het meten van afstanden, waarbij een nauwkeurigheid moet kunnen worden gerealiseerd die in het (sub-)microngebied moet liggen. Hierbij moet gedacht worden aan sensoren voor het vastleggen van oppervlaktparameters en contouren;
Opm.: Dit traject overlapt voor een gedeelte het bij punt 2) genoemde.
- 4) vlakheidsmeting van grote oppervlakken waarbij een meetnauwkeurigheid dient te worden gerealiseerd van een micrometer of minder over oppervlakten groter dan ongeveer 0,25 m².

4. Geraadpleegde bronnen

Bij het literatuuronderzoek is gebruik gemaakt van de volgende literatuurbronnen:

- de bibliotheekindex van de Technische Universiteit Eindhoven;
- Referateorgan " Messen mechanischer Größen " uitgegeven door:
 - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin;
 - VDI/VDE Gesellschaft, Meß- und Automatisierungstechnik (GMA), Düsseldorf;
 - Fachinformationszentrum Werkstoffe e.V. (FIZ W), Berlin;
- " The Engineering Index ", uitgegeven op CD-ROM onder de naam Compendex;
- Tijdschriften welke nog niet zijn opgenomen in een van bovengenoemde bestanden. Veelal betreft het hier tijdschriftnummers vanaf medio 1990 tot heden.

Bij genoemde bronnen is globaal gezocht vanaf jaargang 1987. Om praktische redenen zijn alleen Engels- of Duitstalige bronnen geraadpleegd.

In de praktijk is gebleken dat de vooral het Referateorgan " Messen mechanischer Größen " en " The Engineering Index " de meeste informatie hebben opgeleverd. De reden hiervoor was dat bij deze twee bronnen bij elke publicatie een korte samenvatting van de inhoud is gegeven, hetgeen het selecteren eenvoudiger en doeltreffender maakt en dus het aantal artikelen relatief klein houdt, ondanks de ruime omschrijving van de literaturopdracht.

De laatste bron, " The Engineering Index " had daarnaast nog het voordeel dat deze op CD-ROM is verschenen, zodat het mogelijk is om een zogenaamde zoek sleutel samen te stellen welke door de computer wordt gebruikt als selectie criterium. Een voorbeeld hiervan is de zoek sleutel: (optical OR Acoustic) AND (application OR production).

BIJLAGE III:

Echo-akoestische meetmethoden voor geometrische metingen

Onderzoek:
Technisch Fysische Dienst TNO-TU Delft (TPD)

Auteur:
R. Breeuwer

TOEPASSINGEN IN DE METROLOGIE

De met zorgvuldig uitgevoerde metingen te behalen afstandsresolutie bij ultrasone metingen bedraagt circa $1 : 10^4$. Hierbij wordt uitgegaan van minimaal temperatuurcompensatie en enige middeling. Deze basisnauwkeurigheid is in eigen TPD onderzoek aan vlakke objecten geverifieerd. Bij meting middels een gefocuseerde 1 Mhz transducent in lucht werd bij een focusafstand van 26 mm een 95% betrouwbaarheidsgebied van $3 \mu\text{m}$ gevonden.

Gezien de grenzen aan de maximaal bereikbare nauwkeurigheid lenen ultrasone methoden zich over het algemeen voor metrologische toepassingen waarbij ofwel een relatief geringe nauwkeurigheid vereist is, zoals bijvoorbeeld bij antennereflectoren [84, 85 en 86], ofwel een kleine meetafstand mogelijk is.

Dit laatste is met name het geval bij scannende metingen, zoals b v. in een coördinatenmeetmachine. Toepassing van ultrasone sensoren kan hier leiden tot een verhoging van de meetsnelheid omdat het naderen en volgen van het oppervlak niet exact hoeft te zijn en overshoot bij nadering kan worden toegestaan.

Verder zijn ultrasone methoden, zoals alle contactloze methoden overigens, zeer geschikt voor het bemeten van zeer kwetsbare werkstukken. Zelfs folies van $1 \mu\text{m}$ dikte kunnen goed worden gemeten.

Optische transparantie of spiegeling spelen geen rol en bij werkstukken die vochtig zijn (koeling en smering) kan de meting vanuit een vloeistof plaats vinden.

Voor metrologie komen in hoofdzaak twee methoden in aanmerking:

- akoestische microscopie;
- verstrooiingsmeting.

In de literatuur zijn geen commerciële apparaten gevonden waarmee ultrasone metrologie kan worden uitgevoerd. Wel zijn indicaties aanwezig dat hieraan wordt gewerkt (zie [129] en [8]).

De metingen zijn uitgevoerd in immersie in water bij kamertemperatuur. De proefobjecten waren een vlakke vernikkelde koperen precisie sinusvormige referentie standaard met gebieden met $R_a = 0,3, 1,0$ en $3,0 \mu\text{m}$ en een sinusamplitude van $100 \mu\text{m}$ alsmede een gedraaide aluminium cilinder met ruwheden van $0,2, 0,4, 1,5, 2,7,$ en $3,7 \mu\text{m}$.

Er werd gebruik gemaakt van een commerciële ultrasone immersie transducent met een nominale middenfrequentie van 50 Mhz. Het actuele maximum in het spectrum van een reflectie lag bij 33 MHz. De actieve diameter bedroeg 6.4 mm en de focusafstand 13 mm. In het focus bedroeg de -6 dB bundelbreedte $110 \mu\text{m}$. De focusdiepte was 1 mm. Deze getallen komen ruwweg overeen met berekende waarden volgens [60]. De gegeven afstandsresolutie van $1 \mu\text{m}$ op een focusafstand van 13 mm komt globaal overeen met de genoemde maximaal haalbare waarde van $1 : 10^4$.

Fox [38, 39, 40 en 41] beschrijft hoogfrequente transducenten voor gebruik in lucht, onder andere een 2 MHz gefocuseerde transducent met een dwarsresolutie van $400 \mu\text{m}$ en een afstandsresolutie van $0,6 \mu\text{m}$ en een ongefocuseerde 8,4 MHz transducent met een bundeldiameter van 6 mm, voor een afstand van 0 - 0.5 mm die een resolutie van $0,1 - 0,2 \mu\text{m}$ heeft, afhankelijk van de afstand.

Voor continue excitatie heeft hij een 2 mm diameter 275 kHz resonante transducent ontwikkeld voor een afstandsbereik van 0 - 1 mm in lucht. Deze geeft 0,5 μm resolutie bij een meetafstand van 0,6 mm.

Smith [99] beschrijft een 500 kHz transducent voor gebruik in lucht met een diameter van 25 mm die is gefocuseerd op 75 mm afstand. Hiermee wordt een standaarddeviatie van 25 μm bereikt, dus een 95 % betrouwbaarheidsgebied van circa 50 μm . Met circa 50 x middelen wordt hiermee een resolutie van $1:10^4$ bereikt.

De door Teshigawara [109] voor Omron [132] ontwikkelde commerciële sensor met geïntegreerde elektronica heeft een 850 kHz middenfrequentie en gebruikt een FM methode; door de matige resolutie is deze sensor niet interessant.

Bij oppervlakken waarop steile hellingen of krommingen voorkomen treedt een fout op. Stanke [101] heeft hiervoor een correctiemethode ontwikkeld. Hij geeft aan dat sterk gefocuseerde transducenten een beter resultaat opleveren dan niet of licht gefocuseerde.

Collie [27] heeft signaalverwerkingsmethoden (diverse filtermethoden) onderzocht voor het correct interpreteren van metingen aan kleine structuren. Uit een meting met een (ongefocuseerde ?) 10 MHz transducent in water aan een in één richting gegroefd oppervlak (rechthoekige groeven 1 mm breed en 25 μm diep, met 1 mm tussenruimte) werden met de maximum entropie methode groeven onderscheiden.

A. Verstrooiingsmeting

Bij deze meting wordt naar de amplitude of het spectrum van een reflectie aan het oppervlak gekeken. In het algemeen worden licht gefocuseerde of ongefocuseerde transducenten gebruikt. Voor (nagenoeg) perfecte speculaire reflectie is een oppervlakteruwheid van 1/8 golflengte of minder vereist. Grotere ruwheden zullen dus een verlaging van de echo-amplitude veroorzaken die kan worden gedetecteerd.

Bij verstrooiingsmetingen van Blessing [9] werd meting in lucht vergeleken met meting in water. Met normale inval werden een 2,3 MHz transducent in lucht en een 10 MHz transducent in water vergeleken. In beide gevallen werd een reductie van de echo-amplitude gemeten van 5 % bij $R_a = 5 \mu\text{m}$ tot 60 % bij $R_a = 23 \mu\text{m}$.

Bij latere metingen [8, 10 en 11] in immersie in water bij kamertemperatuur werden met een 15 MHz transducent bij normale inval een spectraal maximum en minimum gevonden: bij een ruwheid van 1 μm ongeveer 15 % van de waarde van het maximum en bij 3 μm ruwheid ongeveer 50 % van het maximum. Het oppervlak met 0,3 μm ruwheid kon niet worden onderscheiden van een optisch vlak oppervlak.

Onder een invalshoek van 30 ° (met een -6 dB openingshoek van de bundel van de transducent van 6 °) werden op dezelfde wijze en met dezelfde transducent een signaalsterkte gemeten met een maximum bij 15 MHz van ca. -20 dB voor 0,3 μm ruwheid, -10 dB voor 1 μm ruwheid en -1.5 dB voor 3 μm ruwheid, alles ten opzichte van de reflectiesterkte van een optisch vlak oppervlak bij normale inval.

Bridge [14] heeft gemeten aan oppervlakken met een CLA van 0,5 - 10 μm en een gemiddelde periodiciteit van 0,1 - 1 mm. Aangenomen is dat de metingen in immersie in water zijn uitgevoerd. Door hoekafhankelijke verstrooiingsmetingen kon de periodiciteit van de ruwheid met een nauwkeurigheid beter dan 2 % worden bepaald.

De amplitude ervan werd met een nauwkeurigheid van 18 % bepaald.

De verstrooiing blijkt zich te gedragen als die van een optisch raster met meerdere spleten.

Cohen-Tenoudji [26] rapporteert metingen van spectrale verstrooiing bij normale inval aan oppervlakken met een ruwheid van $8 \mu\text{m}$ bij een periodiciteit van $60 \mu\text{m}$ en $50 \mu\text{m}$ bij een periodiciteit van $200 \mu\text{m}$. In immersie, met een transducent met 12 MHz bandbreedte werden goede resultaten verkregen.

Door Whitehouse [115] worden ultrasone technieken slechts zeer kort vermeld. De bij de optische technieken beschreven "gloss meter" (verhouding tussen speculaire reflectie en verstrooiing) kan echter ook ultrasoon worden uitgevoerd.

CONCLUSIES

In dit onderzoek is een aantal ultrasone metrologietechnieken gevonden die toepasbaar zijn voor het bemeten van metalen of kunststof werkstukken in een productie-omgeving. Met name de akoestische microscopiemethode lijkt goede mogelijkheden te bieden.

In lucht is bij een nauwkeurigheid van $1 \mu\text{m}$ (bij een resolutie van $1:10^4$) een maximale meetafstand van 10 mm mogelijk, hetgeen juist op de toelaatbare grenswaarde ligt. De maximale golflengte is $500 \times 1 \mu\text{m}$, ofwel de frequentie is minimaal 700 kHz. Gezien de afstand van 10 mm is de maximale frequentie circa 3 MHz. Hiermee is deze optie nominaal haalbaar.

De haalbaarheidsmarge is groter bij meting in immersie; daarbij is 375 MHz geluid gebruikt op een afstand van 13 mm. De maximale golflengte correspondeert met een frequentie van circa 3 MHz zodat een frequentiekeuze in een gebied van meer dan 1 : 100 kan geschieden.

Voor de nauwkeurigheid van $100 \mu\text{m}$ liggen ook in lucht de marges ruimer. De afstand kan worden vergroot tot maximaal circa 1 m bij een frequentie van maximaal 250 kHz. De frequentie kan dan vanaf enkele tientallen kHz worden gekozen.

In de literatuurlijst heeft een aantal referenties het predikaat "laagfrequent" gekregen.

In het algemeen gaat het hier om industriële toepassingen van ultrasone afstandsmeting. Enige voorzichtigheid is geboden bij de interpretatie van de bruikbaarheid van deze systemen en/of transducenten. Bij smalbandige transducenten (lange puls van vele perioden) is de nauwkeurigheid veel slechter dan de hier gehanteerde getallen.

Met name de meer breedbandige systemen (Polaroid transducent) zijn echter in principe binnen de hier gestelde specificaties bruikbaar (resolutie 10 - $100 \mu\text{m}$ bij een afstand van 50 - 150 mm). Deze systemen zijn soms zelfs reeds commercieel verkrijgbaar en potentieel qua kostprijs zeer aantrekkelijk (bij aantallen zijn prijzen van enkele honderden guldens in principe haalbaar).

Voor immersiemetingen zijn systemen tot ca 20 MHz vrij algemeen verkrijgbaar in de NDT sfeer. De prijzen liggen echter wat hoger (vanaf ca. f 10 000).

Voor luchttoepassingen boven 1 MHz en immersiemetingen boven 50 MHz zijn wel een aantal componenten beschikbaar maar zullen speciale systemen moeten worden samengesteld, waarmee de prijzen vanaf circa f 5 000 respectievelijk f 15 000 zullen komen te liggen, afhankelijk van de precieze specificaties.

LITERATUUR

- 2 Computer controlled robot with ultrasonic sensor
Affinito, F.J. S.S. Wang Y.S. Yee
IBM Technical Disclosure Bulletin vol 18 nr. 8 januari 1976

laagfrequent ultrasonoor met aparte zender en ontvanger
- 3 Measuring tasks for coordinate measuring instruments - results from an analysis
Auge, J.; Eversheim, W.; Wartmann, U.
Qual. Zuverlässigk. vol. 34, no. 5, May 1989, p.233-7

algemeen overzicht toepassingen coördinaten-meetsystemen
- 4 Sound absorption in air at frequencies up to 100 kHz
Bazley, E.N.
National Physical Laboratory (U.K.) Report AC74 (1976)

achtergrond gegevens over geluidabsorptie in lucht
- 7 Ultrasonic distance sensor
Biehl, K.E.
Elektronik (Germany), vol. 32, nr. 26, p113-15 1983

laagfrequente transducenten 40 - 215 kHz voor industrieel gebruik
- 8 Surface micrometrology using ultrasound
Blessing, G.V. et al
IEEE Ultrasonics Symp. 1990 Proc. vol. 2, p.1047

oppervlakte ruwheid en profiel R_a 0.2 - u_μ in immersie; zeer interessant
- 9 The effect of surface roughness on ultrasonic echo amplitude in steel
Blessing, G.V.; Bagley, P.P.; James, J.E.
Mat. Eval. 42(1984), p.1389-1400

hetzelfde materiaal is ook gebracht in een lezing voor het 1983 IEEE Ultrasonics Symposium.
Met normale inval en een 2,3 MHz transducent in lucht en een 10 MHz transducent in water werd een reductie van de echo-amplitude gemeten van 5 % bij $R_a = 5 \mu\text{m}$ tot 60 % bij $R_a = 23 \mu\text{m}$.
- 10 Ultrasonic sensor for measuring surface roughness
Blessing, G.V.; Eitzen, D.G.
SPIE 1009 Surface measurement and characterization (1988) p.281-289
- 11 ?
Blessing, G.V.; Eitzen, D.G.
Octrooi U.S. 4,738,139 (19 April 1988)

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 12 Ultrasonic meter for distance to water surface - uses calibrated reflector with pulse count system giving accurate comparative results
Bodyyagin, V.I.; Ivanov, N.A.; Koskvich, V.M.
Octrooi SU-901966-A (8247) * 82-A2487J/47 * 80.01.21 80SU-8720791

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 13 Environmental effects on the speed of sound
Bohn, D.A.
J. Audio Eng. Soc. 36 (4) April 1988 p.223-231

achtergrondgegevens over geluidvoortplanting in lucht

- 14 A study of omnidirectional scattering of 4-3- MHz ultrasound from periodically rough-machined aluminium surfaces. I
Bridges, B.; Tahir, Z.
BR.J. Non-Destr. Test. (UK) vol. 31, nr. 1, Jan. 1989, p.9-18

Er is gemeten aan oppervlakken met een CLA van 0,5 - 10 μm en een gemiddelde periodiciteit van 0,1 - 1 mm. Aangenomen is dat de metingen in immersie in water zijn uitgevoerd. Door hoekafhankelijke verstrooiingsmetingen kon de periodiciteit van de ruwheid met een nauwkeurigheid van 18 % bepaald.

De verstrooiing blijkt te voldoen aan het model voor een optisch raster met verschillende spleten.

- 15 Aspects of ultrasonic testing
Brook, C.
Chart.Mech.Eng. (GB) vol. 27, nr. 3, March 1980, p.59,61-3

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 18 A temperature compensated ultrasonic sensor operating in air for distance and proximity measurements
Canali, C.; et al
IEEE Trans.Ind.Electron. (USA), vol. IE-29, nr. 4, p.336-41 1982

laagfrequente transducent 250 kHz maximale afstand 1 m resolutie 0,1 mm

- 20 A fully compensated ultrasonic sensor for distance measurement
Chande, P.K.; Sharma, P.C.
IEEE Trans.Instrum.Meas. IM-33 (2) 128-129 June 1984

laagfrequent methode; geen gegevens over transducent

- 22 Ultrasonic micro-metrology
Chubachi, N.
J.Jpn. Soc. Precis.Eng. (Japan) vol 55, no. 8, Aug. 1989, p.1350-4

Uit de samenvatting blijkt dat met het V(z)-effect in immersie micro-domeinen kunnen worden waargenomen.

- 24 A 250 kHz piezo-electric transducer for operation in air: application to distance and wind velocity measurements
Cicco, G. de; et al
IEEE 1982 Ultrasonic Symp.Proc. p.321-324

relatief laagfrequente transducent; slechte pulsform

- 26 Characterisation of randomly rough surfaces by ultrasonic backscatter at normal incidence
Cohen-Tenoudji, F.; Quentin, G.
Rev. Cethedec (France) vol. 16, no. 60, 1979, p.147-54, In French
- Spectrale verstrooiing bij normale inval gemeten aan oppervlakken met een ruwheid van 8 μm bij een periodiciteit van 60 μm en 50 μm bij een periodiciteit van 200 μm met een transducent met 12 MHz bandbreedte gaf goede resultaten.
- 27 Signal processing of ultrasonic signals with applications to surface metrology
Collie, D.A.L.; Player, M.A.
Ultrasonic International 87 Conf.Proc. 1987, p.327-32
- signaalbewerking: maximum entropie, Wiener filter
- 28 Sonic measuring apparatus for distances within elongate enclosures - comprises variable gain amplifier to measure gain increase correspond. to attenuation of pulse sound with time or distance.
Cope, C.E.; Brady, C.I.
Octrooi GB2107870-A (8318) * 83-F9000K/18 * 81.08.18 81GB-025215 82.08.17 82GB-023566
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 30 Sonar distance sensing apparatus. -uses amplifier to increase amplification of reflected pulse as function of time elapsed from pulse transmission.
Czajowski, S.B.
Octrooi WO8102472-A (8138) *81-J9246D/38 *80.02.22 80 GB-006161 81.00.00 81GB-031649
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 31 A robot ultrasonic sensor for object recognition
Dorf, R.C.; Nezamfar, A.
Proc. of the Robots 8 Conf. 4-7 June 1984, Detroit, Michigan
- laagfrequent (215 kHz) robotica transducent
- 32 Ultrasonic distance sensor with dual burst noise rejection
Eder, K.C.; Krzyanowski (Honeywell)
Octrooi US 4,679,175 (review J.A.S.A. 83 (4) April 1988, p. 1710
- laagfrequent transducent voor industriële afstandsmeting
- 35 An ultrasonic device which can be used for distance measurement
Ferraioli, A.; Nightingale, J.M.; Serafini, V.
Elettron.Oggi (Italy), no. 1, p.121-2,124,126, 1982
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 37 An ultrasonic range sensor array for a robotic fingertip.
Fiorillo, A.S. et al
Proc. Sensor & Actuators 1988 (Euroensors II), p.103
- multipel element gefocusseerde transducent op halve boldiameter 11 mm

- 38 High-frequency acoustic wave measurements in air
 Fox, J.D.; Khuri-Yakub, B.T.; Kino, G.S.
 IEEE 1983 Ultrasonic Symp.Proc., p.581-584
- 1 en 2 MHz transducenten voor gebruik in lucht; maximum meetafstand 40 cm bij 780 kHz; geen verdere gegevens van belang
- 39 Complementary air acoustics: an imaging microscope and a resonant rangefinder
 Fox, J.D.; Khuri-Yakub, B.T.; Kino, G.S.
 IEEE 1985 Ultrasonic Symp.Proc., p.463-7
- 2MHz gefocusseerde lucht transducent
 dwarsresolutie 400 μm , hoogresolutie 0,6 μm .
- 2 mm diameter ongefocuseerde 275 kHz resonante transducent voor afstandmetingen vanaf 0 - 1 mm afstand
 resolutie 0,5 μm (bij een afstand van 0,6 mm)
- 40 Excitation and detection of 8 MHz acoustic waves in air
 Fox, J.D.; Khuri-Yakub, B.T.; Kino, G.S.
 IEEE 1984 Ultrasonic Symp. Proc., p.475-9
- ongefocusseerde 8,4 MHz transducent voor lucht
 bundeldiameter 6 mm
 afstand 0 - 0.5 mm
 resolutie 0,1 - 0,2 μm , afhankelijk van de afstand
- 42 An ultrasonic distance measuring device with decremental acquisition of the measuring results
 Gast, T.; Tm (Germany), vol. 46, no. 7-8, p.293-5 1979
- laagfrequent ultrasoon (34 kHz) voor industriële afstandsmeting
- 44 Ultrasonic continuous distance measurement - by amplifying and demodulating reflected signal and by phase comparison displacement between transmitted and received frequencies.
 Gruener, H.J.; Mencke, H.; Oertmann, P.; Stroesser, W.
 DD-205542-A (8417) *84-1-2-3-/17 *82.06.03 82DD-240396
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 46 Ultrasonic ranging on a computer controlled mobile robot
 Harington, D.G.; Hsia, T.C.
 Dept.Electrical & Computer Engineering, U. of California, Davis, CA 95616
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 47 The velocity of sound in air
 Hardy, H.C.; Telfair, D.; Pielemeier, W.H.
 JASA 13 (1942), p.226-233
- achtergrondgegevens van geluidsnelheid in lucht
- 49 Sound in air: absorption and dispersion
 Henderson, M.C.
 Sound vol. 2, no. 6, p.28-36, November-December 1963

- 50 Reversing aid for vehicle - has ultrasonic echo detecting circuit indicating distance between obstacle and partic. part of vehicle in terms of bleed frequency
Heyes, A.D.
GB2112520-A (8329) *83-713069/29 *81.11.18 81GB-034671

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 51 The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air
Hickling, R.; Marin, S.P.
JASA 79 (4) April 1986, p.1151-1160

overzicht van algemene achtergronden; hoofdzakelijk laagfrequent toepassing

- 52 Physical principles of medical ultrasonics
Hill, C.R.
1986 C.R. Hill/Ellis Horwood Ltd ISBN 0-85312-208-3

algemene eigenschappen van ultrageluid

- 53 Frequency dependence of the speed of sound in air
Howell, G.P.; Morfey, C.L.
JASA 82 (1) July 1987, p.375-376

Het effect is geassocieerd met absorptie door relaxatie;
in een berekeningsvoorbeeld wordt 0,03 % variatie gevonden.

- 56 Location of ultrasonic transducer relative to work-piece - using motor driven satellites to receive echoes and generate distance signals.
Jackson, G.; Surawy, R.C.
DE3227130-A (8308) *83-C4987K/08 *81.07.25 81 GB-023024 82.07.22

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 59 A new design for air transducers
Khuri-Yakub, B.T.
IEEE 1988 Ultrasonics Symposium, IEEE Cat. 88CH2578-3 Vol. 1 p. 503-506

constructions details van 1 MHz transducent voor gebruik in lucht.

- 60 Acoustic waves
Kino, G.S.
Prentice-Hall, London, 1987 ISBN 0-13-003047-3 025

algemene ultrasone theorie en toepassingen

- 61 Detection of obstacles using a supersonic wave sensor
Kitao, M.; Oka, E.
Eng. Technol. (Japan) vol.8, no.4, 1986, p.15-20 in Japanese

uitsluitend laagfrequente toepassingen voor robotica

- 62 Ultrasonic distance measuring and imaging systems for industrial robots
Knight, J.; Pomeroy, S.; Dixon, H.; Wybrow, M.
Robotics (NL) vol.3, no.2, June 1987, p.181-187 ISSN: 0167-8493

laagfrequente systemen (200 kHz)

- 63 Ultrasonic testing of materials
Krautkramer, J. H. Krautkramer
2nd Edition Springer-Verlag New York 1977 ISBN 0-387-07716-2

algemene ultrasone theorie en ultrasoon niet destructief onderzoek
- 64 Acoustic measuring gauge for micron and sub-micron distances - measures phase error between reference signals and signals from high impedance zone formed near two-orifice gauge head
Kren, G.J. Koenig F.R.
Octrooi US4285053-A (8136) * 81-J4459D/36 * 79.05.21 79US-040930

niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 65 Ultrasonic distance measuring equipment - uses transducer with separately excited concentric zones to compensate for path differences due to finite size
Krisch, L. Kiefer, D.
Octrooi DE3302886-A (8433) * 84-202033/33 * 83.01.28 83DE-302886

niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 66 Ultrasonic testing apparatus ascertaining shape of object - accumulates received signals corresponding to distances between points on surface and reproduction point in desired region
Kubota J., Ishii J., Sasaki S.
Octrooi EP-105966-A (8418) * 84-108774/18 * 82.10.19 82 EP-109646 82.10.18 82 US-434879

niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 67 Sonic or ultrasonic distance measuring device
Lau, J. (Endress & Hauser)
U.S. Pat. 4,675,854 Abstract JASA 83 (3), March 1988 p. 1209

niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 68 Ultrasonic robotic sensor with lateral resolution
Loschberger, J. V. Magori
Proc. 1987 IEEE Ultrasonics Symp. p. 547- 551 IEEE catalog # 87CH2492-7 ISSN 0090-5607

200 kHz transducent met goede pulsvorm en richtkarakteristiek;
bandbreedte 250 kHz
- 70 Ultrasonic measurements for process control - Theory, techniques, applications
Lynnworth, L.C.;
Academic Press, Inc., 1989, pp. 694.

algemeen overzicht van allerlei ultrasone technieken
- 71 Ultrasonic sensors based on piezoelectric polymers
Manthey, W.; Kroemer, N.
Technisches Messen tm vol.56, no.10, 1989, p.377-84 In German

laagfrequente PVDF transducenten (40 - 100 kHz)
goede pulsvorm

- 72 Ultrasonic distance measurer for industrial robot control - uses receiver on object and receiver at known distance for comparison
 Manthey, W. Sahner, P. Neumeister U.
 Octrooi DD-207771-A (8428) * 84-171581/28 * 82.06.11 82DD-240637
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 73 Acoustic imaging using a small set of transducers
 Marsh, K.A. J.Richardson J.Schoenwald J.Martin
 Proc.4th Int'l Conf.on Robot Vision and Sensory Controls Londen, October 1984
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 74 Ultrasonic transducers for use in air
 Massa F.
 IEEE Proc. S.-U. Vol.53 nr 10 p.
- 200 kHz smalbandige transducenten
- 75 Measuring object distance and detecting object presence - by transmitting signal wave periodically and evaluating received signals changes
 Masuko, A.
 Octrooi DE3151195-A (8227) * 82-H9463E/27 * 81.04.17 81JP-057928 80.12.23 80JP-182363
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 76 Automated ultrasonic dimensional and defect inspection of complex geometry gas turbine airfoil shapes
 Matay, I.M.; Fetheroff, C.W.; Neal, P.E.; Murphy, S.D.; Derkacs, T.
 Rev. Prog. Quant. Nondest. Eval. Vol.1. 1982, p.71-7
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 77 Design considerations in multiprobe roundness measurement
 Moore, D.
 J. Phys. E, Sci. Instrum. vol.22, no.6, June 1989, p.339-43
- algemene beschouwingen over rondheidsmetingen
 geldt ook voor ultrasone probes.
- 79 Ultrasonic meter for distance measurement - has series-connected time code converters coupled to reference converters to form piece-wise linear approximation
 Neimark G.S., Yampolskii D.V.
 Octrooi SU-765767-A (8128) * 81-G4805D/28 * 78.07.24 78SU-650611
- niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 81 Ultrasonic pulse burst transition time distance measurement - using extracted threshold to allow for oscillations in pulse bursts
 Novak P, Bramm G.
 Octrooi DE3149256-A (8326) * 83-J5174K/26 * 81.12.11 81DE-149256
- toepassing: meting afstand gereedschap op machine

- 83 Moving object distance difference measuring system - uses frequency division of received signal and signal equal to transmit signal and synchronising divided signals
Oberholz, H.W.
Octrooi DE3200004-A (8329) * 83-712313/29 * 82.01.02 82DE-200004

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 84 Ultrasonic measurement of reflector antenna surface profiles
Parini, C.G.; Clarricoats, P.J.B.
Coll. Measurement, Tolerance and Performance of Large Reflector Antennas London, England 13 Nov. 1981, p.3/1-3, Publisher: IEE

laagfrequente profielmeting parabolische antenne tot 5 m diameter

- 88 Review of noise propagation in the atmosphere
Piercy, J.E.; T.F.W. Embleton; L.C. Sutherland
JASA 61 (6) June 1977 p.1403-1418

achtergrondgegevens geluidvoortplanting in lucht

- 89 Ultrasonic distance measuring and imaging systems for industrial robots
Pomeroy, S.C. M.D. Wybrow + J.A.G Knight
Proc. 56th Int'l Conf. Robot Vision and Sensory Controls 1985, p.239-249

laagfrequente robotica toepassingen (50 - 210 kHz)

- 91 Measuring by ultrasound
Redding, R.J.
Electronics & Wireless World August 1988 p. 775-778

laagfrequent cw methode (25-75 kHz)

- 92 Ultrasonic reflection distance measurement system for cameras - tests echo impulse duration for noise suppression purposes
Reynard, J.
Octrooi DE3037139-A (8117) * 81-D6993D/17 * 79.10.03 79US-081357 81.05.26 81US-266901

laagfrequent methode

- 94 Ultrasonic sensor with transmitter and receiver for range finding - has pulse generator with time delay and counter activating active zone
Riss, H. Forster, A.
Octrooi DE3210470-A (8340)8 * 83-777709/40 * 82.03.22 82DE-210470

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 95 Sonar rangefinder system for e.g. camera - selectively inhibits receiver from providing output range signal for interval subsequent to sonic burst transmission
Rodriguez, M.T.
Octrooi US4439846-A (8415) * 84-094901/15 * 81.11.18 81US-322469

laagfrequent methode

- 96 Acoustic distance measuring system - uses predetermined FSK bit sequence as transmitted and received acoustic signal with PLL detector
Saylor J.A.
Octrooi US4313183-A (8206) * 82-B5211E/06 * 80.06.27 80US-163639

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 98 The determination of surface topology by the signal processing of ultrasonic pulses
Smith, P.F. M.A. Player D.A.L. Collie
J. Phys. E.: Sci. Instrum. 21 (1988) p. 397-402

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 99 High frequency acoustic systems for robotic applications
Smith, R. et al
Mater. Eval. 46 (Sept. 1988) p. 1262-1266

relatief laagfrequent (500 kHz)
met 25 mm diameter transducent, gefocusseerd op 75 mm afstand wordt een
standaarddeviatie van 25 μ m bereikt.

- 100 Ultrasonic liquid level meter for open channel - is positioned directly above liquid
surface and compensates for changes in gaseous environment between liquid and
meter
Soltz, D.J.
Octrooi US4470299-A (8439) * 84-242960/39 * 82.01.04 82US-337082

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 101 Profiling high-angle surfaces with focused transducers and time-of-flight measurements
Stanke, F.. K.K. Liang
IEEE Ultrasonics Symp. 1990 Proc. Vol. 2 p.1053

afstandcorrectie voor profielmetingen aan oppervlakken met sterke hellingen.

- 103 Ultrasonic distance measuring device - generates set of ultrasonic signals of sufficiently
short duration to allow accurate measurement of relatively short range of distances
Sugiyama, K.
Octrooi EP--75617-A (8315) * 83-E8285K/15 * 81.09.24 81 EP-304417 81.09.15
81AU-075253

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 106 A new method for measuring distance by using ultrasonic wave
Takemura, H.;Kitaura, H.
Mem.Hokkaido Inst.Technol.,(Japan),nr. 11 p 109-16 1983

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 107 Ultrasonic distance sensor system and method with correction feature for sensor value.
Tanaka,H.
Octrooi U.S 4,630,226 (Rev. JASA 82 (1) juli 1987, pp 404)

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 108 ?
Tenoudji, C.F. G. Quentin
J. Appl. Phys. 53 (b) 1982 p. 4057

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 109 High resolution (0.2 mm) and fast response (2 ms) range finder for industrial use in air
Teshigawara, M.; F. Shibata; H. Teramoto
IEEE 1989 Ultrasonics Symp. Proc. p.639

850 kHz middenfrequentie FM methode; matige resolutie
commerciële sensor (Omron [132], zie aldaar)

- 111 Shape-reconstruction system for three-dimensional objects using an ultrasonic distance sensor mounted on a manipulator
Tsujimura, T.; Yabuta, T.; Morimitsu, T.
Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control vol.111, no.2, June 1989, p.180-6

tactiele sensor

- 112 Acoustic micro-metrology
Weglein, R.D.
IEEE SU-32, nr.2, March 1985, pp. 225-234.

ultrasone microscopie in water bij 375 MHz
hoofdzakelijk AMS (Acoustic Material Signature)
voor karakterisering geïnspecteerd materiaal

- 113 Image resolution of the scanning acoustic microscope
Weglein, R.D.; R.G. Wilson
Applied Physics Letters 31, Dec. 1977, pp. 793-796.

375 MHz akoestische microscopie in water met saffier lens
laterale resolutie 1,15 μm

- 117 Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature
Wong, G.S.K. T.F.W.Embleton
JASA 77 (5) mei 1985 p 1710-1712

achtergrondgegevens geluidvoortplanting in lucht

- 118 Characteristic impedance of humid air
Wong, S.K.
JASA 80 (4) Oct. 1986 pp. 1203-1204

achtergrondgegevens geluidvoortplanting in lucht

- 119 Speed of sound in standard air
Wong, G.S.K.
JASA 79 (5), May 1986, pp. 1359-1366

achtergrondgegevens geluidvoortplanting in lucht

- 123 Range finding and surface characterization using high-frequency air transducers
Yano, T.; Tone, M.; Fukumoto, A.
IEEE Trans. UFFC-34, no.2, March 1987, p.232-6

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 127 CONTAQ ultrasonic distance measurement products
anon
Commercial information

laagfrequent; gebruik Polaroid transducenten

- 129 Manufacturing technology program assessment of new sensor technologies for the U.S. machine tool industry
anon
AFWAL-TR-88-4177 (Wright-Patterson AFB, OH, 1988)

niet tijdig ontvangen voor bestudering

- 130 Scanbat ultrasonic tape measure
anon
commercial information

laagfrequente afstandsmeter met Polaroid transducent
- 131 Ultraschall-Naherungsschalter
anon
Commercial information

laagfrequente afstandsmeting
- 132 Ultrasonic displacement sensor E4DA
anon

Omron commercial info; see also Teshigawara [109]
850 kHz FM systeem 0,2 mm resolutie
- 133 Ultrasonic distance measuring device - measures time taken by signal transmitted
towards object to return to source
anon
J57206871-A (8305) * 83-B5455K/05 * 81.06.12 81JP-091202

niet tijdig ontvangen voor bestudering
- 134 Ultrasonic ranger type HE-220, HE-401, HE-420, HE-501, HE-520
anon
commercial info

laagfrequent
- 135 Ultrasonic ranging module Model E-201
anon
commercial info

210 kHz smalbandig
- 136 Ultrasonic ranging system for accurate distance measurement and object detection
anon

Polaroid commercial documentation
laagfrequent (ca 70 kHz)
- 137 Ultrasonic surface roughness gauge - uses phase shift of reflection as indication of
magnitude of surface irregularities
anon
FR2473169-A (8135) * 81-J0366D/35 * 80.01.08 80IT-067019

niet tijdig ontvangen voor bestudering