

## MASTER

### De opzet van een kwaliteitsbewakingssysteem voor 3D-meetmachnes

Theuws, F.C.C.J.M.

*Award date:*  
1987

[Link to publication](#)

#### **Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

#### **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

v/d W

BB 444578

De opzet van een kwaliteits-  
bewakingssysteem voor 3D-meetmachines.

Auteur: F.C.C.J.M. Theuws

WPA Rapport nr. 0476, september 1987.

Verslag eindstudieopdracht.

Afstudeerhoogleraar: Prof. dr. ir. A.C.H. van der Wolf.

Begeleiders: Dr. ir. P.H.J. Schellekens,

Ir. J.W.M.C. Teeuwsen,

Ing. H. v/d Wardt.

## Voorwoord

In dit rapport wordt verslag gedaan van mijn eindstudie-opdracht bij Volvo Car B.V. te Born c.q. Helmond. De opdracht is tot stand gekomen uit een combinatie van de wens naar een hoger niveau van kwaliteitsbeheersing bij Volvo, en de aanwezige kennis op het gebied van 3D-meetmachines bij de T.U. Eindhoven, met name de in groep meettechniek van de faculteit der Werktuigbouwkunde.

In dit voorwoord wil ik alle medewerkers binnen Volvo, waarmee ik gedurende dit projekt heb mogen samenwerken, bedanken voor hun bereidwillige medewerking tijdens de verschillende fasen van het projekt. Hierbij denk ik met name aan Heinz v/d Wardt (QE), Koos Beeks (ME VPO), Jan van Daal (QE), Mat Camp (meetkamer Born), Peter Frenken (meetkamer Helmond) en Martin v/d Heuvel (Styling Helmond).

Alle medewerkers en studenten, binnen de groep meettechniek van de T.U. Eindhoven, wil ik hier dank zeggen voor hun steun en de prettige werksfeer. Met name Piet Schellekens en Jan Teeuwsen hebben een enorme bijdrage geleverd aan de uitvoering van dit projekt.

Ook gaat een speciaal woord van dank uit naar Ad de Gilde, die een groot gedeelte van het vele meetwerk heeft uitgevoerd.

Een bescheiden dankwoord gaat in de richting van collegastudent Hans Soons die, met zijn vele relativerende opmerkingen, immer stimuleerde tot diepgaandere beschouwingen.

Ook wil ik hier Oda en Inka dank zeggen voor hun taalkundige adviezen. Tot slot wil ik Prof. van der Wolf bedanken voor de getoonde interesse, adviezen en begeleiding.

Frank Theuws,  
september 1987.

## Samenvatting

In het kader van een streven naar een hogere produktkwaliteit, zijn bij Volvo Car BV een aantal 3D-meetmachines aangeschaft. Teneinde de uitwisselbaarheid van de meetgegevens te kunnen garanderen, dient de onnauwkeurigheid van deze meetmachines bewaakt te worden. Hiertoe is contact gezocht met de T.U. Eindhoven, waarna een projekt is opgestart dat een dergelijk kwaliteitsbewakingssysteem moest opzetten.

Na een uitgebreide inventarisatie van de aanwezige 3D-meetmachines is besloten de controle van de meetmachines op te splitsen in twee delen. Hierbij wordt als eerste een testprocedure ~~worden~~ uitgevoerd, waarna bij twijfel over de onnauwkeurigheid een uitgebreide controle (afname) plaats vindt. hvd v

De testprocedure is opgesplitst in een basis- en uitvoerige testprocedure, waarbij de laatste iedere drie basis-testen moet worden uitgevoerd. In de testprocedures wordt gebruik gemaakt van eindmaten, stappeneindmaten en een richtkijker. De meetposities zijn vastgelegd in een software-pakket. Dit dient echter nog uitgebreid te worden met enige applicatieprogramma's, zoals software-matige uitrichtfaciliteiten voor de (stappen-) eindmaat en bepaling van de tasterafwijkingen uit bolmetingen.

De afnameprocedures zijn afhankelijk van het type machine. Hiervoor is een groepsindeling gecreëerd zodat alle meetmachines binnen één groep dezelfde afnameprocedure kunnen ondergaan. Deze afnameprocedures zijn voor alle groepen geformuleerd waarbij tevens de verwerking van de meetgegevens en een schatting van de maximale afwijking in het software-pakket zijn meegenomen.

Het ontwikkelde software-pakket beheert tevens de datums waarop de verschillende machines getest dienen te worden. Verder is een adressenbestand aanwezig waarin de leveranciers van de, bij Volvo aanwezige meetmachines, zijn opgenomen.

## Inhoud

Inhoudsopgave	I
Symbolen	III
<u>1. Inleiding</u>	1
1.1 Algemene inleiding	1
1.2 De gekozen strategie	2
<u>2. Inventarisatie</u>	4
2.1 Overzicht aanwezige 3D-meetmachines	4
2.2 Indeling	7
<u>3. Afnameprocedures</u>	9
3.1 De bronnen van afwijkingen in een 3D-meetmachine	9
3.1.1 Een model van een 3D-meetmachine	10
3.1.2 De geometrische bronnen van afwijkingen	11
3.1.3 De afwijkingen-analyse	13
3.1.3.1 Verplaatsings-afwijkingen	13
3.1.3.2 Draaiings-afwijkingen	13
3.1.3.3 Haaksheids-afwijkingen	14
3.1.4 De totale meetafwijking	14
3.1.5 Andere bronnen van afwijkingen	17
3.2 De meetmiddelen	19
3.2.1 Positie-afwijkingen	19
3.2.2 Rechtheids-afwijkingen	21
3.2.3 Kantel-afwijkingen	24
3.2.4 Rotatie-afwijkingen	26
3.2.5 Haaksheids-afwijkingen	27
3.3 De afnameprocedure	28
3.3.1 Groep 1: de DEA-meetmachines	28
3.3.1.1 Laserpositiemetingen	29
3.3.1.2 Eindmaatmetingen	30
3.3.2 Groep 2: de Stiefelmayer-, Mora- en Zeiss-meetmachines	33
3.3.3 Groep 3: de Mitutoyo-meetmachine	39

<u>4. Testprocedures</u>	43
4.1 Inleiding	43
4.2 De keuze van een testprocedure	45
4.3 Testobjecten	46
4.4 De testprocedure	48
4.4.1 Basis-testprocedure	49
4.4.2 Uitvoerige testprocedure	53
4.5 Aanbevelingen	55
<u>5. Het programma in flow-chart vorm</u>	56
5.1 Het hoofdprogramma	56
5.2 Het programmablok "Overzicht"	58
5.3 Het programmablok "Afnameprocedure 1"	60
5.4 Het programmablok "Afnameprocedure 2 en 3"	62
<u>6. Conclusies en aanbevelingen</u>	65
Literatuur	67
Inhoudsopgave appendices	69

## SYMBOLLEN

$\underline{A}_m$	ideale meetvector in coördinatensysteem UVW	m
$\underline{A}_{mw}$	werkelijke meetvector in coördinatensysteem UVW	m
$\underline{A}_{ou}$	verbindingsvector in coördinatensysteem UVW	m
$\underline{A}_t$	tastervector in coördinatensysteem UVW	m
$\underline{A}_{uv}$	verbindingsvector in coördinatensysteem UVW	m
$\underline{A}_{vw}$	verbindingsvector in coördinatensysteem UVW	m
$C(\alpha)$	capaciteit afhankelijk van de hoek $\alpha$	$\mu F$
d	factor voor coördinatensysteem translatie en rotatie	-
dL	enkele meetafwijking van de eindmaat	m
D	afstand tussen laserbundels	m
E	rechts (1) of linksdraaiend (-1) UVW-coördinatensysteem	-
$E_e$	lineaire uitzettingscoëfficiënt eindmaat	$^{\circ}C^{-1}$
$E_m$	lineaire uitzettingscoëfficiënt machine	$^{\circ}C^{-1}$
L	meetlengte	m
L'	meetlengte van niet parallelle laserbundel	m
$\bar{L}$	gemiddelde van bepaalde lengte eindmaat	m
$L_{eindm}$	lengte eindmaat bij 20° C	m
$L_{gecorr}$	lengte eindmaat tijdens metingen	m
$L_i$	enkelmeting van eindmaat	m
n	aantal metingen aan eindmaat	-
RXx	rotatie-afwijking X-geleiding om X-geleiding	bgsec
RXy	kantelafwijking Y-geleiding om X-geleiding	bgsec
RXz	kantelafwijking Z-geleiding om X-geleiding	bgsec
RYx	kantelafwijking X-geleiding om Y-geleiding	bgsec
RYy	rotatie-afwijking Y-geleiding om Y-geleiding	bgsec
RYz	kantelafwijking Z-geleiding om Y-geleiding	bgsec
RZx	kantelafwijking X-geleiding om Z-geleiding	bgsec
RZy	kantelafwijking Y-geleiding om Z-geleiding	bgsec
RZz	rotatie-afwijking Z-geleiding om Z-geleiding	bgsec

S( $\bar{L}$ )	standaardafwijking van de gemiddelde lengte van de eindmaat	m
T	overgangsfactor UVW $\longrightarrow$ XYZ-coördinatensysteem	-
T <sub>e</sub>	temperatuur eindmaat	°C
T <sub>m</sub>	temperatuur machine	°C
TXx	lineariteits-afwijking X-geleiding in XYZ	m
TXy	rechtheidsafwijking Y-geleiding in X-richting	m
TXz	rechtheidsafwijking Z-geleiding in X-richting	m
TYx	rechtheidsafwijking X-geleiding in Y-richting	m
TYy	lineariteits-afwijking Y-geleiding in XYZ	m
TYz	rechtheidsafwijking Z-geleiding in Y-richting	m
TZx	rechtheidsafwijking X-geleiding in Z-richting	m
TZy	rechtheidsafwijking Y-geleiding in Z-richting	m
TZz	lineariteits-afwijking Z-geleiding in XYZ	m
U	geleidingscoördinaat eerste geleiding	m
Ut	tasterlengte in de richting van de eerste geleiding	m
Uuv	lengte verbindingsvector tussen U- en V-geleiding in U-richting	m
Uvw	lengte verbindingsvector tussen V- en W-geleiding in U-richting	m
V	geleidingscoördinaat tweede geleiding	m
Vt	tasterlengte in de richting van de tweede geleiding	m
Vuv	lengte verbindingsvector tussen U- en V-geleiding in V-richting	m
Vvw	lengte verbindingsvector tussen V- en W-geleiding in V-richting	m
W	geleidingscoördinaat derde geleiding	m
Wt	tasterlengte in de richting van de derde geleiding	m
Wuv	lengte verbindingsvector tussen U- en V-geleiding in W-richting	m
Wvw	lengte verbindingsvector tussen V- en W-geleiding in W-richting	m



$X_m$	uitgegeven verplaatsing door meetmachine	m
$X_n$	lasermeting van positie met negatieve naderingsrichting	m
$X_l$	uitgegeven verplaatsing door laserinterferometer	m
$X_p$	lasermeting van positie met positieve naderingsrichting	m
X	geleidingscoördinaat eerste geleiding	m
XB	meetbereik van de X-geleiding	m
Xt	tasterlengte in de X-richting	m
Xxz	lengte verbindingsvector tussen X- en Z-geleiding in X-richting	m
Xyx	lengte verbindingsvector tussen Y- en X-geleiding in X-richting	m
Xzy	lengte verbindingsvector tussen Z- en Y-geleiding in X-richting	m
Y	geleidingscoördinaat derde geleiding	m
YB	meetbereik van de Y-geleiding	m
Yt	tasterlengte in de Y-richting	m
Yxz	lengte verbindingsvector tussen X- en Z-geleiding in Y-richting	m
Yyx	lengte verbindingsvector tussen Y- en X-geleiding in Y-richting	m
Yzy	lengte verbindingsvector tussen Z- en Y-geleiding in Y-richting	m
Z	geleidingscoördinaat tweede geleiding	m
ZB	meetbereik van de Z-geleiding	m
Zt	tasterlengte in de Z-richting	m
Zxz	lengte verbindingsvector tussen X- en Z-geleiding in Z-richting	m
Zyx	lengte verbindingsvector tussen Y- en X-geleiding in Z-richting	m
Zzy	lengte verbindingsvector tussen Z- en Y-geleiding in Z-richting	m

$\Delta A_u$	translatie-afwijking-vector van U-geleiding	m
$\Delta A_v$	translatie-afwijking-vector van V-geleiding	m
$\Delta A_w$	translatie-afwijking-vector van W-geleiding	m
$\Delta \beta$	hoekafwijking ten gevolge van niet parallelle laserbundels bij kantelhoekmetingen	bgsec
$\Delta L$	gemiddelde meetafwijking van de eindmaat	m
$\Delta U_d$	verplaatsingsafwijkingsvector ten gevolge van draaiingsafwijkingen	m
$\Delta U_h$	verplaatsingsafwijkingsvector ten gevolge van haaksheidsafwijkingen	m
$\Delta U_m$	meetafwijkingsvector	m
$\Delta U_{mc}$	softwarecorrectievector voor meetafwijking	m
$\Delta U_{mu}$	meetafwijking in U-richting in UVW-coördinatensysteem	m
$\Delta U_{mv}$	meetafwijking in V-richting in UVW-coördinatensysteem	m
$\Delta U_{mw}$	meetafwijking in W-richting in UVW-coördinatensysteem	m
$\Delta U_{mx}$	meetafwijking in X-richting in XYZ-coördinatensysteem	m
$\Delta U_{my}$	meetafwijking in Y-richting in XYZ-coördinatensysteem	m
$\Delta U_{mz}$	meetafwijking in Z-richting in XYZ-coördinatensysteem	m
$\Delta U_u$	lineariteits-afwijking U-geleiding	m
$\Delta U_v$	rechtheidsafwijking V-geleiding in U-richting	m
$\Delta U_w$	rechtheidsafwijking W-geleiding in U-richting	m
$\Delta V_u$	rechtheidsafwijking U-geleiding in V-richting	m
$\Delta V_v$	lineariteits-afwijking V-geleiding in UVW	m
$\Delta V_w$	rechtheidsafwijking W-geleiding in V-richting	m
$\Delta W_u$	rechtheidsafwijking U-geleiding in W-richting	m
$\Delta W_v$	rechtheidsafwijking V-geleiding in W-richting	m
$\Delta W_w$	lineariteits-afwijking W-geleiding in UVW	m

$\alpha$	hoek tussen horizontaal vlak en elektronisch waterpas	bgsec
$\varphi$	hoek tussen laserbundels bij kantelhoekmetingen	bgsec
$\varphi_x$	uitrichtafwijking van rechtheidsmeting t.o.v. de X-as	bgsec
$\varphi_y$	uitrichtafwijking van rechtheidsmeting t.o.v. de Y-as	bgsec
$\phi_{Uu}$	rotatie-afwijking U-geleiding om U-geleiding	bgsec
$\phi_{Uv}$	kantelafwijking V-geleiding om U-geleiding	bgsec
$\phi_{Uw}$	kantelafwijking W-geleiding om U-geleiding	bgsec
$\phi_{Vu}$	kantelafwijking U-geleiding om V-geleiding	bgsec
$\phi_{Vv}$	rotatie-afwijking V-geleiding om V-geleiding	bgsec
$\phi_{Vw}$	kantelafwijking W-geleiding om V-geleiding	bgsec
$\phi_{Wu}$	kantelafwijking U-geleiding om W-geleiding	bgsec
$\phi_{Wv}$	kantelafwijking V-geleiding om W-geleiding	bgsec
$\phi_{Ww}$	rotatie-afwijking W-geleiding om W-geleiding	bgsec
$\Phi_u$	draaiingsmatrix van U-geleiding	bgsec
$\Phi_v$	draaiingsmatrix van V-geleiding	bgsec
$\Phi_w$	draaiingsmatrix van W-geleiding	bgsec
$\theta_{Av}$	haaksheid-afwijking-vector t.g.v. verplaatsing over V-geleiding	m
$\theta_{Aw}$	haaksheid-afwijking-vector t.g.v. verplaatsing over W-geleiding	m
$\theta_{Uv}$	haaksheidsafwijking van de V-geleiding ten opzichte van de U-geleiding	bgsec
$\theta_{Uw}$	haaksheidsafwijking van de W-geleiding ten opzichte van de U-geleiding	bgsec
$\theta_{Vw}$	haaksheidsafwijking van de W-geleiding ten opzichte van de V-geleiding	bgsec
$\theta_{Xy}$	haaksheidsafwijking van de Y-geleiding ten opzichte van de X-geleiding	bgsec
$\theta_{Xy}_{ma}$	materiëel aanwezige haaksheidsafwijking bij software-gecorrigeerde meetmachines	bgsec
$\theta_{Xy}_{sc}$	software-correctie voor de haaksheidsafwijking $\theta_{Xy}$	bgsec
$\theta_{Xz}$	haaksheidsafwijking van de Z-geleiding ten opzichte van de X-geleiding	bgsec
$\theta_{Yx}$	haaksheidsafwijking van de X-geleiding ten opzichte van de Y-geleiding	bgsec
$\theta_{Yz}$	haaksheidsafwijking van de Z-geleiding ten opzichte van de Y-geleiding	bgsec

## 1. Inleiding

### 1.1 Algemene inleiding

Volvo Car BV is een bedrijf dat gespecialiseerd is in de fabricage van automobielen. Het bedrijf is opgebouwd uit verscheidene vestigingen, waarvan die in Born en Helmond de belangrijkste zijn. De karakteristieke eigenschappen van deze vestigingen zijn respectievelijk de produktie en assemblage in Born, en het design, de beproeving en het management in Helmond. Samen zorgen deze twee vestigingen voor de ontwikkeling en produktie van een technisch hoogstaand produkt.

Gedurende de gehele ontwikkeling, van kleimodel tot geproduceerde auto, is de maatvoering van de produkten een zeer belangrijk aspect. Zo kunnen bijvoorbeeld problemen ontstaan bij de overname van het gestyleerde model naar werktekeningen, of kan de assemblage problemen geven wanneer de onderdelen niet met toereikende nauwkeurigheid op maatvoering gecontroleerd kunnen worden.

Een aantal jaren geleden is overgegaan tot de aanschaf van 3D-meetmachines omdat de vormen van de onderdelen van een auto vaak dermate complex zijn, dat deze slechts moeizaam met conventionele middelen zijn te meten. Zoals bij ieder meetinstrument dringt zich ook hier de vraag op, hoe nauwkeurig een dergelijke machine is, zowel bij levering als gedurende de verdere gebruiksperiode. Vanwege de complexe afwijkingenstructuur (zie hfdst. 3.1) is het niet eenvoudig hierop direct een antwoord te geven. Daarom is vanuit Volvo contact gezocht met de T.U. Eindhoven, waar, bij het laboratorium voor geometrische meettechniek, reeds enige jaren ervaring was opgedaan met de ontwikkeling van meetmethoden voor de bewaking van de meetnauwkeurigheid van 3D-meetmachines, om een kwaliteitsbewakingssysteem op te zetten voor de bij Volvo aanwezige 3D-meetmachines. Met behulp van dit systeem moet Volvo in de toekomst de nauwkeurigheid van haar eigen meetapparatuur kunnen controleren, zodat een verantwoorde uitspraak over de maatvoering van de gefabriceerde produkten mogelijk blijft.

## 1.2 De gevolgde strategie

Om een kwaliteitsbewakingssysteem op te zetten, kan men op verschillende manieren te werk gaan. Hier is gekozen voor een aanpak die een structuur bezit waarbij de gehele problematiek wordt opgesplitst in verschillende fasen.

Uit de eis van onderlinge uitwisselbaarheid van meetgegevens, zoals die door diverse 3D-meetmachines worden gegenereerd, volgt de noodzaak van een kwaliteitsbewakingssysteem. In praktijk blijkt dat bij metingen van hetzelfde produkt door verschillende machines, verschillende meetuitkomsten worden gegeven. Om toch tot een vergelijking te komen dient, door middel van een grondige controle, een uitspraak te worden gedaan over de absolute onnauwkeurigheid van een individuele machine. Er moet echter onderscheid gemaakt te worden tussen de controle bij levering en de bewaking van de onnauwkeurigheid tijdens het gebruik.

Om verzekerd te zijn van een machine die aan de gestelde eisen voldoet, zal de machine bij levering een uitgebreide controle moeten ondergaan. Tijdens het verdere gebruik zal de hierbij vastgestelde onnauwkeurigheid moeten worden bewaakt. Vanwege de gelimiteerde toegestane tijdsduur is de controle van de machine-onnauwkeurigheid opgesplitst in twee delen. Als eerste vindt een relatief snelle test plaats die een globale indruk verschaft van de momentane nauwkeurigheid. Bij twijfel kan deze test in tweede instantie gevolgd worden door een zgn. afname. Dit behelst een volledige controle van de nauwkeurigheid en neemt derhalve veel meer tijd in beslag. Uitgaande van deze methode kan men de benodigde werkfasen als volgt aangeven:

- Inventarisering van de aanwezige 3D-meetmachines waarbij, met het oog op later toe te passen controlemethoden, karakteristieke eigenschappen zoals configuratie, meetbereiken, tastercombinatie en mogelijkheid tot dataverwerking van meetgegevens, adequaat dienen te worden bepaald.

- Opstellen van gestructureerde afnameprocedures die dusdanig zijn ingericht dat de controle van de aanwezige 3D-meetmachines door Volvo in eigen beheer kan worden doorgevoerd.
- Afname van, in principe, iedere 3D-meetmachine ten behoeve van een initiële verificatie van de nauwkeurigheidsspecificatie.
- Ontwikkelen van testprocedures die, afgestemd op de mogelijkheden van de machine, een reële indruk geven van de momentane nauwkeurigheid.
- Invoeren van deze afname- en testprocedures in de bestaande infrastructuur zodat een overzichtelijk en doelmatig beleid ten aanzien van de kwaliteitsbewaking van de 3D-meetmachines mogelijk is.

Daar de gegevensopslag en -verwerking tamelijk omvangrijk en gecompliceerd is, heeft het de voorkeur dit met behulp van een personal computer uit te voeren. Dit is een manier om meerdere machines in een systeem onder te brengen zonder het overzicht te verliezen. Hiervoor dient een uitgebreid software-pakket te worden ontwikkeld waarmee het mogelijk is de kwaliteitsbewaking van de aanwezige 3D-meetmachines te handhaven.

In dit software-pakket (zie verder hfdst. 5) dienen zaken als configuratie, benodigde meetmethodieken en testprocedures voor iedere machine aanwezig te zijn.

## 2. Inventarisatie

### 2.1 Overzicht aanwezige 3D-meetmachines

Gedurende het gehele productieproces worden binnen Volvo Car 3D-meetmachines ingezet. Dit gevariëerde toepassingsgebied resulteert in een grote diversiteit in configuratie, meetmogelijkheden, afmetingen en vereiste nauwkeurigheid van de meetmachines. In tabel 2.1 wordt een overzicht gegeven van alle, op dit moment aanwezige, 3D-meetmachines binnen het Volvo-concern. In deze tabel bevinden zich de meest relevante gegevens van een bepaalde machine.

<u>Nr.</u>	<u>Merk</u>	<u>Meetbereik</u> per kolom	<u>Specificaties</u> $U \leq A + B * L$	<u>Type</u>	<u>Plaats</u>
1	Zeiss SMM	X : 8300 Y : 1600 Z : 1800	U(1d) A : 50 B : 40	C	Carr. bouw Born
2	DEA Bravo 4207	X : 4200 Y : 1200 Z : 2000	U(3d) A : 50 B : 35	A	Productie- lijn 480 Born
3	DEA Bravo 4207	X : 4200 Y : 2200 Z : 2000	U(3d) A : 50 B : 35	A	Pershal Born
4	Stiefelmayer type A	X : 5600 Y : 1200 Z : 1500	U(1d) A : 50 B : 40	C	Meetkamer Tafel 1 Born
5	Stiefelmayer type A	X : 5600 Y : 1200 Z : 1500	U(1d) A : 50 B : 40	C	Meetkamer Tafel 2 Born
6	Stiefelmayer type C	X : 5400 Y : 1600 Z : 1800	U(1d) A : 50 B : 40	C	Meetkamer Tafel 3 Born
7	Stiefelmayer type A	X : 3000 Y : 1200 Z : 1500	U(1d) A : 50 B : 40	C	Meetkamer Tafel 4 Born
8	Stiefelmayer type A	X : 3000 Y : 1200 Z : 1400	U(1d) A : 50 B : 40	C	Onderhoud Carr. Bouw Born
9	Stiefelmayer type C	X : 3400 Y : 1600 Z : 1800	U(1d) A : 50 B : 40	C	Gereedschap makerij Born

↑  
W6 in het gebouw

↓ 106  
 ↓ in Archief  
 ↓

<u>Nr.</u>	<u>Merk</u>	<u>Meetbereik</u> per kolom	<u>Specificaties</u> $U \leq A + B * L$	<u>Type</u>	<u>Plaats</u>
10	Mitutoyo B241S	X : 700 Y : 1000 Z : 600	U(1d) A : 4 B : 8	B	Meetkamer Helmond
11	Mora type 112	X : 2000 Y : 1200 Z : 1800	U(1d) A : 40 B : 50	C	Styling Helmond
12	Mora type 115	X : 5500 Y : 1200 Z : 1600	U(1d) A : 40 B : 50	C	Styling Helmond
13	Mora type 118ST+L	X : 5500 Y : 1200 Z : 1800	U(1d) A : 40 B : 50	C	Styling Helmond
14	Stiefelmayer type C	X : 1350 Y : 1000 Z : 1200	U(1d) A : 40 B : 50	C	Styling Helmond
15	Mora type 120	X : 5500 Y : 1400 Z : 1800	U(1d) A : 40 B : 50	C	Beproeving Helmond
16	Mora type 117	X : 5500 Y : 1200 Z : 1600	U(1d) A : 40 B : 50	C	Beproeving Helmond
17	Mora type 121	X : 5500 Y : 1200 Z : 1800	U(1d) A : 40 B : 50	C	Beproeving Helmond
18	Stiefelmayer type C	X : 3000 Y : 1200 Z : 1500	U(1d) A : 50 B : 40	C	Styling Helmond

Tabel 2.1 Overzicht aanwezige 3D-meetmachines.

Toelichting tabel 2.1:

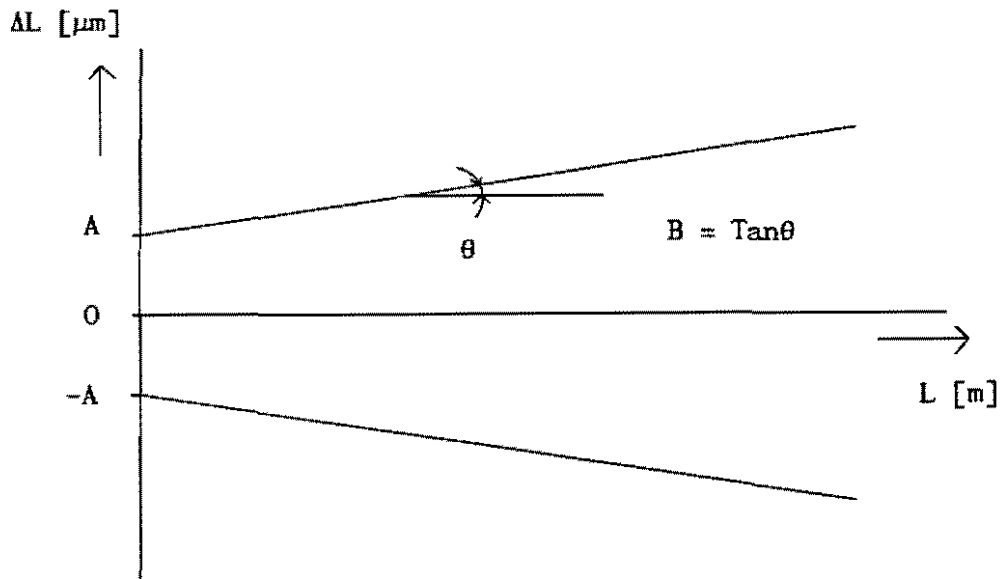
De aangegeven specificaties zijn een maximum voor de onnauwkeurigheid van een machine. We onderscheiden hier een 1-dimensionale ( $U_{1d}$ ) en een 3-dimensionale ( $U_{3d}$ ) specificatie. In beide gevallen wordt deze aangegeven (VDI 83) volgens:

$$U(95) \leq A + B * L \quad (\mu m) \quad (2.1)$$

- L : meetlengte (m)
- A : constante ( $\mu m$ )
- B : lengtefactor ( $\mu m/m$ )

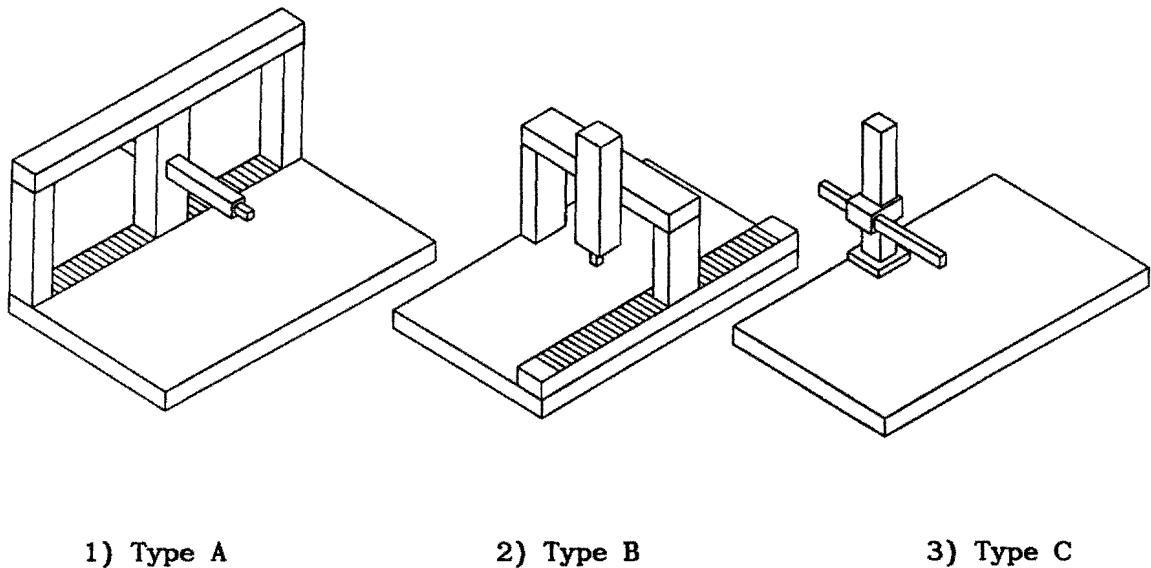


Deze vergelijking geeft aan dat alle metingen, met 95% zekerheid, bepaald worden met een onnauwkeurigheid binnen het aangegeven gebied. Dit gebied is grafisch weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1 Het onnauwkeurigheidsgebied van een 3D-meetmachine.

In figuur 2.2 wordt een illustratie gegeven van de type-aanduiding zoals die in tabel 2.1 gehanteerd wordt.



Figuur 2.2 De machinebouwvormen bedoeld in tabel 2.1.

## 2.2 Indeling

Daar het ondoenlijk is voor elke 3D-meetmachine een aparte afname- of testprocedure te schrijven, en vanwege de grote overeenkomsten tussen sommige machines, is besloten om groepen te vormen en iedere machine binnen een groep dezelfde afname c.q. test te laten ondergaan. Allereerst kan een onderscheid gemaakt worden tussen:

1. Software-gecorrigeerde machines.
2. Niet software-gecorrigeerde machines.

Deze indeling is gebaseerd op het feit dat machines met een software-correctie een principiële andere afnamecontrole vereisen dan machines zonder software-correctie. De reden hiervoor zal in de onderstaande aanvullingen worden aangegeven.

Ad 1. Bij machines met een software-correctie worden alle geometrische bronnen van afwijkingen (zie hfdst. 3.1) met behulp van een computer gecorrigeerd. De configuratie van de machine, en de onvolkomenheden daarin, zijn bij deze machines daardoor niet relevant voor de onnauwkeurigheid. De beide DEA-meetmachines zijn uitgerust met een softwarematige-correctie voor de afwijkingen in de geometrie.

Ad 2. Bij machines zonder software-correctie geschiedt de indeling op basis van configuratie en meetnauwkeurigheid. De onderstaande overwegingen zijn als criteria gehanteerd om tot de groepsindeling te komen. De Stiefelmayer-, Mora- en Zeiss-meetmachines tonen veel overeenkomst in zowel configuratie als meetnauwkeurigheid en kunnen volgens dezelfde methode worden afgenomen. Tot slot onderscheidt de Mitutoyo-meetmachine zich door een afwijkende bouw en een onnauwkeurigheid die een orde lager ligt dan die van de andere machines.

Samenvattend resulteert het bovenstaande in de volgende drie groepen:

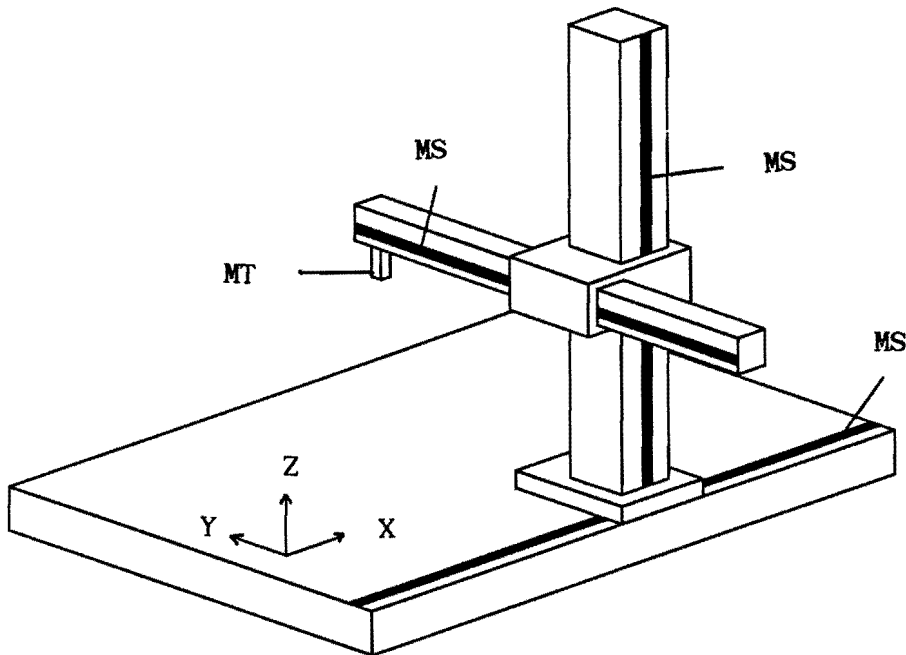
- 1 : Software-gecorrigeerde machines: A-type (DEA).
- 2 : Niet software-gecorrigeerde machines:
  - a) B-type (Mitutoyo).
  - b) C-type (Zeiss, Mora en Stiefelmayer).

Voor ieder van deze drie groepen dient een afname- en een testprocedure ontwikkeld te worden die op alle machines binnen die groep van toepassing is.

### 3. Afnameprocedures

#### 3.1 De bronnen van afwijkingen in een 3D-meetmachine

Daar een 3D-meetmachine door zijn bouwvorm nimmer kan voldoen aan het Abbe-principe (zie figuur 3.1), zullen afwijkingen in de geleidingen zich manifesteren als een positie-afwijking van de meettaster, die afhankelijk is van de plaats van de verschillende sledes op de geleidingen. In de onderstaande paragrafen zal, vanuit een modellering van de geometrie, aangegeven worden welke afwijkingen in een 3D-meetmachine kunnen voorkomen en hoe deze afwijkingen de meetnauwkeurigheid beïnvloeden. Het gegeven model is alleen van toepassing op machines die opgebouwd zijn uit starre elementen. Hier zal volstaan worden met een beknopte beschrijving van het model, voor een volledige beschrijving van het model wordt verwezen naar appendix A.



Figuur 3.1 3D-meetmachine met meetschalen (MS) en meettaster (MT) op verschillende plaatsen waardoor niet aan het Abbe-principe wordt voldaan.

### 3.1.1 Een model van een 3D-meetmachine

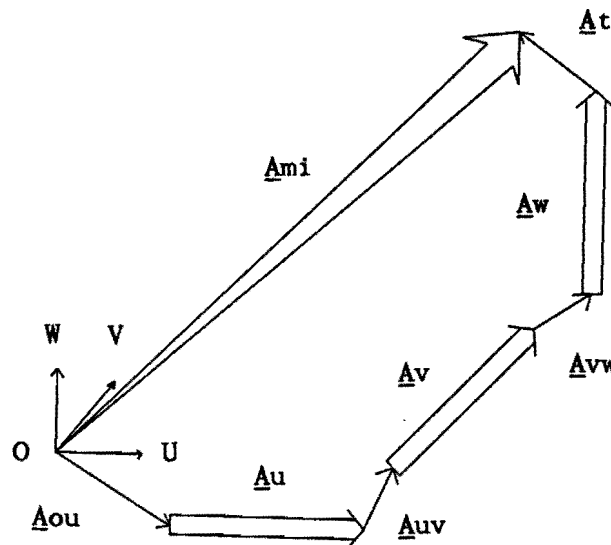
Over het algemeen kunnen 3D-meetmachines, met een stilstaande meettafel, voorgesteld worden door een ketting van vectoren (THE 86). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen geleidingsvectoren, verbindingsvectoren en een tastervector. Een geleidingsvector geeft de positie van de slede op de geleiding aan, ten opzichte van het beginpunt van de geleiding, een verbindingsvector geeft de afstand en richting aan van de verbinding tussen twee geleidingen en tenslotte geeft de tastervector aan waar de taster zich bevindt ten opzichte van het eindpunt van de derde geleiding.

Elke machine is weer te geven in 7 vectoren te weten:

3 geleidingsvectoren ( $\underline{A_u}, \underline{A_v}, \underline{A_w}$ ), 3 verbindingsvectoren ( $\underline{A_{ou}}, \underline{A_{uv}}, \underline{A_{vw}}$ ) en 1 tastervector ( $\underline{A_t}$ ). Samen vormen deze 7 vectoren de ideale meetvector  $\underline{A_{mi}}$  (figuur 3.2) waarvoor geldt:

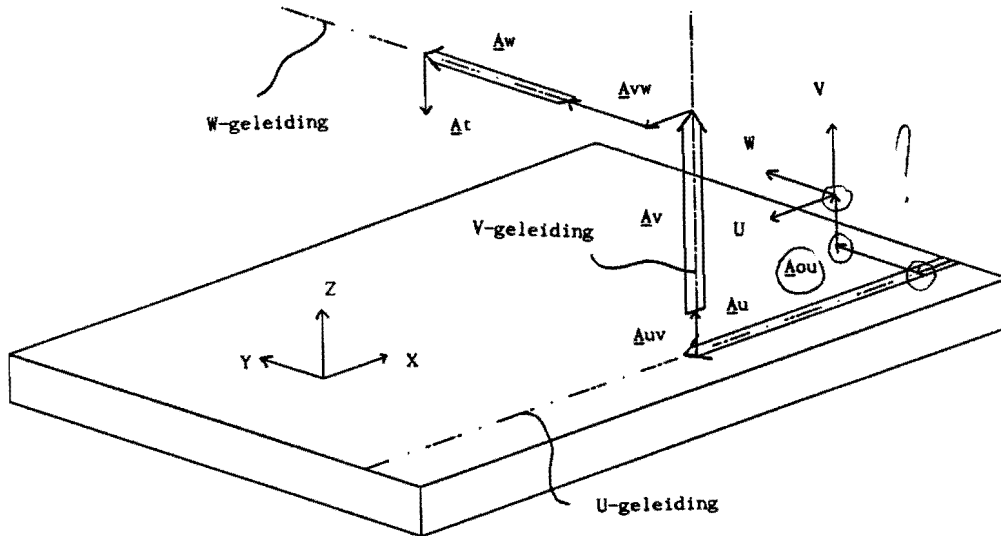
$$\underline{A_{mi}} = \underline{A_{ou}} + \underline{A_u} + \underline{A_{uv}} + \underline{A_v} + \underline{A_{vw}} + \underline{A_w} + \underline{A_t} \quad (3.1)$$

$\underline{A_{mi}}$  ligt in het orthogonale coördinatensysteem UVW (CSU) en geeft het ideale geval weer, waarbij geen geometrische afwijkingen in de geleidingen van de meetmachine voorkomen.



Figuur 3.2 Schematische voorstelling van de ideale meetvector  $\underline{A_{mi}}$ .

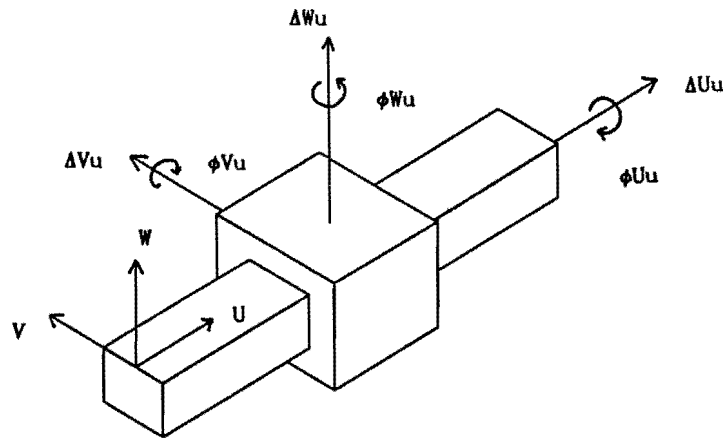
In figuur 3.3 is een voorbeeld gegeven van de ketting van vectoren van een C-type 3D-meetmachine.



Figuur 3.3 Schematische weergave van de kinematische ketting van vectoren voor een 3D-meetmachine van het type C.

### 3.1.2 De geometrische bronnen van afwijkingen

In principe wordt de plaats en stand van een object in de ruimte bepaald door 6 vrijheidsgraden, namelijk 3 translaties en 3 rotaties. Vanuit dit oogpunt heeft een geleiding 6 mogelijke bronnen van afwijkingen, waardoor de slede op een andere positie of in een andere stand kan staan dan gewenst is (zie figuur 3.4). Per geleiding zijn dit 3 verplaatsings-afwijkingen:  $\Delta U_i$ ,  $\Delta V_i$  en  $\Delta W_i$  en 3 draaiings-afwijkingen:  $\phi U_i$ ,  $\phi V_i$  en  $\phi W_i$ , met  $i = u, v$  of  $w$ . In tabel 3.1 wordt de gehanteerde afwijkingensymboliek verklaard. Iedere afwijking in de positie of stand van de slede heeft effect op de positie van de meettaster omdat de meettaster rechtstreeks is gekoppeld aan de slede.



Figuur 3.4 Bronnen van afwijking in een geleiding

1 <sup>ste</sup> Symbool	2 <sup>de</sup> Symbool	Index
Bron van afwijking	Bepaling van afwijking	Geleiding
$\Delta$ : verplaatsing	U, V, W : verplaatsingsrichting	u, v, w
$\phi$ : draaiing	U, V, W : draaiing-as	u, v, w
$\theta$ : haaksheid	U, V : referentie-as	v, w

Tabel 3.1 De symboliek voor de geometrische bronnen van afwijkingen.

De translatie-afwijking van een geleiding in de bewegingsrichting van de betreffende geleiding, wordt de **lineariteits-afwijking** genoemd. De translatie-afwijkingen van een geleiding in de richting van één van de andere twee geleidingen, worden de **rechtheids-afwijkingen** van de desbetreffende geleiding genoemd. Bij de draaiings-afwijkingen is de **rotatie-afwijking** gedefiniëerd als die afwijking waarbij de geleiding om de eigen as roteert. Vervolgens zijn er nog twee draaiingen van een geleiding om één van de andere twee geleidingen aan te geven, deze worden de **kantel-afwijkingen** van een geleiding genoemd.

Een 3D-meetmachine bezit 3 geleidingen waardoor er nog 3 **haaksheids-afwijkingen**  $\theta_{Uv}$ ,  $\theta_{Uw}$  en  $\theta_{Vw}$  gedefiniëerd moeten worden. Dit omdat de 3 geleidingen nooit exact haaks staan, d.w.z. geen orthogonaal stelsel vormen. In totaal zijn er in een 3D-meetmachine dus  $3 \times 6 + 3 = 21$  mogelijke geometrische bronnen van afwijkingen.

### 3.1.3 De afwijkingen-analyse

#### 3.1.3.1 Verplaatsings-afwijkingen

Verplaatsings-afwijkingen van een geleiding worden één op één doorgegeven aan de taster (zie appendix A.3.1). De component van de translatie-afwijking-vector parallel aan de geleidings-vector is de lineariteits-afwijking, terwijl de andere twee componenten de rechtheids-afwijkingen aangeven.

#### 3.1.3.2 Draaiings-afwijkingen

De afwijkingen die ontstaan door draaiingen worden d.m.v. drie draaiings-afwijking-matrices  $\phi_u$ ,  $\phi_v$  en  $\phi_w$  verdisconteerd. De verplaatsings-afwijking ( $\Delta \underline{U}_d$ ) tengevolge van de draaiingen is afhankelijk van de gedraaide hoeken en van de armen waarop die hoeken werken, hiervoor geldt:

$$\Delta \underline{U}_d = \underline{U}' - \underline{U} = [\phi - I] * \underline{U} \quad \text{ker 78} \quad (3.2)$$

Hierin is  $\phi$  de draaiings-afwijking-matrix en I de eenheidsmatrix (zie appendix A.3.2). Afhankelijk van de plaats van het draaipunt in de kinematische ketting kunnen zo meerdere afwijkingvectoren opgesteld worden.

De draaiings-afwijking-matrices zijn commutatief, d.w.z. dat de totale afwijkingvector ten gevolge van draaiingen van de drie geleidingen gelijk is aan de som van de draaiings-afwijkingen van de 3 geleidingen afzonderlijk. Ofwel, de totale afwijkingvector in een bepaald punt in het meetvolume, is onafhankelijk van de gevolgde weg naar dit punt.



### 3.1.3.3 Haaksheids-afwijkingen

Haaksheids-afwijkingen worden in rekening gebracht door aan de v- en w-geleidingsvectoren respectievelijk de haaksheids-afwijking-vectoren  $\theta_{Av}$  en  $\theta_{Aw}$  toe te voegen. Analoog aan de in de literatuur gangbare haaksheidshoek definitie, wordt ook hier de hoek positief genomen als de hoek tussen de geleidingen groter is dan 90 graden. De verplaatsings-afwijking ( $\Delta U_h$ ) tengevolge van het niet haaks zijn van de drie geleidingen is (zie appendix A.3.3):

$$\Delta U_h = \begin{bmatrix} -V \times \theta_{Uv} - W \times \theta_{Uw} \\ -W \times \theta_{Vw} \\ 0 \end{bmatrix} = \theta_{Av} + \theta_{Aw} \quad (3.3)$$

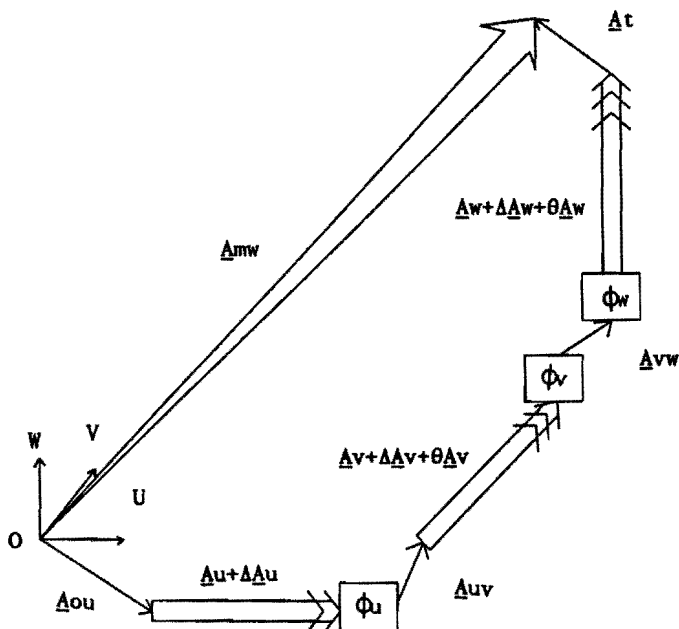
*Wt 80*

Hieruit is af te leiden dat het verplaatsen van de eerste geleiding t.g.v. de gekozen definitie geen aanleiding geeft tot haaksheids-afwijkingen.

### 3.1.4 De totale meetafwijking

De door de 3D-meetmachine waargenomen meetvector ( $\underline{A}_{mw}$ ) bestaat uit de ideale meetvector ( $\underline{A}_{mi}$ ) waaraan op de juiste plaats de besproken afwijking-vectoren en afwijking-matrices zijn toegevoegd. De waargenomen meetvector is schematisch weergegeven in figuur 3.5 en wordt gegeven door:

$$\underline{A}_{mw} = \underline{A}_{ou} + \underline{A}_u + \Delta \underline{A}_u + \Phi_u * (\underline{A}_{uv} + \underline{A}_v + \Delta \underline{A}_v + \theta_{Av} + \Phi_v * (\underline{A}_{vw} + \Phi_w * (\underline{A}_w + \Delta \underline{A}_w + \theta_{Aw} + \underline{A}_t))) \quad (3.4)$$



Figuur 3.5 Schematische voorstelling van de vector  $\underline{A}_{mw}$ .

De meetafwijking ( $\Delta \underline{U}_m$ ) is de waargenomen meetvector (vgl.3.4) minus de ideale meetvector (vgl.3.1), oftewel:

$$\Delta \underline{U}_m = \underline{A}_{mw} - \underline{A}_{mi} \quad (3.5)$$

Dit betekent voor de machines zonder software-correctie :

$$\underline{A}_{mw} = \underline{A}_{mi} + \Delta \underline{U}_m \quad (3.6)$$

en voor machines met software-correctie :

$$\underline{A}_{mw} = \underline{A}_{mi} + \Delta \underline{U}_m - \Delta \underline{U}_{mc} \simeq \underline{A}_{mi} \quad (3.7)$$

Hierin is  $\Delta \underline{U}_{mc}$  de correctie-vector zoals die door de fabrikant wordt aangebracht op de meetresultaten. In tabel 3.2 wordt de uitwerking van vergelijking 3.5 gegeven waarbij tweede-orde effecten verwaarloosd zijn. De verplaatsings-afwijkingen  $\Delta U_i$ ,  $\Delta V_i$  en  $\Delta W_i$  en de draaiings-afwijkingen  $\phi U_i$ ,  $\phi V_i$  en  $\phi W_i$  zijn allen functies die afhangen van de desbetreffende machinecoördinaat (= geleidings-coördinaat) U, V en W en de tastercoördinaten  $U_t$ ,  $V_t$  en  $W_t$ , zoals aangegeven in de eerste kolom. De afwijkingen zijn gerangschikt naar de componenten (u-, v- en w-richting) van de meetafwijking en naar geometrische bron van afwijking.

Bron van afwijking	$\Delta U_{mu}$	$\Delta U_{mv}$	$\Delta U_{mw}$
Linear.: $\Delta U_u = \Delta U(U-U_t)$ $\Delta V_v = \Delta V(V-V_t)$ $\Delta W_w = \Delta W(W-W_t)$	1	1	1
Rechth.: $\Delta U_v = \Delta U(V-V_t)$ $\Delta U_w = \Delta U(W-W_t)$ $\Delta V_u = \Delta V(U-U_t)$ $\Delta V_w = \Delta V(W-W_t)$ $\Delta W_u = \Delta W(U-U_t)$ $\Delta W_v = \Delta W(V-V_t)$	1 1	1 1	1 1
Kantel.: $\phi U_v = \phi U(V-V_t)$ $\phi U_w = \phi U(W-W_t)$ $\phi V_u = \phi V(U-U_t)$ $\phi V_w = \phi V(W-W_t)$ $\phi W_u = \phi W(U-U_t)$ $\phi W_v = \phi W(V-V_t)$	$d(W+W_{uv}+W_{vw})$ $d(W_t)$ $d(-V-V_{uv}-V_{vw})$ $d(-V_{vw}-V_t)$	$d(-W-W_{vw})$ $d(W_t)$ $d(U_{uv}+U_{vw}+U_t)$ $d(U_{vw}+U_t)$	$d(V_{vw}+V_t)$ $d(V_t)$ $d(-U_{uv}-U_{vw}-U_t)$ $d(-U_t)$
Rotatie: $\phi U_u = \phi U(U-U_t)$ $\phi V_v = \phi V(V-V_t)$ $\phi W_w = \phi W(W-W_t)$	$d(W+W_{vw})$ $d(-V_t)$	$d(-W-W_{uv}-W_{vw})$ $d(U_t)$	$d(V+V_{uv}+v_{vw})$ $d(-U_{vw}-U_t)$
Haaksh.: $\theta U_v$ $\theta U_w$ $\theta V_w$	-V -V	- W/	

Tabel 3.2 De componenten  $\Delta U_{mu}$ ,  $\Delta U_{mv}$  en  $\Delta U_{mw}$  van de meetafwijkingvector  $\Delta U_m$ . In de 3 rechterkolommen staan vermenigvuldigingsfactoren. Voorbeeld: de bijdrage in de u-component van de meetafwijking ( $\Delta U_{mu}$ ) door rotatie  $\phi V_v$  is  $[W+W_{vw}] \phi V(V-V_t)$ .

In de tabel zien we bij de kantel- respectievelijk rotatie-afwijkingen een extra factor "d" die, afhankelijk van de keuze van het UVW-assenkruis en de ligging van het machinenukpunt, +1 of -1 kan zijn.

Het blijkt dat de 21 mogelijke bronnen van afwijkingen, die in een 3DM kunnen voorkomen, 30 mogelijke afwijkingen opleveren. Met behulp van deze afwijkingen-analyse kan iedere meetafwijking, die resulteert uit een afwijking in de geometrie van de geleidingen, binnen het meetvolume worden bepaald. Hoe de 21 geometrische bronnen van afwijkingen gemeten worden, wordt in paragraaf 3.2 besproken.

### 3.1.5 Andere bronnen van afwijkingen

Behalve de afwijkingen in de geometrie van een 3D-meetmachine zijn nog een aantal andere factoren van invloed op de onnauwkeurigheid van de meetmachine. De volgende bronnen van afwijkingen kunnen worden aangegeven en zullen hierna kort besproken worden:

- 1) Trillingen uit de omgeving.
- 2) Temperatuurgradiënten in de machine.
- 3) Aantastafwijkingen.

Ad 1. Trillingen kunnen een significante invloed uitoefenen op de meetonnauwkeurigheid wanneer de trillingsfrequentie in de nabijheid komt van een eigenfrequentie van de meetmachine. Door hun relatief slappe constructie, en daarmee lage eigenfrequentie, zijn met name de meetmachines van het type A en C gevoelig voor trillingen.

Trillingsinvloeden kunnen worden bepaald met behulp van modale analyse-apparatuur. Hierbij dient een versnellingsopnemer bevestigd te worden op de plaats waar zich normaal de meettaster bevindt, waarna deze op verschillende posities in het meetvolume moet worden geplaatst (zie appendix B.1). Daar de meetmachine zijn laagste eigenfrequentie bereikt wanneer alle geleidingen zijn uitgeschoven kunnen hier de grootste amplitudes worden verwacht. In iedere positie dienen de trillingsamplitudes zowel in X-, Y- als Z-richting te worden bepaald. De gevonden afwijkingen kunnen worden behandeld als toevallige afwijkingen.

Uit praktijkmetingen blijkt dat deze bron van afwijkingen een niet onaanzienlijk deel van de onnauwkeurigheid kan bepalen (zie appendix B.2). Daarom is het aan te bevelen deze metingen altijd uit te voeren (NIJ 87).

Ad 2. Temperatuurgradiënten in een meetmachine veroorzaken, door uitzetting van machinedelen, lokale vervormingen van de geleidingen die zich manifesteren als veranderende geometrische bronnen van afwijkingen. De invloed van deze bron van afwijkingen is afhankelijk van:

- a) de constructie van de machine.
- b) het materiaal waaruit de machine is opgebouwd.
- c) de mate en vorm waarin een temperatuurgradiënt heerst over de machine.

Deze factoren zorgen samen voor een continu variërende invloed op de meetnauwkeurigheid ten gevolge van de temperatuurgradiënt. Deze bron van afwijkingen kan alleen zoveel mogelijk worden beperkt door grote temperatuurswisselingen van de machine-omgeving te vermijden.

Ad 3. Aantastafwijkingen worden veroorzaakt doordat het moment van aantasten niet overeenkomt met het moment van overname van de meetgegevens. De invloed hiervan kan vrij eenvoudig worden bepaald door een object meerdere malen op dezelfde positie aan te tasten en vervolgens de meetgegevens te vergelijken.

### 3.2 De meetmiddelen

Uit het gegeven model kan afgeleid worden welke bronnen van afwijkingen bepaald moeten worden. In deze paragraaf zal worden besproken welke meetmiddelen hiervoor kunnen worden aangewend.

#### 3.2.1 Positie-afwijkingen

Bij de bepaling van de positie-afwijking van een machine is het zaak dat een door de machine uitgegeven verplaatsing wordt vergeleken met de werkelijke verplaatsing die aan de tasterpunt wordt gegenereerd. De werkelijke verplaatsing moet worden bepaald met een instrument dat in ieder geval nauwkeuriger dient te zijn dan de machine. Voor meetmachines zijn de volgende mogelijkheden aan de orde:

- 1) Laserinterferometer.
- 2) Eindmaat.
- 3) Stappeneindmaat.

Ad 1. De hier gebruikte laserinterferometer is een instrument dat gebruik maakt van het optisch dopplereffect om een verplaatsing te bepalen (HP 84). Een principeschets voor een verplaatsingsmeting is gegeven in appendix C. De belangrijkste voordelen van dit instrument zijn:

- a) continu variabele meetlengte (0-25 m).
- b) lage relatieve onnauwkeurigheid ( $< 10^{-6}$ ).

Als nadelen zijn aan te geven:

- a) simultane uitlezing van de laserinterferometer en de machine kan problemen geven bij machines waarbij de uitlezing van de meetlinealen enkel via een schakeling van de taster gebeurt.
- b) het effect van afwijkingen in het tastsysteem kan niet worden gemeten.

Ad 2. Eindmaten zijn beschikbaar in lengtes variërend van 1 mm tot 1500 mm (SCH 87). De relatieve onnauwkeurigheid is afhankelijk van de nauwkeurigheidsklasse van de eindmaat en kan dalen tot  $1 * 10^{-6}$ . Als belangrijkste nadelen kunnen aangegeven worden:

- a) de vaste meetlengte waardoor slechts een steekproef van de positie-afwijking kan worden genomen.
- b) de vereiste bepaling van de temperatuur van de eindmaat, ten opzichte van de machine, om de eindmaat voor een uitzettingsverschil te corrigeren.
- c) de kalibratie van de eindmaat in dezelfde stand zoals deze wordt gebruikt bij de controle van de meetmachine.
- d) de kritische ondersteuning om ongewenst doorbuiggedrag te voorkomen.
- e) de noodzaak tot uitlijnen, hetzij software- dan wel hardware-matig.
- f) problemen met aantasten wanneer de eindmaat onder een ongunstige hoek staat opgesteld.

Als voordelen staan hier tegenover dat een eindmaat:

- a) eenvoudig te hanteren is.
- b) 3D-metingen toelaat.
- c) afwijkingen inclusief tasterafwijking registreert.

Ad 3. Met de stappeneindmaat is een poging gedaan om een voordeel van de laserinterferometer (variabele meetlengte) te koppelen aan de eenvoudige hanteerbaarheid van een eindmaat.

Zij bestaat uit een aantal gekoppelde kleine eindmaten die aangebracht zijn op een draagbalk. Hierdoor is, over een lengte die vergelijkbaar is met die van een eindmaat, een veelvoud van aantastvlakken aanwezig terwijl de relatieve onnauwkeurigheid dezelfde orde grootte behoudt ( $1.5 * 10^{-6}$ ).

### 3.2.2 Rechtheids-afwijkingen

Een rechtheids-afwijking is gedefiniëerd als een afwijking van een machine-as in een richting loodrecht op de verplaatsingsrichting. Deze afwijking wordt genomen ten opzichte van de best passende lijn door de meetpunten, verkregen uit een rechtheidsmeting. Dit is noodzakelijk omdat een uitrichtafwijking van het meetinstrument zich zal manifesteren als een evenredig stijgende rechtheids-afwijking.

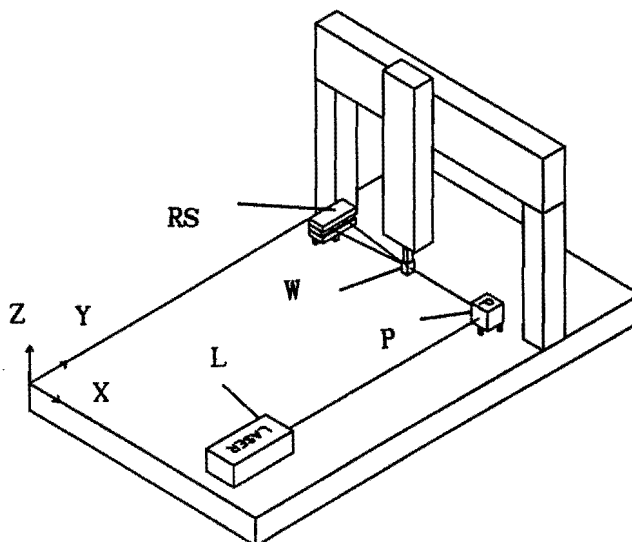
Als meetmiddel komen de volgende instrumenten in aanmerking:

- 1) Laserinterferometer.
- 2) Richtkijker.
- 3) Optisch waterpas.
- 4) Rechtheidslineaal.



Ad 1. Met de laserinterferometer kunnen nauwkeurige rechtheidsmetingen worden uitgevoerd (HP 84). Hiermee kan een relatieve onnauwkeurigheid worden behaald die kleiner is dan  $5 \times 10^{-7}$ , mits een aantal regels in acht worden genomen. De belangrijkste zijn dat, ten eerste, het wollastonprisma moet bewegen en niet de rechtheidsspiegel en, ten tweede, dat in verband met haaksheidbepaling één opstelling moet worden gebouwd waarin twee verschillende rechtheidsmetingen kunnen worden verricht. Met name de laatste eis vereist de nodige aandacht, daar een onjuiste opstelling kan leiden tot een meting die een verkeerd beeld geeft van de afwijkingen, zonder dat dit direct kan worden opgemerkt. In appendix C is een principeschets gegeven van een rechtheidsmeting.

Figuur 3.6 laat een opstelling zien waarin twee rechtheidsmetingen kunnen worden uitgevoerd en waaruit tevens de haaksheid tussen de twee meetassen is te bepalen. De grootst mogelijke meetlengte is voor deze opstellingen ongeveer 3 m., omdat bij grotere afstand tussen het wollastonprisma en de rechtheidsspiegel de bundelsplitsing ervoor zorgt dat de laserbundels buiten de rechtheidsspiegel vallen.



L: laserbron, P: pentagonprisma,  
RS: rechtheidsspiegel, W: wollastonprisma.

Figuur 3.6 Opstelling voor  $TY_x$ ,  $TX_y$  en  $\theta_{Xy}$ .

- Ad 2. De richtkijker is een optisch meetinstrument dat in combinatie gebruikt wordt met een verlicht richtmerk (HAB 58). Een principeschets wordt gegeven in appendix C. De resolutie van dit meetinstrument is 0.01 mm en de relatieve onnauwkeurigheid is lager dan  $5 * 10^{-3}$ . Een voordeel van dit instrument is de eenvoudige bediening en het feit dat voor het bepalen van de haaksheid van twee machine-assen, volstaan kan worden met het plaatsen van het pentagonprisma na de eerste meting, in tegenstelling tot de haaksheidsmeting met de laserinterferometer waar één opstelling dient te worden gebouwd. Voorwaarde is wel dat de richtkijker dezelfde plaats behoudt.
- Ad 3. Het optisch waterpas kan, in combinatie met hetzelfde merk als bij de richtkijker, gebruikt worden om een rechtheidsafwijking te bepalen (HAB 58). In appendix C is een principeschets gegeven van het instrument. De resolutie van het instrument bedraagt 0.01 mm en de relatieve onnauwkeurigheid blijft onder  $5 * 10^{-2}$ . Als gevolg van een flexibel bevestigd lenzenstelsel beschrijft de optische as immer een horizontaal vlak. Dit is de reden dat dit instrument voornamelijk gebruikt wordt om vlaktafels te controleren en machines te installeren.
- Ad 4. De rechtheidslineaal bestaat uit een zuiver rechte, vlakke strip van staal, hardsteen of keramisch materiaal (SCH 87). Er dient een verplaatsingsopnemer te worden bevestigd aan de tastkop van de machine waarna de machine langs de rechtheidslineaal wordt bewogen. Uit de aflezing van de verplaatsingsopnemer is de rechtheidsafwijking te bepalen. Rechtheidslinealen zijn beschikbaar tot een lengte van 6000 mm.

### 3.2.3 Kantel-afwijkingen

Kantel-afwijkingen zijn gedefiniëerd als draaiingen van een bepaalde machine-as om een andere as dan zichzelf. Als eenheid worden boogseconden genomen waardoor bij sommige meetinstrumenten een omrekening noodzakelijk is. De volgende meetinstrumenten zijn geschikt om een kantel-afwijking rechtstreeks te bepalen:

- 1) Autocollimator.
- 2) Elektronisch waterpas.
- 3) Laserinterferometer.

Ad 1. Een autocollimator is een optisch hoekmeetinstrument met een resolutie van 0.1 bgsec en een absolute onnauwkeurigheid die, na correctie, onder 1 bgsec ligt (HAB 58). Een principeschets wordt gegeven in appendix C. Een voordeel van dit meetinstrument is dat gelijktijdig twee kantel-afwijkingen kunnen worden bepaald. Een nadeel is de hoge gevoeligheid voor veranderingen van de brekingsindex in de meetbundel, waardoor een onzuiver beeld ontstaat en het instrument moeilijk af te lezen is. Ook kan het stabiel bevestigen van de spiegel een probleem vormen.

Ad 2. Een elektronisch waterpas is een instrument dat de hoek rechtstreeks digitaal uitgeeft met een resolutie van 1  $\mu\text{m}/\text{m}$ . De absolute onnauwkeurigheid ligt in de orde van enkele  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Een principeschets wordt gegeven in appendix C. Het is een zeer gemakkelijk te hanteren instrument met een eenvoudige bediening. Het grootste nadeel ligt in het feit dat alleen de kantel-afwijkingen ten opzichte van een horizontaal vlak kunnen worden bepaald (SCA 67).

Ad 3. Met de laserinterferometer kunnen nauwkeurige hoekmetingen, met een resolutie van 0.1 bgsec, worden uitgevoerd (HP 84). De absolute onnauwkeurigheid ligt, bij een juiste opbouw, in de buurt van de resolutie.

Een voordeel van dit instrument voor hoekmetingen is het feit dat dezelfde opstelling kan worden gebruikt als bij de positiemeting.

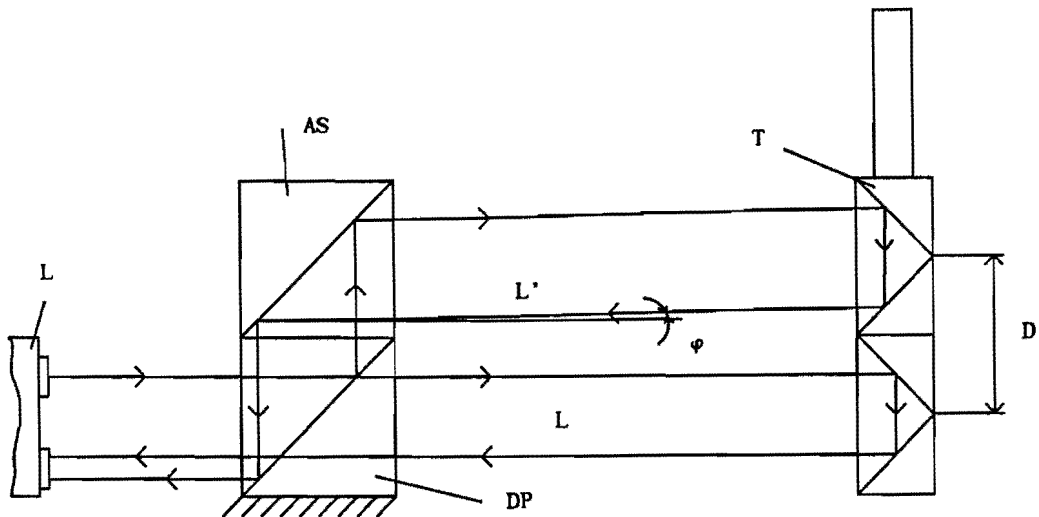
Een nadeel is de gevoeligheid voor gradiënten in de brekingsindex, maar omdat de laserbundels relatief dicht bij elkaar lopen blijft de invloed hiervan op de meeton nauwkeurigheid gering.

Een veel groter effect op de meeton nauwkeurigheid kan echter veroorzaakt worden door het niet parallel lopen van de twee laserbundels (zie figuur 3.7). Doordat de afbuigspiegel om 3 assen niet exact evenwijdig staat aan het deelprisma, treedt één laserbundel uit onder een hoek ten opzichte van de referentiebundel. Dit effect kan reeds bij kleine hoeken meetafwijkingen introduceren, daar het hier een verschilmeting betreft. Uit figuur 3.7, waar slechts een parallelliteitsafwijking om één as is aangegeven, kan de meetafwijking  $\Delta\beta$ , ten gevolge van een hoek  $\varphi$  tussen de laserbundels, als volgt worden bepaald:

$$\Delta\beta = \arcsin\left(\frac{L \times (1 - \cos\varphi)}{D}\right) \quad (3.8)$$

Een rekenvoorbeeld leert dat bij een meetlengte L van 1 m., met een bundelafstand D van 50 mm, een parallelliteitsafwijking van 70 bgsec voldoende is om een meetafwijking van 1 bgsec te introduceren.

In de huidige situatie, waarin het afbuigprisma met behulp van bouten op het deelprisma wordt bevestigd, verdient één en ander bijzondere aandacht om grote meetafwijkingen te vermijden. Het heeft daarom de voorkeur het interferometerblok als één geheel te laten functioneren. Een principeschets voor deze meting wordt gegeven in appendix C.



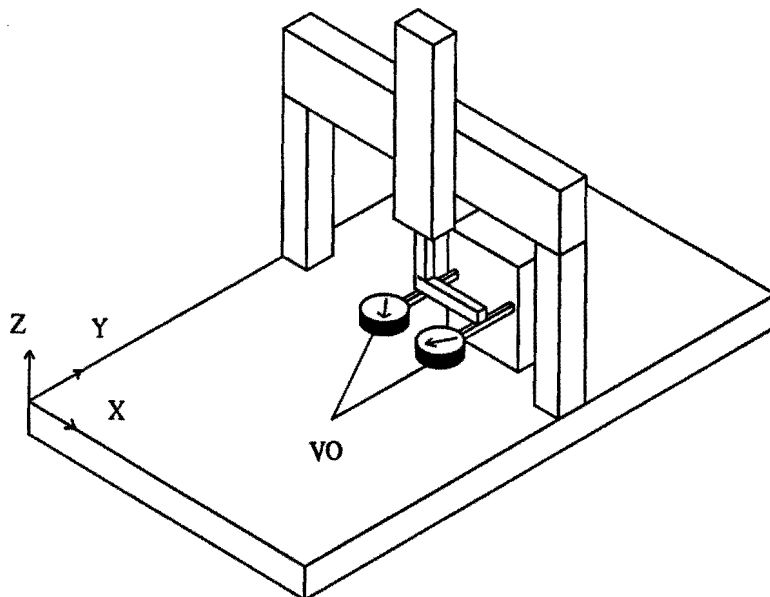
Figuur 3.7 Niet parallelle bundels waardoor een meetafwijking ( $\Delta\beta$ ) wordt geïntroduceerd.

### 3.2.4 Rotatie-afwijkingen

Rotatie-afwijkingen zijn gedefiniëerd als kantelingen van een machine-as om de eigen as. Doordat de verplaatsingsrichting tevens de rotatie-as is zijn het lastig te bepalen bronnen van afwijkingen.

Ligt een geleiding in het horizontale vlak, dan kan een elektronisch waterpas uitkomst bieden (zie 3.2.3) en kan de afwijking rechtstreeks worden bepaald.

Bij een verticale geleiding is dit niet mogelijk en moet teruggegrepen worden op een afgeleide meting door, ofwel twee rechtheidsmetingen uit te voeren (zie verder 3.3.2, Ad 4), ofwel één rechtheidsmeting met twee verplaatsingsopnemers te gebruiken (zie figuur 3.8).



VO: verplaatsingsopnemer.

Figuur 3.8 Rotatiemeting door rechtheidsmeting met twee verplaatsingsopnemers.

### 3.2.5 Haaksheids-afwijkingen

De haaksheids-afwijking is gedefiniëerd als de hoek tussen de twee best passende lijnen door twee, nominaal orthogonale, machine-assen minus  $90^{\circ}$ .

Het is mogelijk de haaksheidsafwijking direct te bepalen door een haaksheidsnormaal te nemen, bijvoorbeeld een granieten blok of een gehard stalen hoekhaak. Deze haaksheidsnormalen zijn beschikbaar tot afmetingen van 2000 mm, waarbij een absolute onnauwkeurigheid van 2  $\mu\text{m}$  kan worden behaald.

Anderzijds kan gebruik worden gemaakt van een optische haaksheidsnormaal, zoals een pentagonprisma. Hiermee is een absolute onnauwkeurigheid van 1  $\mu\text{m}$  te bereiken. Door twee rechtheidsmetingen uit te voeren, waarbij het pentagonprisma als haaksheidsnormaal fungeert, kan de haaksheidsafwijking worden bepaald (zie verder 3.3.2, Ad 5).

Bij zeer grote machine-afmetingen kan alleen gebruik worden gemaakt van een optische haaksheidsnormaal.

### 3.3 De afnameprocedure

Zoals vermeld in hfdst. 2 zijn alle aanwezige machines ingedeeld in 3 groepen. Achtereenvolgens zal iedere groep apart besproken worden en de overwegingen die een rol gespeeld hebben bij het bepalen van de afnameprocedure worden toegelicht.

#### 3.3.1 Groep 1: de DEA-machines.

Deze machines zijn opgebouwd uit twee kolommen met bovengleiding en zijn volledig CNC-gestuurd. De beide kolommen kunnen zowel interactief als separaat opereren. | ✓

Bij levering worden alle relevante geometrische bronnen van afwijkingen bepaald en in de computer vastgelegd. Via een software-correctieprogramma worden alle meetgegevens gecorrigeerd voor de afwijkingen die in de machinegeometrie aanwezig zijn. Door deze correctie op de meetgegevens is het niet zinnig de geometrie-afwijkingen te bepalen. | ✓✓

Een mogelijke controle omvat bij deze machines dan ook een aantal metingen waarbij een standaardlengte, die een orde nauwkeuriger is dan de machine, vergeleken wordt met de door de machine gemeten lengte. | ✓✓

De standaardlengte kan bestaan uit een laserinterferometer of een eindmaat. Het voornaamste onderscheid ligt in het feit dat de eindmaat een vaste lengte heeft, en in iedere willekeurige stand in het meetvolume kan worden geplaatst (3D), terwijl de laserinterferometer een variabele lengte heeft, maar slechts langs één as gebruikt wordt (1D). Beide worden hier toegepast en zullen nader besproken worden.

### 3.3.1.1 Laserpositiemetingen

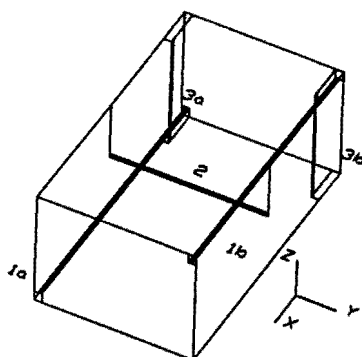
Lineariteitsmetingen zijn positiemetingen langs een machine-as, waarbij de door de laserinterferometer gemeten verplaatsing wordt vergeleken met de door de machine aangegeven verplaatsing. De optredende positie-afwijking (=lineariteitsafwijking) is gedefiniëerd als:

$$\Delta X_x = X_m - X_1 \quad (3.9)$$

Hierin is  $X_1$  de lasermeting en  $X_m$  de machinemeting. In feite is  $X_1$  opgebouwd uit twee metingen omdat een positie  $X$  één keer vanuit positieve ( $X_p$ ) en één keer vanuit negatieve ( $X_n$ ) richting wordt benaderd.  $X_1$  wordt hieruit bepaald door :

$$X_1 = 1/2 * (X_p + X_n) \quad (3.10)$$

De lineariteitsmetingen dienen zowel bij kleinste als grootste komparatorafwijking te geschieden, wat betekent dat respectievelijk zo dicht mogelijk bij en zo ver mogelijk van de meetlineaal gemeten moet worden (THE 87). Uit deze combinatie van metingen is een controle mogelijk van de software-correctie. Met dit gegeven kunnen de posities waarin de lasermetingen moeten gebeuren per kolom worden aangegeven zoals in figuur 3.9.



a: kleinste komparatorafwijking. b: grootste komparatorafwijking.

1. X-lineariteitsmeting.
2. Y-lineariteitsmeting.
3. Z-lineariteitsmeting.

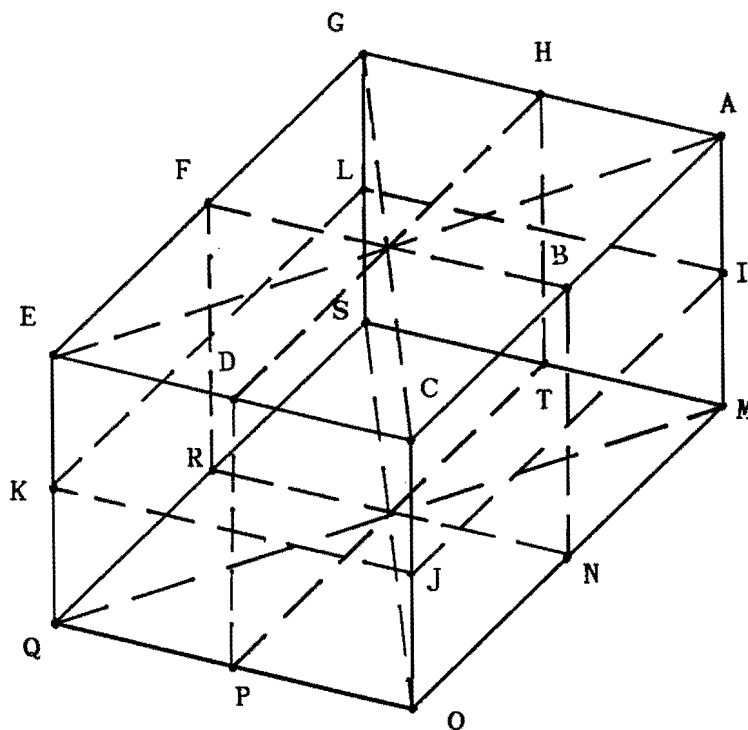
Figuur 3.9 Posities van lasermetingen in het meetvolume.



### 3.2.1.2 Eindmaatmetingen

De eindmaat mag in principe in iedere stand en op elke positie in het meetvolume worden opgesteld. Om het hele meetvolume te bestrijken zou een oneindig aantal metingen moeten worden verricht. Teneinde dit te voorkomen, en toch een betrouwbare indruk te krijgen van de nauwkeurigheid van de machine, moeten de posities beperkt worden tot die waarbij de grootste afwijkingen verwacht worden. Daartoe zijn een aantal posities gekozen die, naar VDI en CMM richtlijnen (VDI 83), algemeen aanvaard worden als zijnde het meest ongunstig voor de machine (THE 87). Om deze eindmaatposities eenduidig te kunnen vastleggen zijn in het meetvolume een aantal vlakken gedefiniëerd (figuur 3.10). Deze vlakken zijn zodanig gekozen dat de eindmaat kan worden opgesteld op:

1. de 4 ruimtediagonalen.
2. de 6 vlakdiagonalen.



Figuur 3.10 De gedefiniëerde vlakken in het meetvolume.

In ieder van deze 5 vlakken zijn een aantal posities aangegeven waar de eindmaat, met één of beide armen (appendix D), gemeten dient te worden. Per positie moeten 10 metingen worden verricht waarna de gemiddelde lengte en de standaardafwijking hiervan bepaald kunnen worden volgens:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n L_i / n \quad (3.11)$$

$$S(\bar{L}) = \left\{ \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2 / (n-1) \right\}^{1/2} \quad (3.12)$$

De werkelijke eindmaat lengte dient te worden bepaald, bij de internationale standaardreferentietemperatuur 20 °C, door een daartoe geëigende instantie. Hierbij moet dezelfde opstelling van de eindmaat worden gehanteerd als bij de metingen aan de DEA-machines.

De eindmaat dient altijd opgelegd te worden met één bepaalde steunpuntsafstand (zie appendix E) om een ongewenst doorbuigingsgedrag te vermijden (LEI 54).

Tijdens de eindmaatmetingen dienen zowel de temperatuur van de machine als die van de eindmaat te worden bepaald. Vervolgens moet de werkelijke eindmaat lengte bij 20 °C gecorrigeerd worden naar de momentane lengte ten opzichte van de machine volgens:

$$L_{\text{gecorr}} = L_{\text{eindm}} * \{1 + E_e (T_e - 20) - E_m (T_m - 20)\} \quad (3.13)$$

Hierin is :

- $E_e$  : Lineaire uitzettingscoëff. eindmaat.
- $E_m$  : Lineaire uitzettingscoëff. machine.
- $T_e$  : Temperatuur eindmaat in °C.
- $T_m$  : Temperatuur machine in °C.
- $L_{\text{eindm}}$  : Lengte eindmaat bij 20 °C.
- $L_{\text{gecorr}}$  : Lengte eindmaat tijdens meting.

De gemiddelde meetafwijking, over de lengte van de eindmaat, van de meetmachine wordt gegeven door:

$$\Delta L = \bar{L} - L_{\text{gecorr}}$$

met standaardafwijking  $S(\Delta L) = \sqrt{S(\bar{L})^2 + S(L_{\text{gecorr}})^2}$  (3.14)

Uit berekening blijkt dat  $S(L_{\text{gecorr}})^2$  hierbij verwaarloosd kan worden.

Statistisch gezien ligt de meetafwijking  $dL$  met 95% zekerheid tussen de grenzen:

$$\Delta L - 2S/\sqrt{n} < dL < \Delta L + 2S/\sqrt{n} \quad (3.15)$$

Deze grenzen dienen vergeleken te worden met de specificaties van de machine ( $dL = U_{3d}$ ). Deze zijn voor de DEA-machines als volgt gedefiniëerd:

$$|U_{3d}| \leq 50 + 35 * L \quad (\mu\text{m}), L \text{ in m.} \quad (3.16)$$

Als criterium voor goed- of afkeur wordt hier gehanteerd dat de machine alleen dan buiten de specificaties valt wanneer alle metingen (met 95% zekerheid) buiten de specificatiegrenzen vallen. In formulevorm betekent dit voor alle metingen dat de machine wordt afgekeurd wanneer geldt:

$$|\Delta L| - 2S/\sqrt{n} > 50 + 35 * L \quad L \text{ in m.} \quad (3.17)$$

### 3.3.2 Groep 2: de Stiefelmayer-, Mora- en Zeiss-machines

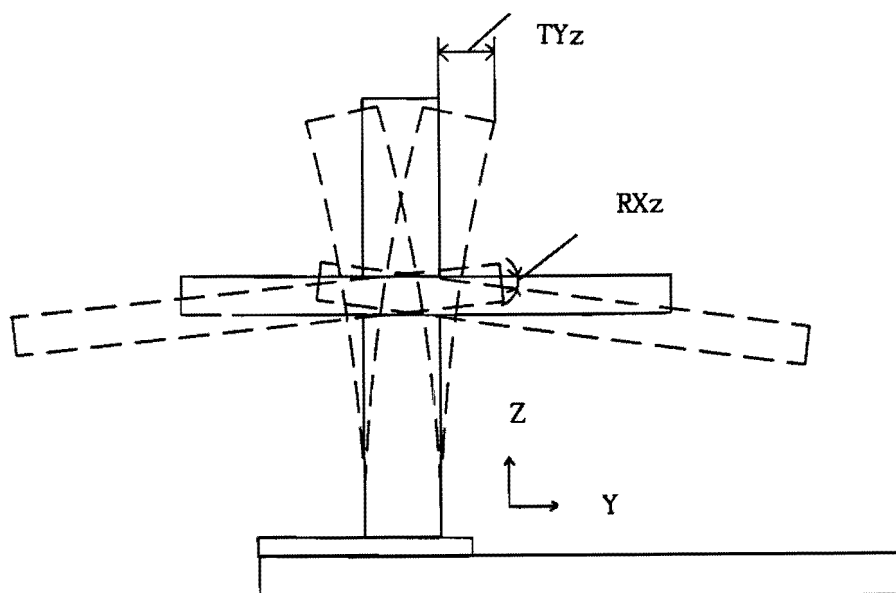
Deze machines bestaan uit één of twee kolommen van het C-type. Met uitzondering van de Zeiss-machines zijn alle, thans aanwezige, machines in deze groep handbestuurd.

Door hun bouwvorm zijn deze machines gevoelig voor doorbuiging van de afzonderlijke machine-elementen. Daar de Y-arm horizontaal is gesitueerd zal deze, afhankelijk van de stand, een bepaald koppel uitoefenen op de Z-kolom. Hierdoor zal de Z-kolom uitbuigen, afhankelijk van de plaats van de Z-slede.

Door deze effecten zijn de  $TY_z$ -afwijking en  $RX_z$ -afwijking niet alléén afhankelijk van de Z-coördinaat, maar tevens van de stand van de Y-arm (zie figuur 3.11). Dit is de reden waarom het in hfdst 3.1 gegeven model slechts ten dele van toepassing is op dit type machines.

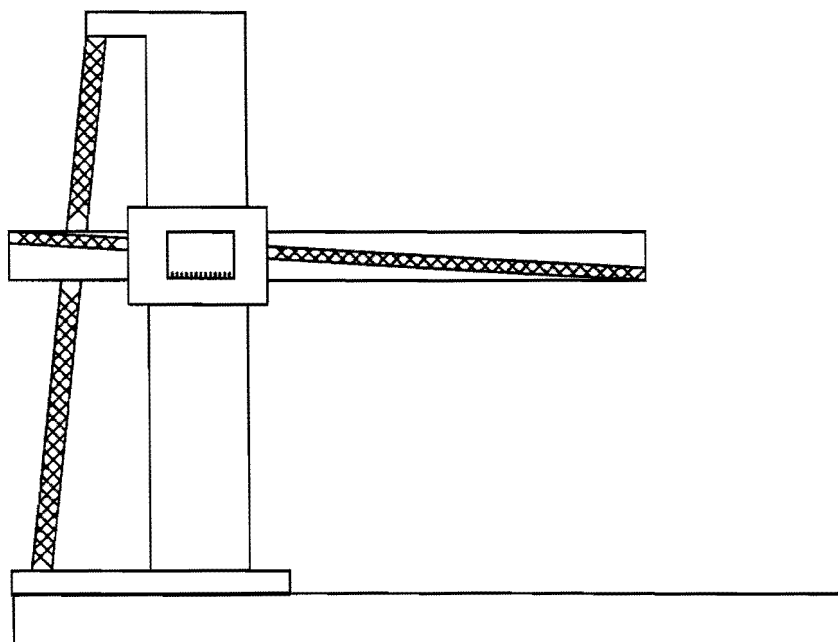
Er kan hier niet meer gesproken worden van een haaksheids-afwijking tussen de Z- en de Y-as omdat de stand van de Y-arm variëert met de positie van de Z-slede. In plaats daarvan worden de beide rechtheids-afwijkingen  $TY_z$  en  $TZ_y$ , bepaald ten opzichte van een vaste referentie, zoals de meettafel. Op deze metingen dient géén correctie ten opzichte van de best passende lijn te worden uitgevoerd zoals gebruikelijk is. Daar het maximum koppel, door de Y-arm op de Z-slede, zal worden uitgeoefend bij volledig ingeschoven en volledig uitgeschoven Y-arm, zal de maximale rechtheids-afwijking  $TY_z$  in één van deze twee standen gevonden worden.

De rechtheids-afwijking  $TZ_y$  dient bepaald te worden met de Z-slede zo laag mogelijk, omdat anders de kantel-afwijking  $RX_z$  zich, met de Y-arm, zal manifesteren als een rechtheids-afwijking. Ook de kantel-afwijking  $RX_z$  is afhankelijk van de stand van de Y-arm en dient, voor een maximale afschatting, bepaald te worden met de Y-arm uitgeschoven.



Figuur 3.11 Invloed Y-coördinaat op Z-kolom.

Om de effecten van doorbuiging enigszins te verminderen, zijn door de fabrikant enige hulpmiddelen in de vorm van trekstangen aangebracht (zie figuur 3.12). Hiermee kunnen de Z-kolom en de Y-arm voorgespannen worden.



Figuur 3.12 Trekstangen voor buigcorrectie.

Daar bij deze machines geen software-matige correctie van de meetgegevens plaatsvindt, kan de totale maximale afwijking van een machine worden bepaald door de afzonderlijke geometrie-afwijkingen te bepalen. Deze kunnen dan, met inachtneming van de hiervoor beschreven afwijkende metingen, worden doorberekend naar de tasterpunt. Op deze wijze kunnen, voor dit type machines, de volgende schattingen voor de maximale afwijkingsvectoren gegeven worden (zie appendix H.1):

$$\begin{aligned} \Delta U_{mx} = & TXx + TXy + TXz - RZx*(Y+Yxz+Yzy) & (3.18) \\ & - RZy*(Yt) + RYx*(Z+Zxz+Zzy) + RYz*(Zzy+Zt) - \\ & RZz*(Y+Yzy) + RYy*(Zt) - SXz*(Z) - SXY*(Y). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{my} = & TYy + TYx + TYz_{\max} - RXz_{\max}*(Zzy+Zt) & (3.19) \\ & - RXY*(Zt) + RZx*(Xxz+Xzy+Xt) + RYz*(Xt) - \\ & RXx*(Z+Zxz+Zzy) + RZz*(Xzy+Xt). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{mz} = & TZz + TZx + TZy_{\max} + RXz_{\max}*(Y+Yzy) & (3.20) \\ & + RXY*(Yt) - RYx*(Xxz+Xzy+Xt) - RYz*(Xzy+Xt) - \\ & RXx*(Y+Yxz+Yzy) - RYy*(Xt). \end{aligned}$$

Van de overblijvende 18 bronnen van afwijkingen zijn de kantelafwijkingen RYz, RXY, RZy en RYy niet relevant, daar de rotaties van de Y-arm (RXY, RZy en RYy) slechts op de, relatief korte, tasterlengtes werkzaam zijn. Verder draait de RYz-afwijkingenbron een arm die bestaat uit de tasterlengtes en, relatief kleine, verbindingsvectoren (Zzy en Xzy). Een afname bestaat derhalve bij deze machines uit de bepaling van:

- 1) de lineariteits-afwijkingen TXx, TYy, TZz.
- 2) de kantel-afwijkingen RYx, RZx,  $RXz_{\max}$ .
- 3) de rechtheids-afwijkingen TYx, TZx, TXz,  $TYz_{\max}$ , TXy en  $TZy_{\max}$ .
- 4) de rotatie-afwijkingen RXx en RZz.
- 5) de haaksheids-afwijkingen  $\theta Xy$ ,  $\theta Xz$ .
- 6) de tasterafwijkingen.

Op basis van de, bij dit type machine vereiste, meetnauwkeurigheid en de, hierboven gegeven, meetopdracht zullen onderstaand enige voorstellen gedaan worden voor de te kiezen meetinstrumenten en meetposities.

Ad 1. De lineariteits-afwijkingen moeten zo dicht mogelijk bij de betreffende geleiding worden bepaald daar anders de invloed van eventuele rotatie-afwijkingen gaat overheersen.

Alle lineariteits-afwijkingen kunnen met behulp van een laserinterferometer bepaald ~~te~~ worden. In appendix F worden de opstellingsschetsen gegeven voor het bepalen van de diverse lineariteits-afwijkingen. hnd ✓

Bij alle lineariteitsmetingen moeten zowel de luchtcondities (druk, temperatuur en vochtigheidsgraad) als machinetemperatuur gemeten worden zodat de gemeten weglengte voor een eventueel verschil gecorrigeerd kan worden.

Ad 2. De kantel-afwijkingen kunnen, met uitzondering van de RXz-afwijking die, om reeds eerder vermeldde redenen, bepaald dient te worden met de Y-arm uitgeschoven, in principe in iedere positie worden bepaald.

Als meetinstrument voor de RYx- en RZx-afwijking kunnen hier zowel de autocollimator als de laserinterferometer gebruikt worden. Het gebruik van de laserinterferometer biedt echter een praktisch voordeel omdat de meting van de kantel-afwijkingen in dezelfde opstelling uitgevoerd kan worden als de lineariteitsmeting, zodat de laserbron niet opnieuw uitgelijnd hoeft te worden.

Meting van de machine- en luchttemperatuur voor correctie is hier overbodig, daar beide laserbundels eenzelfde weg afleggen.

De RXz-afwijking kan gemeten worden met behulp van een elektronisch waterpas omdat met dit meetinstrument de kantel-afwijking snel en eenvoudig bepaald kan worden. In appendix F worden de opstellingsschetsen gegeven voor deze metingen.

Ad 3. De rechtheids-afwijkingen kunnen allen bepaald worden met behulp van een richtkijker en bijbehorend merk, een optisch waterpas of een rechtheidslineaal.

Een optisch waterpas heeft als nadeel dat de optische as immer horizontaal loopt, zodat voor een meting aan de machine ten opzichte van de meettafel, zowel de machine als de tafel gemeten dienen te worden.

Een rechtheidslineaal was op het moment van onderzoek niet in het instrumentarium aanwezig, zodat bij alle metingen gebruik zal worden gemaakt van een richtkijker.

Voor de TZy- en TYz-meting wordt de richtkijker eerst aan het tafeloppevlak uitgelijnd. Bij de TYz-meting dienen twee metingen plaats te vinden, namelijk met de Y-arm in- en uitgeschoven.

Voor de overige metingen dient het meetinstrument uitgericht te worden bij de kleinste en grootste coördinaat van de as waarlangs gemeten wordt. In appendix F worden de opstellingsschetsen gegeven voor de verschillende metingen.

Ad 4. De rotatie-afwijking RXx kan rechtstreeks worden bepaald door het elektronisch waterpas op de X-geleiding te plaatsen. Een opstellingsschets is gegeven in appendix F. De rotatie-afwijking RZz kan echter alleen bepaald worden via een indirecte meting. Hiertoe worden twee rechtheids-metingen uitgevoerd aan de Z-kolom in X-richting (TXz). Eén meting dient met de Y-arm ingeschoven en één meting met de Y-arm uitgeschoven te gebeuren. Uit het verschil in uitwijking, in combinatie met de bekende uitschuiflengte, kan de RZz-afwijking bepaald worden volgens:

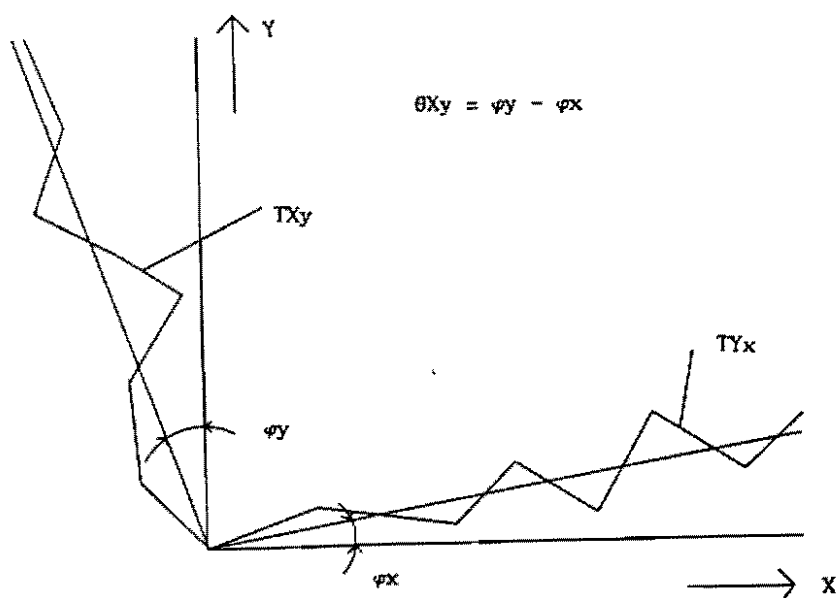
$$RZz = \text{Arcsin} \left[ \frac{TXz_{\text{uit}} - TXz_{\text{in}}}{L} \right] \quad [\text{rad}] \quad (3.21)$$



De rechtheidsmeting kan zowel met een richtkijker als meetinstrument (zie appendix F) als met twee verplaatsingsopnemers en een rechtheidslineaal (zie voor principe figuur 3.7) uitgevoerd worden. Vanwege het ontbreken van een rechtheidslineaal wordt hier een richtkijker gebruikt.

Ad 5. De haaksheids-afwijkingen worden bepaald uit de rechtheidsmetingen. Daar bij het uitrichten van de richtkijker onvermijdelijk een uitrichtafwijking wordt geïntroduceerd, zal de meting een stijgend of dalend verloop krijgen.

De rechtheids-afwijking is gedefiniëerd als de afwijking op de best passende lijn door de metingen. De hoek die ingesloten wordt door de translatie-as en de best passende lijn is de uitrichtafwijking. Wanneer een exact haakse hoek gecreëerd wordt, d.m.v. een pentagonprisma, is deze uitrichtafwijking gelijk bij de meting van één der andere rechtheidsfouten. Hierdoor is de haaksheidsafwijking te bepalen uit het verschil in ingesloten hoek tussen beide grafieken. Een en ander is in figuur 3.13 nader toegelicht.



Figuur 3.13 Bepaling van de haaksheids-afwijking  $\theta_{Xy}$  uit de rechtheids-afwijkingen  $T_{Xy}$  en  $T_{Yx}$ .

### 3.3.3 Groep 3: de Mitutoyo-machine.

Deze groep bestaat (nog) slechts uit één machine van het B- of portaalttype, zoals in figuur 2.2 is aangegeven. Het is een machine zonder software-matige correctie zodat een aanpak zoals bij groep 2 mogelijk is.

Het belangrijkste onderscheid tussen groep 2 en deze groep ligt in het feit dat, als gevolg van de constructie van deze machines, doorbuiging van de machine-elementen wel optreedt, doch slechts afhankelijk is van één machinecoördinaat, waardoor ze als normale geometrische afwijkingen kunnen worden meegenomen en het, in hfdst. 3.1, gegeven model volledig van toepassing is. Met behulp van dit model (zie appendix H.2) kunnen de afwijkings-vectoren als volgt bepaald worden:

$$\begin{aligned} \Delta U_{mx} = & TXx + TXy + TXz + RYx*(Z-ZB+Zxz) - & (3.22) \\ & RYz*(Zt) - RZy*(Yyx+Yxz+Yt) - RZx*(Yxz+Yt) + \\ & RYy*(Z-Zb+Zyx+Zxz) - RZz*(Yt) - SXz*(Z). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{my} = & TYy + TYx + TYz - RYx*(Z-ZB+Zyx+Zxz) + & (3.23) \\ & RXz*(Zt) + RZy*(X-XB+Yyx+Xxz) + RZx*(Xxz+Xt) - \\ & RXx*(Z-ZB+Zxz) + RZz*(Xt) - SYx*(X) - SYz*(Z). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{mz} = & TZz + TZx + TZy - RYx*(Xxz+Xt) - & (3.24) \\ & RYz*(Xt) + RYy*(Yyx+Yxz+Yt) + RXz*(Yt) - \\ & RYy*(X-XB+Yyx+Xxz) - RXx*(Yxz+Yt). \end{aligned}$$

Er zijn een drietal bronnen van afwijkingen, namelijk RYz, RXz en RZz, wiens invloed meestal verwaarloosbaar klein is door de relatief kleine arm waarop ze werkzaam zijn, namelijk de tasterlengtes (zie vgl. 3.22 t/m 3.24). Wanneer echter grotere tasterlengtes worden gebruikt kunnen deze bronnen van afwijkingen een significante invloed op de meetonnauwkeurigheid uitoefenen.

Het wordt dan noodzakelijk deze bronnen van afwijkingen in de controle mee te nemen. De RYz- en RXz-afwijkingen kunnen met de laserinterferometer gemeten worden op eenzelfde manier als de kantelafwijkingen van de Y-geleiding (zie figuur G.4 en G.5), de RZz kan via twee rechtheidsmetingen bepaald worden (zie figuur 3.7).

De positie-afwijking TXx moet in principe zo dicht mogelijk bij de geleiding worden bepaald, dus boven in het meetvolume. Dit stuit echter op een aantal praktische bezwaren daar een dergelijke opstelling lastig is te bouwen. Daarom wordt deze bron van afwijkingen onderin in het meetvolume bepaald. De hier gemeten positie-afwijking wordt echter veroorzaakt door een combinatie van bronnen van afwijkingen.

De totale gemeten afwijking (zie vgl. 3.22) is opgebouwd uit:

$$TXx_{\text{gemeten}} = TXx + \{RYx \cdot (Z_{\text{bereik}} + Z_{xz})\} + \{RZx \cdot (Y_{xz} + Y_t)\} \quad (3.25)$$

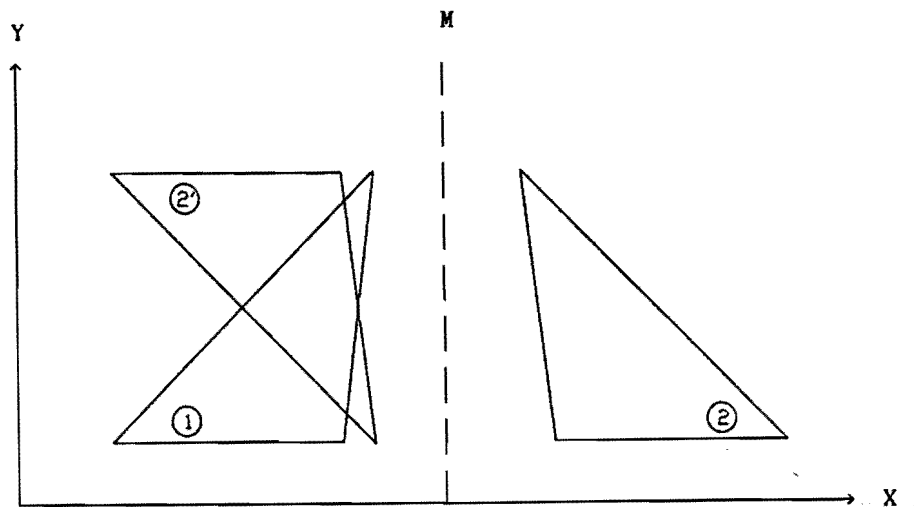
De invloed van de bronnen van afwijkingen Ryx en RZx wordt zodoende in de positie-afwijking TXx verdisconteerd. Door RYx te meten is, met behulp van de gegeven armlengtes, de TXx-afwijking boven in het meetvolume te bepalen.

Doordat de nauwkeurigheid van deze machines relatief hoog is, geniet het de voorkeur bij alle metingen gebruik te maken van de laserinterferometer. Als uitzondering treedt hier de bepaling van de RXx- en RYy-rotatie-afwijkingen op, daar deze slechts moeizaam met de laserinterferometer te bepalen zijn. Hier moet een elektronisch waterpas worden ingezet. Het voorgaande resumerend bevat een afname de bepaling van de volgende 16 bronnen van afwijkingen:

- 1) de lineariteits-afwijkingen TXx, TYy en TZz.
- 2) de kantel-afwijkingen RXy en RZy.
- 3) de rechtheids-afwijkingen TYx, TXy, TYz, TZy, TXz en TZx.
- 4) de rotatie-afwijkingen RXx en RYy.
- 5) de haaksheids-afwijkingen  $\theta Yx$ ,  $\theta Yz$  en  $\theta Xz$ .
- 6) de afwijkingen in het tastsysteem.

- Ad 1. De lineariteits-afwijkingen moeten in principe zo dicht mogelijk bij de betreffende geleiding worden bepaald, daar anders de invloed van eventuele rotatie-afwijkingen gaat overheersen. Zoals eerder vermeld levert dit echter voor de TXx-lineariteits-afwijking bezwaren op, zodat hier een uitzondering moet worden gemaakt (zie vgl. 3.24).  
In appendix G zijn de opstellingsschetsen gegeven voor het bepalen van de diverse lineariteits-afwijkingen.  
Bij alle lineariteitsmetingen moeten zowel de luchtcondities (druk, temperatuur en vochtigheidsgraad) als machinetemperatuur gemeten worden, zodat de gemeten weglengte hiervoor gecorrigeerd kan worden.
- Ad 2. De kantel-afwijkingen kunnen in principe in het gehele meetvolume worden bepaald. Als meetinstrumenten kunnen hier zowel de laserinterferometer als de autocollimator worden ingezet. Het biedt echter een praktisch voordeel de laserinterferometer te gebruiken daar dezelfde opstelling kan worden gehanteerd als bij de lineariteitsmetingen, dus eveneens zo dicht mogelijk bij de geleiding.  
Meting van de machine- en luchttemperatuur voor correctie is hier overbodig daar beide laserbundels eenzelfde weg afleggen. In appendix G worden de opstellingsschetsen gegeven voor deze metingen.
- Ad 3. De rechtheids-afwijkingen kunnen allen bepaald worden met behulp van de laserinterferometer. In de appendix G worden de opstellingsschetsen gegeven voor de verschillende metingen, waarbij de opstellingen dusdanig zijn ingericht dat uit twee rechtheidsmetingen de haaksheidsafwijking is te bepalen.
- Ad 4. De rotatie-afwijkingen RXx en RYy kunnen rechtstreeks worden bepaald door het elektronisch waterpas op de verschillende geleidingen te plaatsen.  
De opstellingsschetsen zijn gegeven in appendix G.

Ad 5. De haaksheids-afwijkingen kunnen worden bepaald uit de rechtheidsmetingen (zie verder hfdst 3.3.2 , Ad 5) of met een haaksheidsblok waarbij de omslagmethode wordt gebruikt. Het principe van deze methode is weergegeven in figuur 3.14. Door het omklappen van het haaksheidsblok zal de haaksheidsafwijking van het blok van teken wisselen, terwijl die van de meetmachine hetzelfde teken behoudt. Hierdoor verdwijnt, bij optellen van de gevonden haaksheidsafwijkingen, de afwijking van het blok uit de berekeningen.



Figuur 3.14 De omslagmethode ter bepaling van de haaksheid. Omslaan van positie 1 naar 2' heeft de voorkeur omdat hier voor beide metingen hetzelfde gedeelte van de geleidingen wordt gebruikt.

## 4. Testprocedures

### 4.1 Inleiding

Het doel van een testprocedure is om in een gelimiteerd tijdsbestek zoveel mogelijk te weten te komen van de onnauwkeurigheid van de meetmachine. Om dit te bereiken kunnen verschillende testprocedures worden aangewend die ieder een eigen specifieke doelstelling vertegenwoordigen. Er kan hier onderscheid gemaakt worden tussen:

- 1) testprocedures ter bepaling van de systematische afwijkingen bij bepaalde meetopgaven.
- 2) testprocedures ter indicatie van de maximale onnauwkeurigheid ten opzichte van de machinespecificaties.
- 3) testprocedures voor de schatting van geometrie-afwijkingen.
- 4) testprocedures op basis waarvan een software-matige correctie voor de geconstateerde afwijkingen kan worden doorgevoerd.

Ad 1. Deze testprocedures kunnen worden toegepast op meetmachines welke vaak eenzelfde type produkt meten. Meetopgaven en -posities komen hierbij vrijwel overeen met die van het produkt. Daar de dimensies van het testobjekt nauwkeurig bekend zijn, kunnen de afwijkingen van de meetopgaven in de betreffende posities worden bepaald (BCR 85).

Ad 2. Met testprocedures ter indicatie van de meetonnauwkeurigheid wordt hier bedoeld een testprocedure die enkel als doel heeft een uitspraak te doen of de machine, met een betrouwbaarheid van 95%, binnen de door de fabrikant opgegeven specificaties ligt.

Hierbij wordt een referentielengte vergeleken met een door de machine gemeten lengte. Omdat deze metingen slechts een steekproef zijn geeft ieder meetresultaat enkel zekerheid over de minimale onnauwkeurigheid van de machine. De metingen dienen derhalve dusdanig te worden ingericht dat de kans op afkeur van de meetmachine, indien deze niet aan zijn specificaties voldoet, maximaal wordt.

Bij afkeur of twijfel dienen daarom aanvullende metingen te volgen welke kunnen uitwijzen waar de geconstateerde afwijkingen hun oorzaak vinden.

Ad 3. Testprocedures waarbij de geconstateerde systematische afwijkingen worden herleid tot de afzonderlijke geometrie-afwijkingen vragen een dusdanige combinatie van meetrichtingen en meetlengtes, dat vanuit de verkregen resultaten hierover een uitspraak kan worden gedaan. In dit verband kan worden geconstateerd dat de omgekeerde weg van een afname wordt gevolgd daar door metingen aan objecten de afzonderlijke geometrie-afwijkingen worden bepaald. Op dit moment wordt aan de T.U. Eindhoven, sectie werktuigkundige meettechniek, onderzoek verricht naar het ontwerp van dergelijke testprocedures en vergelijking van reeds bestaande testprocedures. Voorbeelden van de laatste categorie zijn een roterende kogelstaaf (BRY 82), een gekalibreerde cilinder (KNA 83) en doosvormige objecten (SCH 85).

Ad 4 Testprocedures bedoeld om een meetmachine software-matig te corrigeren voor geometrie-afwijkingen dienen het verloop van de systematische afwijkingen in het gehele meetvolume te bepalen. De keuze van de geschikte testprocedure is sterk afhankelijk van de wijze waarop de software-correctie wordt doorgevoerd.

Hiervoor bestaan twee mogelijkheden:

- 1) schatting van de afzonderlijke geometrie-afwijkingen waarna de te compenseren tasterafwijking kan worden berekend met behulp van het in hfdst 3.1 gegeven model.
- 2) meting van de tasterafwijking in rasterknooppunten waarna via interpolatie in het gehele meetvolume voor de afwijkingen kan worden gecompenseerd.

#### 4.2 De keuze van een testprocedure

Uit de in hfdst 4.1 gegeven mogelijkheden moet een keuze worden gemaakt ten aanzien van de te hanteren testprocedure. Omdat alle, bij Volvo aanwezige, meetmachines een grote variëteit aan produkten meten, zijn testprocedures van het eerste type geen doeltreffende oplossing.

De tweede mogelijkheid is toepasbaar op alle aanwezige machines. Testprocedures van de derde categorie worden voorlopig buiten beschouwing gelaten tot het eerder genoemde onderzoek concrete resultaten te zien geeft. Wel kunnen enige aanbevelingen worden gedaan, hierop zal in hfdst 4.5 worden ingegaan.

De vierde categorie testprocedures is niet van toepassing op het grootste deel van de bij Volvo<sup>2</sup> aanwezige meetmachines, daar deze geen geschikte computerfaciliteiten bezitten. In dit verband kan worden opgemerkt dat de Zeiss- en de Mitutoyo-metmachine beide beschikken over een computer ter verwerking van de meetgegevens zodat, met enige aanpassing in de vorm van een software-correctiepakket, de mogelijkheid bestaat deze machines in de toekomst software-matig te corrigeren voor geometrie-afwijkingen.

De resterende meetmachines (DEA) beschikken reeds over een software-matige correctie, doch dienen eveneens een testprocedure te ondergaan ter controle van de juiste invulling hiervan.

Resumerend lijkt een indicatieve testprocedure hier het meest geschikt.



### 4.3 De testobjecten

Als mogelijke testobjecten voor een indicatieve testprocedure komen in aanmerking:

- 1) Eindmaat.
- 2) Stappeneindmaat.
- 3) Kogelstaaf.
- 4) Diverse combinaties van kogelstaven zoals tetraëder- en kubusvormen.
- 5) Geometrische elementen opgesteld in een vlak.

Ad 1. Eindmaten zijn beschikbaar in lengtes variërend van 1 mm tot 1500 mm. De relatieve onnauwkeurigheid is afhankelijk van de nauwkeurigheidsklasse van de eindmaat en kan dalen tot  $1 \times 10^{-6}$ . Met name de vaste meetlengte is het grootste nadeel (zie verder hfdst 3.2.1, ad 2).

Ad 2. Een stappeneindmaat bestaat uit een aantal gekoppelde eindmaten die zijn aangebracht op een draagbalk. Hierdoor is een veelvoud van aantastvlakken aanwezig over een lengte vergelijkbaar met een eindmaat. De relatieve onnauwkeurigheid bedraagt  $1.5 \times 10^{-6}$  voor de nauwkeurigste uitvoeringen ( zie verder 3.2.1, ad 3).

Ad 3. Een kogelstaaf bestaat uit twee, nauwkeurig ronde, kogels welke verbonden zijn door staaf materiaal met een zeer lage uitzettingscoëfficiënt. Geschikte materialen hiervoor zijn zerodur, kwartsglas of speciale vezelversterkte kunststoffen. Door het gebruik van een dergelijk materiaal is de afstand tussen de middelpunten van de kogels nagenoeg constant zodat hier alleen meting van de machinetemperatuur benodigd is.

Een nadeel is de benodigde software ter bepaling van de middelpunten van de kogels waardoor dit testobject niet zonder meer bij alle, binnen Volvo aanwezige, machines kan worden ingezet.

Ad 4. Met behulp van een kogelstaaf als basismodule kunnen verschillende vormen worden gecreëerd die als geheel constante afmetingen hebben. Zo kunnen uit meerdere kogelstaven testobjecten worden samengesteld, met name voor de testprocedures van groep 1.

Als nadeel hebben deze vormen dat de verbinding kogel-staaf kritisch kan worden als meerdere staven aan één kogel worden bevestigd. Bij temperatuurswisselingen kunnen, ondanks de lage uitzettingscoëfficiënt van de staven, hoge spanningen optreden in de verbindingen (BCR 85) waardoor het object kan ontleden.

Een verbetering kan zijn de staven met elkaar te verbinden in plaats van de kogels. Op deze wijze is een stabiele opstelling te bouwen die eenvoudige wijziging van de meetposities toelaat. Op dit moment wordt aan de T.U. Eindhoven onderzoek verricht naar de mogelijkheden met deze testobjecten.

De benodigde software kan eveneens een belemmering vormen dit type testobject te gebruiken. Als voordeel staat hier tegenover dat in één opstelling meerdere metingen kunnen worden uitgevoerd.

Ad 5. Dit type testobject bestaat uit een plaat materiaal met een, bij voorkeur, lage uitzettingscoëfficiënt waarin, op bepaalde plaatsen, geometrische elementen (zoals gaten, kogels en uitwendige cilinders) zijn aangebracht met nauwkeurig bekende afmetingen. Door meting van de posities van deze elementen kan een indruk verkregen worden van de onnauwkeurigheid van de meetmachine. Een nadeel is dat deze platen zwaar en onhandelbaar zijn, bovendien is de kostprijs relatief hoog.

#### 4.4 De testprocedure

Voor de bepaling van de juiste oriëntatie- en positiecombinaties van een testobject dient allereerst geformuleerd te worden wat met het testobject beoogd wordt. Bij Volvo is in dit geval het doel om bij een machine, die middels een initiële afname heeft bewezen een onnauwkeurigheid te bezitten die binnen de specificaties ligt, te onderzoeken of zich wijzigingen hebben voorgedaan in de geometrie ten nadele van de nauwkeurigheid van de machine. Daarnaast dient het tastsysteem te worden gecontroleerd. In de praktijk is gebleken dat, door wijzigingen in de lagereigenschappen van zowel lucht- als rollagers, met name de haaksheid van de machines aan verandering onderhevig is. Ook kantelafwijkingen kunnen hierdoor een andere grootte aannemen. De rechtheidsafwijkingen zullen in het algemeen, in de tijd gezien, minder variëren. De lineariteitsafwijkingen kunnen echter door vervuiling van de meetsystemen plotselinge sprongen vertonen. Ook kunnen zich in het elektronische systeem storingen voordoen waardoor afwijkingen in de lineariteit geïntroduceerd worden. Op basis van het bovenstaande kan een mogelijke testprocedure aangegeven worden bestaande uit twee delen:

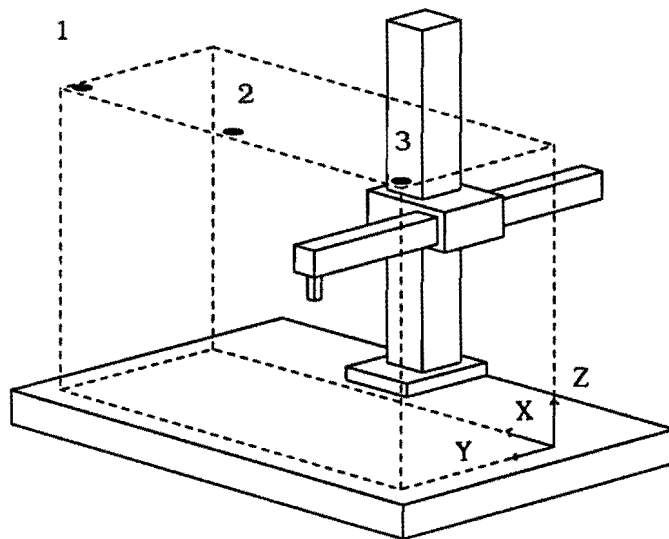
- 1) basis-testprocedure waarin de effecten van de geometrie-afwijkingen worden gemeten die het meest aan verandering onderhevig zijn, zoals haaksheid, lineariteit en tastsysteem.
- 2) uitvoerige-testprocedure waarbij naast bovengenoemde geometrie-afwijkingen ook de invloed van kantel- en rechtheidsafwijkingen wordt gemeten.

#### 4.4.1 Basis-testprocedure

De periodieke testprocedure, ter controle van het tastsysteem, de haaksheids- en lineariteitsafwijkingen, kan worden opgesplitst in drie delen:

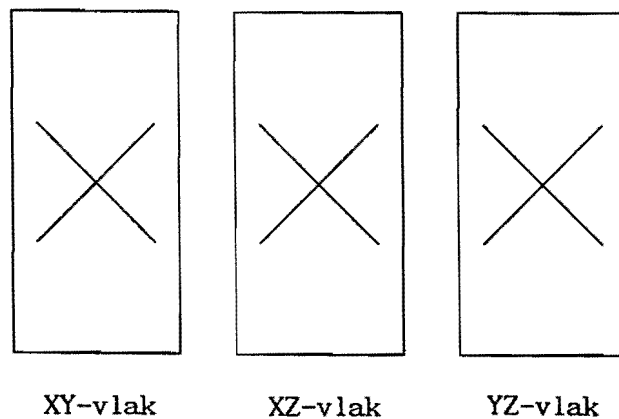
- 1) Eindmaatmetingen.
- 2) Stappeneindmaatmetingen.
- 3) Bolmetingen.

Ad 1. De eindmaatmetingen dienen uitgevoerd te worden met de grootste komparatorfout op een aantal posities langs de eerste geleiding (zie figuur 4.1). Het aantal benodigde posities is afhankelijk van de verhoudingen van de machine-afmetingen. Een voorstel is het aantal benodigde meetposities gelijk te nemen aan de verhouding van het meetbereik van de eerste geleiding tot de derde geleiding.

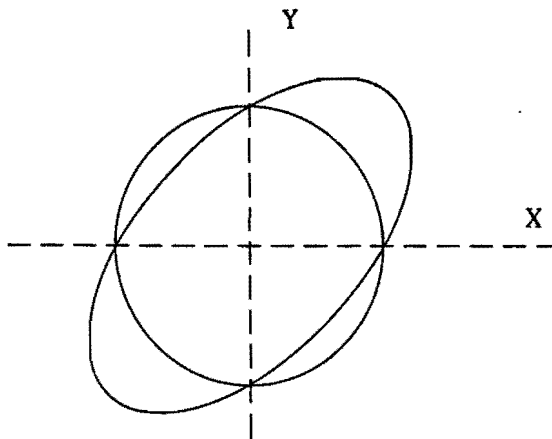


Figuur 4.1 Posities eindmaatopstelling in meetvolume.

Daar met deze metingen voornamelijk beoogd wordt de drie haaksheidsafwijkingen op te sporen, is een meting waarbij de eindmaat, in één van de drie orthogonale vlakken, onder een hoek van  $45^{\circ}$  met de betreffende coördinaatassen wordt geplaatst, het meest geschikt (zie figuur 4.2). Het effect van een haaksheidsafwijking op het verschil in de bepaalde meetlengte is in deze opstelling maximaal (KNA 83, zie figuur 4.3). Uitgaande van eerdere experimenten (TEE 86, THE 87) lijkt deze plaatsing van de eindmaat een bevredigende oplossing.

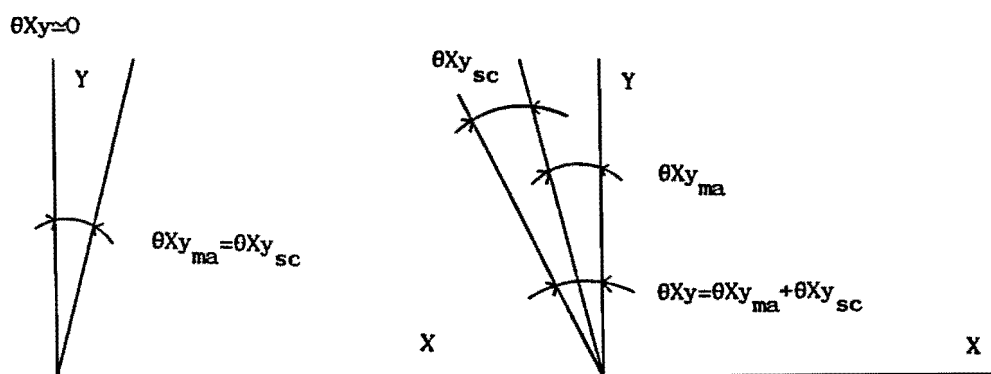


Figuur 4.2 Oriëntaties eindmaat in verschillende vlakken op één positie.



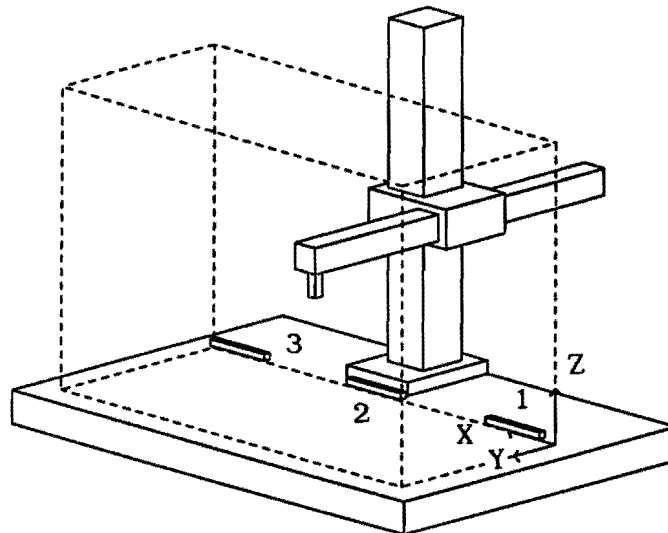
Figuur 4.3 Effect haaksheidsafwijking op de bepaling van een nominale cirkel. Hieruit blijkt dat het grootste lengteverschil optreedt bij metingen onder  $45^{\circ}$  met de coördinaatassen.

De eindmaat dient in ieder van deze lokaties software-matig te worden uitgericht alvorens de lengte bepaald kan worden. Bij machines zonder computerfaciliteiten dient deze uitrichting gesimuleerd te worden door de uitrichtpunten achteraf in een computer in te voeren, en de gemeten posities van de eindvlakken overeenkomstig te corrigeren. Met name bij machines met een software-matige correctie voor de geometrische afwijkingen is het van belang dat de haaksheid op deze manier wordt gecontroleerd, omdat de software-correctie ( $\theta_{Xy_{sc}}$ ), wanneer de materiële haaksheidsafwijking ( $\theta_{Xy_{ma}}$ ) van teken wisselt, de haaksheidsafwijking ( $\theta_{Xy}$ ) extra zal vergroten (zie figuur 4.4).



Figuur 4.4 Effect software-correctie op tekenwisseling van de haaksheidsafwijking.

Ad 2. De stappeneindmaat wordt ingezet om een steekproef te nemen van de lineariteitsafwijking. Hiertoe dient deze langs de assen bij de kleinste komparatorfout te worden opgesteld op drie posities (zie figuur 4.5). Ook hier dient de stappeneindmaat uitgericht te worden.



Figuur 4.5 Posities stappeneindmaat, voor X-geleiding, in het meetvolume.

Ad 3. Voor de controle van het tastsysteem dienen een aantal metingen aan een nauwkeurig ronde bol te worden uitgevoerd. De bol moet zo dicht mogelijk bij de geleidingen geplaatst worden om de effecten van geometrie-afwijkingen te reduceren. Om dezelfde reden moet ook de diameter van deze bol ~~moet~~ relatief klein zijn ( $\approx 20$  mm), zodat de verplaatsing van de sledes minimaal blijft. Met name bij machines die uitgerust zijn met rollagers is deze laatste eis belangrijk daar de rollen door slijtage kunnen vervormen en daarmee kantelafwijkingen veroorzaken. De bol kan 50 keer worden aangetast (VDI 83) waarna de meetgegevens, met behulp van een computerprogramma, verwerkt moeten worden tot het middelpunt van de bol, en de afstanden van de aantastpunten ten opzichte van het middelpunt. De afwijkingen van deze afstanden ten opzichte van de, nauwkeurig bekende, straal van de bol geeft een indruk van de aantastafwijkingen (VDI 83).

kerk v

Het interval, tussen de opeenvolgende basis-testprocedures, is voorlopig gesteld op:

- 3 maanden voor meetmachines uit groep 1 en de Zeiss-metemachine uit groep 2.
- 6 maanden voor de overige meetmachines uit groep 2 en de meetmachines uit groep 3.

Dit interval is gekozen op basis van gebruiksintensiteit van de meetmachine en, een schatting voor, de verwachte tijdsafhankelijkheid van de verschillende geometrie-afwijkingen. Er zijn op dit moment nog geen praktische gegevens bekend omtrent de geschiktheid van het gekozen testinterval waardoor, na enige tests, een beter voorstel kan worden gedaan en het testinterval zonodig moet worden bijgesteld.

#### 4.4.2 Uitvoerige testprocedure

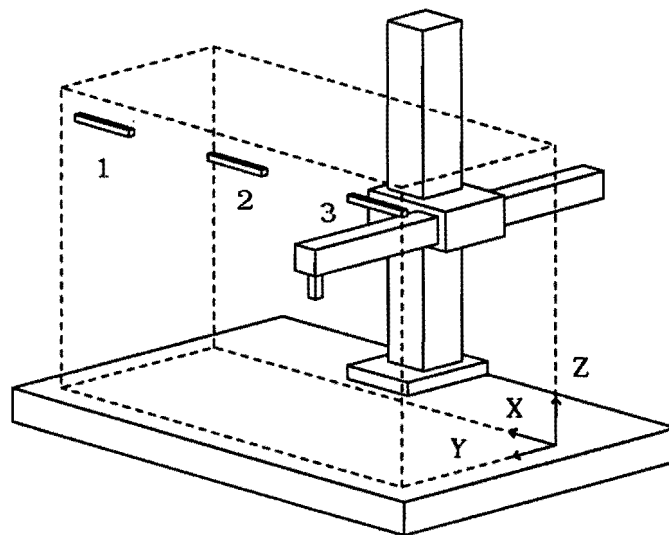
Naast de basis-testprocedure dienen de machines op gezette tijden een uitvoerige testprocedure te ondergaan om een indruk te krijgen van de, zich naar verwachting langzaam wijzigende, geometrische bronnen van afwijkingen, zoals rechtheids- en kantelafwijkingen. De onderstaande metingen kunnen worden uitgevoerd teneinde een indruk te verkrijgen van het effect van deze bronnen van afwijkingen.

- 1) de rechtheidsafwijkingen kunnen met behulp van een richtkijker worden bepaald als het machines uit groep 2 betreft. Machines uit groep 3 kunnen, in verband met hun hogere nauwkeurigheid, gemeten worden met de laserinterferometer. Voor een verdere beschrijving van deze metingen zie hfdst. 3.3.2, ad 3 en hfdst. 3.3.3, ad 3. Machines uit groep 1 behoeven deze metingen niet te ondergaan daar hiervoor software-matig wordt gecorrigeerd.

| 1  
|  
| ✓



2) de invloed van de kantelafwijkingen kan worden bepaald door metingen uit te voeren aan een stappeneindmaat bij de grootste komparatorfout (zie figuur 4.6). Hierbij dient het aantal posities dusdanig te worden gekozen dat 50% van het meetbereik kan worden bestreken. Voor machines van groep 1 kan met deze metingen worden gecontroleerd of de software-correctie voor de kantelafwijkingen adequaat is doorgevoerd.



Figuur 4.6 Posities stappeneindmaat in het meetvolume bij controle van kantelafwijkingen.

Als interval voor de uitvoerige testprocedure wordt hier iedere derde basis-testprocedure voorgesteld. Evenals bij de basis-testprocedure zijn ook hier geen praktische gegevens beschikbaar, zodat dit testinterval, na enige tijd, opnieuw bekeken en eventueel bijgesteld dient te worden.

## 5. Het programma in flow-chart vorm

### 5.1 Het hoofdprogramma

Met behulp van de hfdst 1.2 gekozen strategie, en de aangegeven test- c.q. afnameprocedures, is een computer-programma samengesteld dat een geautomatiseerde gegevensverwerking en -opslag ten aanzien van een kwaliteitsbewakingssysteem voor 3D-meetmachines mogelijk maakt.

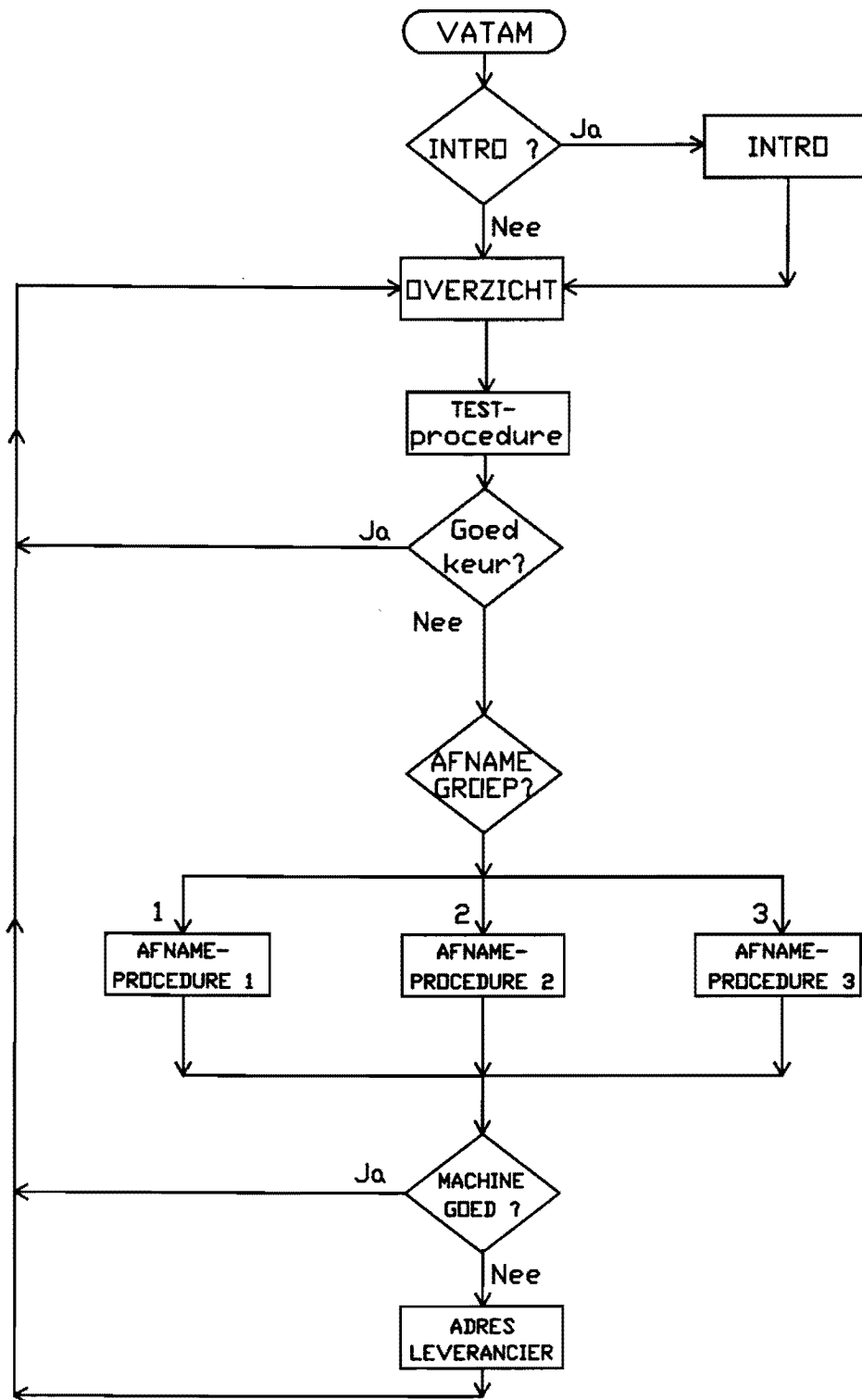
Het programma is geschreven in Turbo-Pascal en geschikt voor iedere IBM-compatible personal computer, mits een grafische kaart aanwezig is. De omvang van het programma bedraagt ruim 400 kbyte, zodat het gebruik van een hard-disk benodigd is.

Het programma bevat de voorhanden zijnde machine-informatie, de benodigde test- en afnameprocedures en de gegevensverwerking omtrent de bepaling van de maximale onnauwkeurigheid.

Verder zijn routines opgenomen die, voor iedere machine, informatie verschaffen over de datum van een benodigde test. Deze datum wordt na een test, en eventueel een afname, automatisch verhoogd met het, voor de gekozen machine geldende, testinterval. Hiermee is, op relatief eenvoudige manier, de planning voor de diverse tests te organiseren.

De structuur van het programma bestaat uit een aantal gescheiden blokken welke middels een menusturing aan elkaar gekoppeld zijn. Het in figuur 5.1 getoonde flow-chart geeft de grote lijnen aan waarlangs het programma zich beweegt. Ieder blok in ~~dit~~ *deze* flow-chart is een apart blok in het programma. Een aantal hoofdblokken uit dit hoofdflow-chart zullen hieronder nader worden toegelicht.

*med ✓*



Figuur 5.1 Hoofdprogramma in flow-chart vorm.

## 5.2 Het programmablok "Overzicht"

Dit blok uit het hoofdprogramma is in figuur 5.2 als flow-chart weergegeven. De aanwezige functies zullen hier nader omschreven worden.

### Quit:

Deze optie geeft de gebruiker de gelegenheid het programma te beëindigen en terug te keren naar het operating system.

### Overzicht machines:

Hier volgt een overzicht met de aanwezige 3D-meetmachines, inclusief machinenummer en testinterval.

### Toevoegen machines:

Dit blok verzorgt, via een grafische presentatie, het opzetten van de ketting van vectoren. Tevens wordt de betreffende afwijkingentabel bepaald. De karakteristieke eigenschappen worden daarna opgeslagen in een database.

### Testen machines:

Na het aanroepen van dit blok springt het programma naar een ander blok waar de testprocedure voor de gekozen machine is opgeslagen. Levert de test een afkeur-oordeel op, dan volgt automatisch de betreffende afnameprocedure.

### Veranderen machinegegevens:

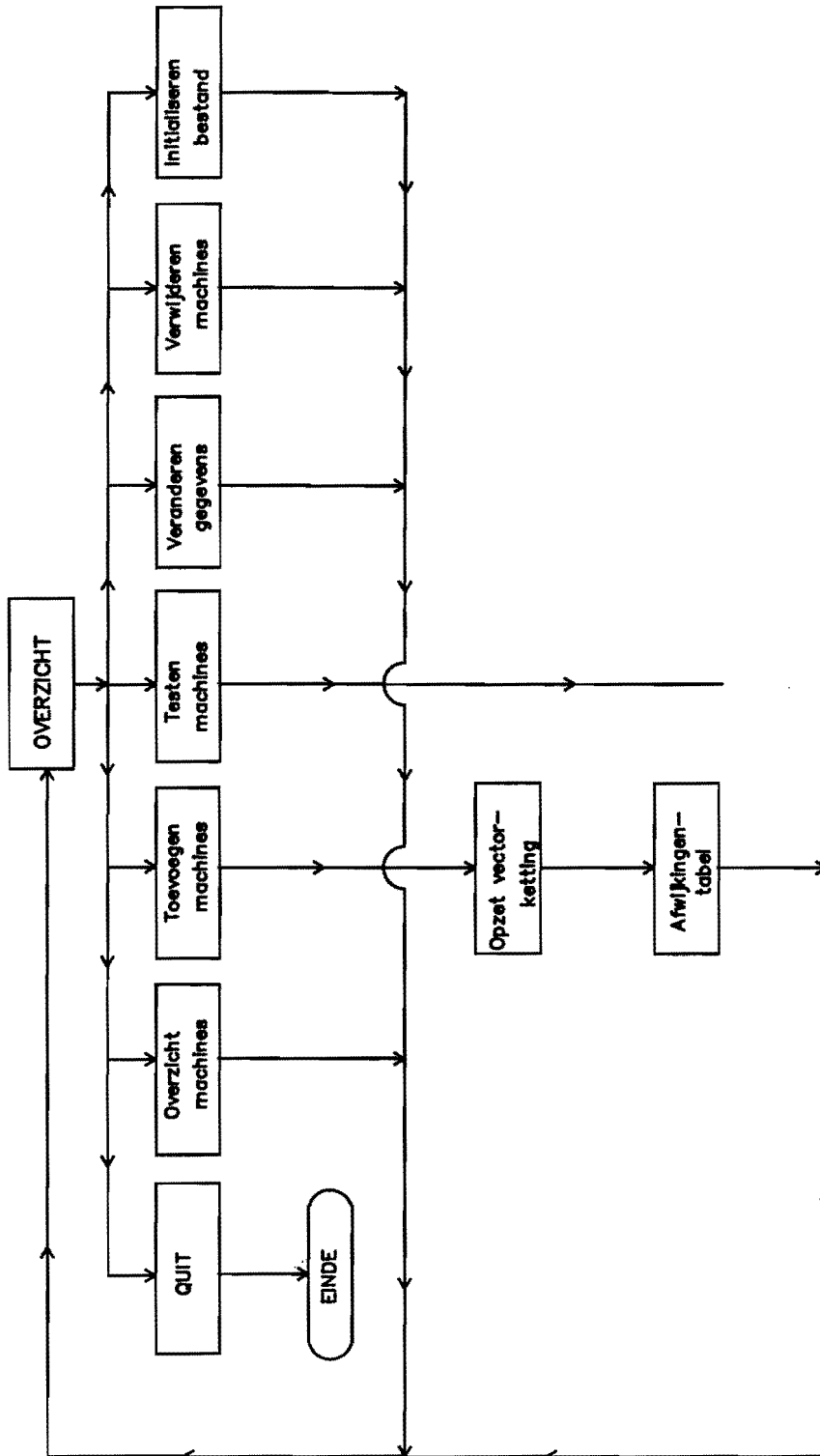
Met behulp van dit programmablok kunnen gegevens zoals merk, type, nummer, meetbereiken, testinterval en testdatum kunnen worden aangepast.

### Verwijderen machines:

Dit blok biedt de gebruiker de mogelijkheid een bepaalde machine uit het bestand te verwijderen wanneer deze niet meer als meetmachine wordt ingezet.

Initialiseren machinebestand:

Hiermee kan de database geïntialiseerd worden zodat een nieuw machinepark kan worden ingevoerd.



Figuur 5.2 Programmablok "Overzicht" in flow-chart vorm.

### 5.3 Het programmablok "Afnameprocedure 1"

In figuur 5.3 is, voor de afnameprocedure van groep 1, het flow-chart gegeven. Onderstaand zullen de aanwezige blokken in dit flow-chart nader worden toegelicht.

#### Eindmaatmeting invoeren:

In dit blok kunnen metingen van een eindmaat worden ingevoerd, waarbij zaken als temperatuurscorrectie, gemiddelde afwijking en standaardafwijking hiervan, door het programma worden bepaald.

#### Eindmaatmeting uitprinten:

Hiermee worden meetgegevens en daaruit afgeleide grootheden, zoals hierboven aangegeven zijn, op papier gezet.

#### Grafiek eindmaatmetingen:

Dit blok geeft een grafische presentatie van alle eindmaatmetingen met de gemiddelde afwijking en de 2S-waarde. Tevens worden de specificatiegrenzen getoond zodat eenvoudig vast te stellen is of de machine buiten zijn specificaties ligt.

#### Lineariteitsmeting ingeven:

Met behulp van dit blok kan een positie-meting, uitgevoerd met de laserinterferometer, worden ingevoerd waarna een grafische presentatie van de meetgegevens volgt.

#### Meting oproepen:

Een reeds eerder ingevoerde meting kan, met behulp van een nummer dat iedere positie van de eindmaat in het meetvolume bezit, worden opgeroepen.

#### Metingen buiten specificaties:

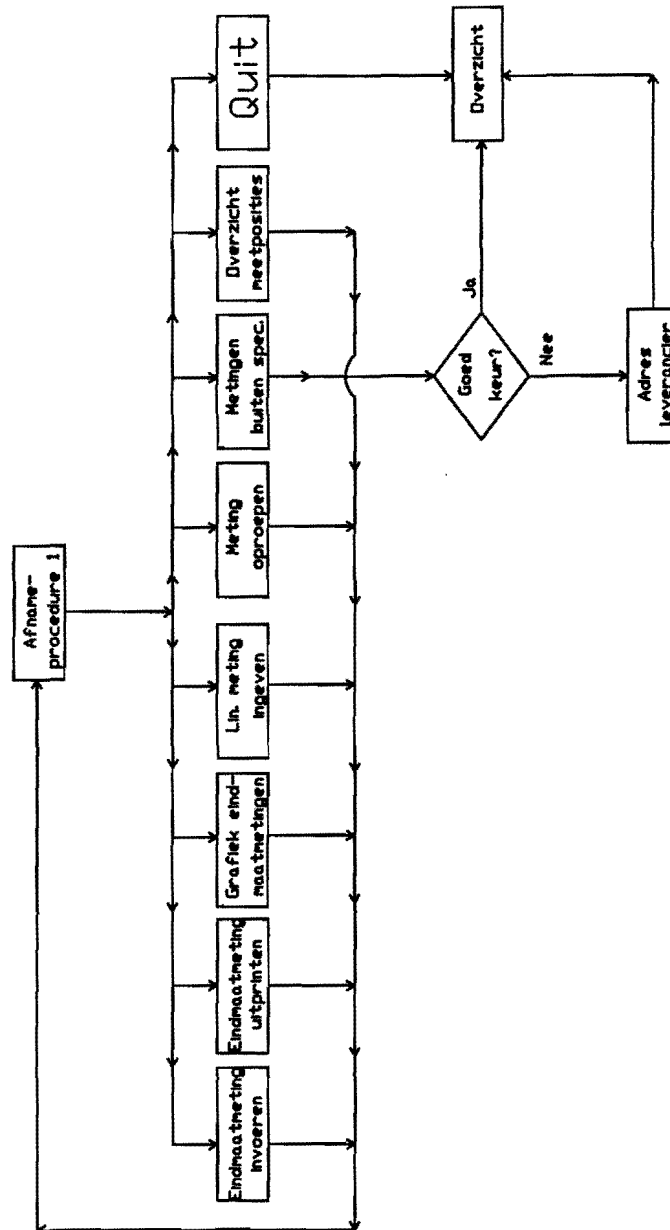
Dit blok bepaald, zowel voor de laser als voor de eindmaat, of de metingen buiten de, door de fabrikant gegeven, specificaties ligt. Hierbij wordt ook aangegeven in welk deel van het meetvolume dit gebeurt. Wordt de machine afgekeurd dan volgt een volledig adres van de leverancier. Hierna, of bij goedkeur, springt het programma naar het overzicht van alle machines.

Overzicht meetposities:

Hierin worden de meetposities van de eindmaat, met de bijbehorende positiENUMMERING, in het meetvolume grafisch weergegeven zodat de controle eenduidig vastligt.

Quit:

Deze optie biedt de mogelijkheid vroegtijdig terug te keren naar het overzicht van alle machines.



Figuur 5.3 Programmablok "Afnameprocedure 1" in flow-chart vorm.

#### 5.4 Het programmablok "Afnameprocedure 2 en 3"

In figuur 5.4 is voor de afnameprocedure van groep 2 en groep 3 ~~het~~ flow-chart gegeven. De afnameprocedures voor de groepen 2 (Stiefelmayer, Zeiss en Mora) en 3 (Mitutoyo) vertonen veel overeenkomst in opzet en structuur daar bij deze machines is uitgegaan van het in hfdst 3.1 beschreven model. Slechts op enkele punten wijken deze afnameprocedures uit elkaar, met name bij de invulling van de afnameposities, de meetmiddelen en de berekening van de maximale afwijking.

~~Het~~ flow-chart zoals gegeven in figuur 5.4 is een representatie van beide afnameprocedures waarbij alleen de invulling van sommige blokken verschilt. Onderstaand zullen de aanwezige blokken in ~~dit~~ flow-chart nader worden toegelicht.

##### Print afnameprocedure:

Dit blok geeft de posities van de benodigde metingen, alsmede de te gebruiken meetinstrumenten, op overzichtelijke wijze weer.

##### Start afname:

Dit blok zorgt voor de verwerking van de meetgegevens, die verkregen zijn middels de aangegeven afnameprocedure.

Achtereenvolgens wordt een rapporthoofd gegenereerd, een machinemodel met bijbehorende afwijkingentabel gegeven, de meetgegevens gevraagd en verwerkt tot een schatting van de maximale afwijking. Hierbij is de berekeningswijze afhankelijk van de gekozen machine. Wordt de machine op basis van deze schatting afgekeurd, dan voorziet het programma in het adres van de leverancier van de betreffende machine.

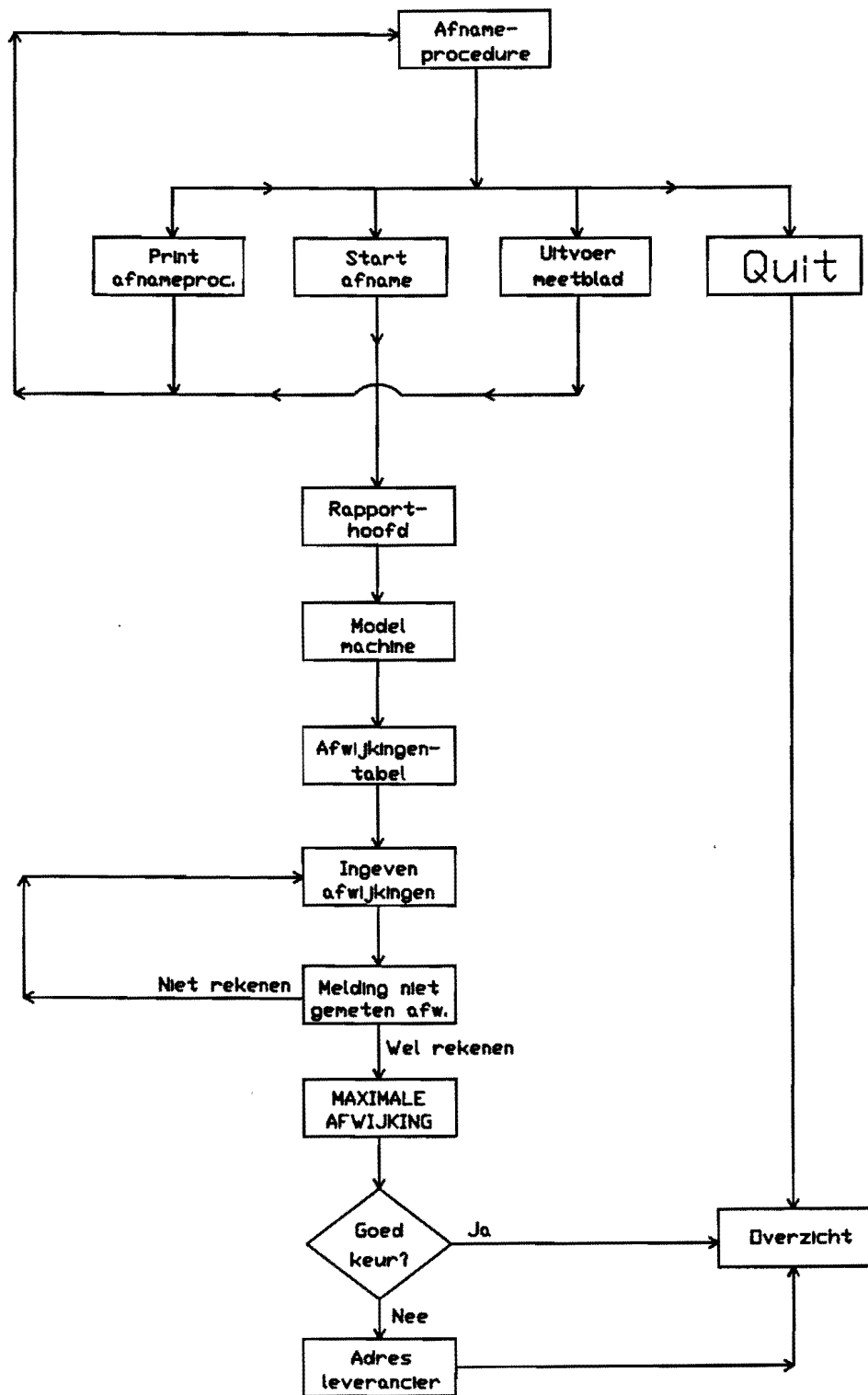
##### Uitvoer meetblad:

Met behulp van dit blok wordt een standaard meetblad afgedrukt waarin de meetgegevens, die d.m.v. een afname moeten worden bepaald, overzichtelijk kunnen worden genoteerd.

##### Quit:

Deze optie zorgt voor een mogelijke sprong naar het programmablok dat het overzicht van alle machines genereert.





Figuur 5.4 Programmablokken "Afnameprocedure 2" en "Afnameprocedure 3" in flow-chart vorm.

In de bovenstaande paragrafen is een beknopte beschrijving  
gegeven van de op dit moment aanwezige software. Een uitgebreide  
beschrijving van het programma, met daarbij een  
bedieningsvoorschrift, zal binnenkort volgen en verschijnen als  
intern rapport (WPA).

## 6. Conclusies en aanbevelingen

In dit laatste hoofdstuk zullen enige conclusies gegeven worden betreffende het uitgevoerde projekt. Tot slot zullen nog een aantal aanbevelingen worden gedaan die mogelijk in de nabije toekomst kunnen worden uitgevoerd.

In dit projekt is een opzet gemaakt van een kwaliteitsbewakingssysteem voor 3D-meetmachines. Aan de hand van de modelvorming zijn afname- en testprocedures ontwikkeld die daarna aan representatieve meetmachines getoetst zijn. Hieruit is een software-pakket ontwikkeld dat de test- en afnameprocedures voor iedere specifieke meetmachine aangeeft en de gegevensverwerking, in het bijzonder een schatting van de maximale afwijking, uitvoert. Tevens wordt de administratie, betreffende het tijdstip van een test c.q. afname, door de software uitgevoerd.

De testprocedures zijn dusdanig ingericht dat deze door Volvo in eigen beheer kunnen worden uitgevoerd. De informatie omtrent positie en oriëntatie van de testobjecten is reeds aanwezig, de in de testprocedures genoemde programmatuur, ter bepaling van de tasterafwijkingen uit de bolmeting en het rekentechnisch uitrichten van de eindmaat bij machines zonder computer-faciliteiten, dient nog ontwikkeld te worden.

Ten behoeve van een geschikte afnameprocedure zijn alle aanwezige 3D-meetmachines ingedeeld in 3 groepen. Voor de uitvoering van deze afnameprocedures zal nog enige tijd gebruik moeten worden gemaakt van het instrumentarium en expertise van de T.U. Eindhoven. Het software-pakket voorziet in een volledige aanduiding en verwerking van de benodigde metingen waarbij rekening gehouden wordt met de groep waarin de machine zich bevindt.

### Aanbevelingen

Daar op het moment onderzoek gaande is naar de mogelijkheden van testprocedures heeft het de voorkeur om, op het moment waarop concrete resultaten beschikbaar komen, de bestaande testprocedures te herzien en eventueel aan te passen.

De berekening van de afwijking bij een afname bevat op dit moment een maximale schatting van de onnauwkeurigheid. Er dient gestreeft te worden naar een schatting, op een aantal rasterkooppunten in het meetvolume, van de absolute afwijking. Hiermee kunnen gradaties in de onnauwkeurigheid van de meetmachine in het meetvolume worden aangegeven. Met behulp hiervan kan een testprocedure zich nader toespitsen op bepaalde gebieden.

Het aanwezige computerprogramma is niet beveiligd tegen oneigenlijk gebruik. Wellicht kan in dit in de toekomst aangepast worden om zo de gebruikersvriendelijkheid te verhogen.

Het verdient aanbeveling de bewaking van alle, binnen het bedrijf verspreid aanwezige, 3D-meetmachines te centraliseren zodat een doelmatig beleid ten aanzien van kwaliteitsbewaking, onderhoud en eventueel aanschaf mogelijk is. Op deze wijze kunnen ook de contacten met de T.U. Eindhoven gemakkelijker verlopen.

Gezien de resultaten behaald bij dit projekt, lijkt een studie naar een vergelijkbare opzet voor de binnen Volvo aanwezige produktiemachines en robots aan te bevelen.

## Literatuur

- BCR 85      BCR information, The intercomparison of three-dimensional measurements taken from coördinate measuring machines, Glasgow (1985).
- BRY 82      J.B. Bryan, A simple method for testing measuring machines and machine tools, Precision Engineering 4, 61 (1982)
- HAB 58      K.J. Habell, A. Cox, Engineering Optics, Sir Isaac Pitman & Sons, London (1958).
- HP 84        HP Company, Laser Measurement System, User's guide Santa Clara (1984).
- KNA 83      W. Knapp, Circular tests for three coördinate measuring machines and machine tools, Precision Engineering 5, 115 (1983)
- LEI 54      P. Leinweber, Taschenbuch der Längenmeßtechnik, Springer Verlag Berlin (1954).
- NIJ 87      J.F.C de Nijs, Modelling van een 3D-meetmachine, type portaalconstructie, t.b.v. de bepaling van het dynamische gedrag, intern rapport TU Eindhoven W. WPA 0428 (1987).
- SCA 67      A.J.T. Scarr, Metrology and Precision Engineering, McGraw-Hill, London (1967).
- SCH 85      H. Schüßler, Meßtechnische beurteilung von prüfkörpern und koordinatenmeßgeräten anhand von streckenmessungen, rechteck- und quader-kennwerten, Technisches Messen 10, 353 (1985)

- SCHE 86 P.H.J. Schellekens, Absolute meetnauwkeurigheid van technische laserinterferometers, dissertatie TU Eindhoven (1986)
- SCH 87 Schut, Atlas der Geometrische Meettechniek, Schut, Groningen 1987.
- SOO 88 J.A. Soons, titel onbekend, verschijnt januari 1988, intern rapport TU Eindhoven (1988)
- TAY 84 Taylor Hobson, Optical alignment, Belvoir Offset Ltd, Leicester (1984).
- TEE 86 J.W.M.C. Teeuwsen, Afnamerapport van de BRAVO 4207 measuring robot bij Volvo Car Born, intern rapport TU Eindhoven W, WPA 0260 (1986).
- THE 86 F.C. Theuws, Computermodellering van de foutenstructuur van 3D-meetmachines, intern rapport TU Eindhoven W, WPA 0355 (1986).
- THE 87 F.C. Theuws, Afname DEA Bravo 4207 meetrobot bij Volvo Car BV te Born, intern rapport TU Eindhoven W, WPA 0432 (1987).
- VDI 83 Verein Deutsche Ingenieure, Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten, VDI 2617 (1983).

## Inhoud appendices

<u>Appendix A</u> Een model van een 3D-meetmachine	70
A.1 Inleiding	70
A.2 De geometrische bronnen van afwijkingen	73
A.3 De afwijkingen-analyse	76
A.3.1 Verplaatsings-afwijkingen	76
A.3.2 Draaiings-afwijkingen	77
A.3.3 Haaksheids-afwijkingen	79
A.1.4 De totale meetafwijking	81
<u>Appendix B</u> Posities trillingsmetingen en een meetresultaat	85
<u>Appendix C</u> Werkingsprincipes meetinstrumenten	86
C.1 Positie-afwijkingen	86
C.2 Rechtheids-afwijkingen	87
C.3 Kantel-afwijkingen	90
<u>Appendix D</u> Meetposities eindmaat bij DEA-meetmachines	93
<u>Appendix E</u> Invloed steunpuntsafstand op eindmaat	95
<u>Appendix F</u> Opstellingsschetsen voor afname Stiefelmayer-, Mora- en Zeiss-meetmachines	96
F.1 Positie-afwijkingen	96
F.2 Kantel-afwijkingen	97
F.3 Rechtheids-afwijkingen	99
F.4 Rotatie-afwijkingen	101
<u>Appendix G</u> Opstellingsschetsen voor afname Mitutoyo-meetmachine	102
G.1 Positie-afwijkingen	102
G.2 Kantel-afwijkingen	104
G.3 Rechtheids-afwijkingen	105
G.4 Rotatie-afwijkingen	107
<u>Appendix H</u> Voorbeelden afwijkingentabel voor groep 2 en 3	109

Appendix A Een model van een 3D-meetmachineA.1 Inleiding

In het algemeen kunnen 3D-meetmachines met een stilstaande meettafel voorgesteld worden door een ketting van vectoren (THE 86). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen geleidingsvectoren, verbindingsvectoren en een tastervector. Een geleidingsvector geeft de positie van de geleiding aan ten opzichte van het beginpunt van de geleiding, een verbindingsvector geeft de afstand en richting aan van de verbinding tussen twee geleidingen en tenslotte geeft de tastervector aan waar de taster zich bevindt ten opzichte van het eindpunt van de derde geleiding. Elke machine is weer te geven in 7 vectoren te weten: 3 geleidingsvectoren ( $\underline{A}_u, \underline{A}_v, \underline{A}_w$ ), 3 verbindingsvectoren ( $\underline{A}_{ou}, \underline{A}_{uv}, \underline{A}_{vw}$ ) en 1 tastervector ( $\underline{A}_t$ ). Samen vormen deze 7 vectoren (tabel A.1) de ideale meetvector  $\underline{A}_{mi}$  (figuur A.1), waarvoor geldt:

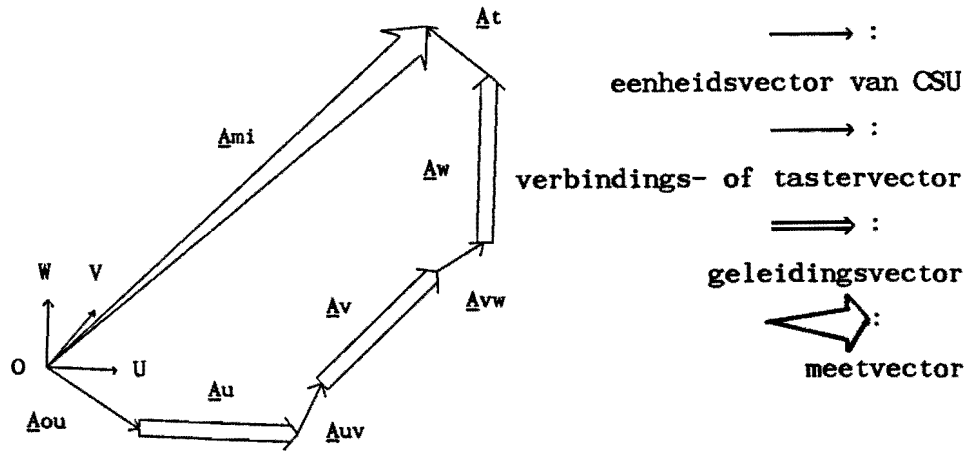
$$\underline{A}_{mi} = \underline{A}_{ou} + \underline{A}_u + \underline{A}_{uv} + \underline{A}_v + \underline{A}_{vw} + \underline{A}_w + \underline{A}_t \quad (\text{A.1})$$

$\underline{A}_{mi}$  ligt in het orthogonale coördinatensysteem UVW (CSU) en geeft het ideale geval weer, waarbij geen geometrische afwijkingen in de geleidingen van de meetmachine voorkomen. Om de abstracte weergave van de vectorenketting in figuur A.1 te verduidelijken is in figuur A.2 een C-type 3DM weergegeven met de daarbijbehorende ketting van vectoren. Uit vergelijking A.1 en tabel A.1 volgt:

$$\underline{A}_{mi} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

ongeacht de waarden die de componenten van de verbindingsvectoren en de tastervector bezitten.





**Figuur A.1** Abstracte weergave van een 3DM zonder geometrische bronnen van afwijkingen.

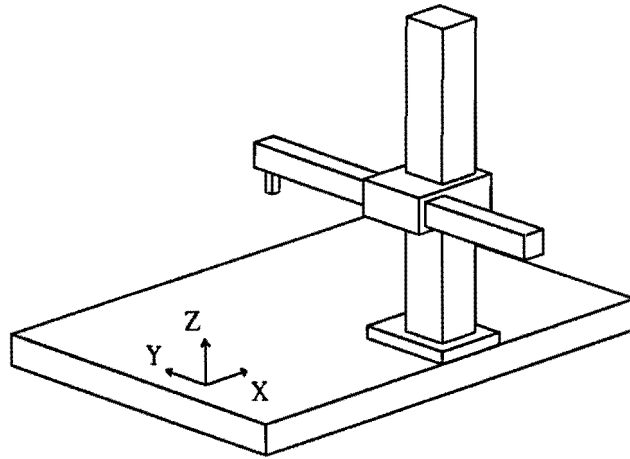
<u>Vector type</u>	<u>Mathematische beschrijving</u>
Geleiding	$\underline{A}u = \begin{bmatrix} U-U_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\underline{A}v = \begin{bmatrix} 0 \\ V-V_t \\ 0 \end{bmatrix}$ $\underline{A}w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W-W_t \end{bmatrix}$
Verbinding	$\underline{A}ou = \begin{bmatrix} -U_{uv}-U_{vw} \\ -U_{uv}-V_{vw} \\ -V_{uv}-W_{vw} \end{bmatrix}$ $\underline{A}uv = \begin{bmatrix} U_{uv} \\ V_{uv} \\ W_{uv} \end{bmatrix}$ $\underline{A}vw = \begin{bmatrix} U_{vw} \\ V_{vw} \\ W_{vw} \end{bmatrix}$
Taster	$\underline{A}t = \begin{bmatrix} U_t \\ V_t \\ W_t \end{bmatrix}$

**Tabel A.1** De 7 vectoren die tezamen de kinematische ketting van vectoren vormen.

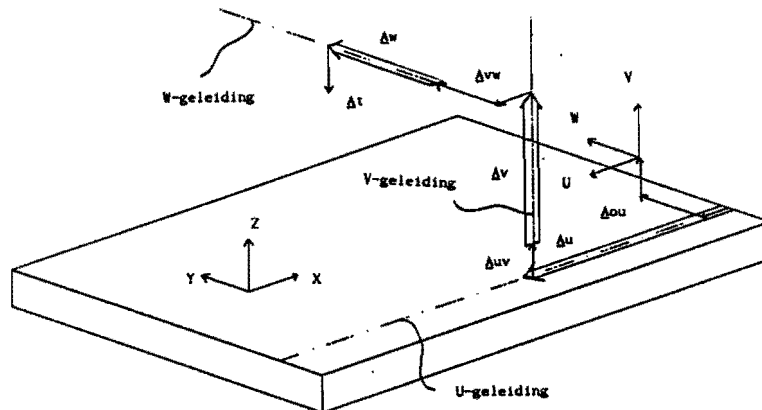
Het CSU-nulpunt wordt gedefiniëerd als dat punt waarvoor geldt:

$$\begin{aligned}
 U = V = W = 0 \\
 \underline{A}t = 0
 \end{aligned}
 \tag{A.3}$$

De verbindingsvector  $\underline{\Delta ou}$  bepaalt de ligging van het startpunt van de eerste geleidingsvector ten opzichte van het CSU-nulpunt. Dit startpunt ligt op de u-geleidings-as en is vrij te kiezen. Na de keuze van dit startpunt is dit evenals het CSU-nulpunt een vast punt in de ruimte. Het startpunt wordt zodanig gekozen dat het dezelfde u-component heeft als het machine-nulpunt, dat door de fabrikant is vastgelegd.



Figuur A.2.a Configuratie van een C-type 3DM.



Figuur A.2.b De schematische weergave van de kinematische ketting van vectoren voor de C-type 3DM van fig A.2.a voor  $\underline{\Delta t} \neq 0$ .

De verbindingsvectoren  $\underline{A}_{uv}$  en  $\underline{A}_{vw}$  zijn constante vectoren, die bepaald worden door de configuratie van de meetmachine. Ook de tastervector  $\underline{A}_t$  is een constante vector die bepaald wordt door de gebruikte taster tijdens de metingen met de 3DM. De geleidingsvectoren  $\underline{A}_u$ ,  $\underline{A}_v$  en  $\underline{A}_w$  zijn variabel en afhankelijk van de positie van de geleidingen. Het meetvolume van de meetmachine wordt bepaald door de bereiken van de u-, v- en w-geleiding. Ieder punt in dit meetvolume wordt, bij gebruik van een bepaalde taster, eenduidig weergegeven door een bepaalde combinatie van geleidingsvectoren.

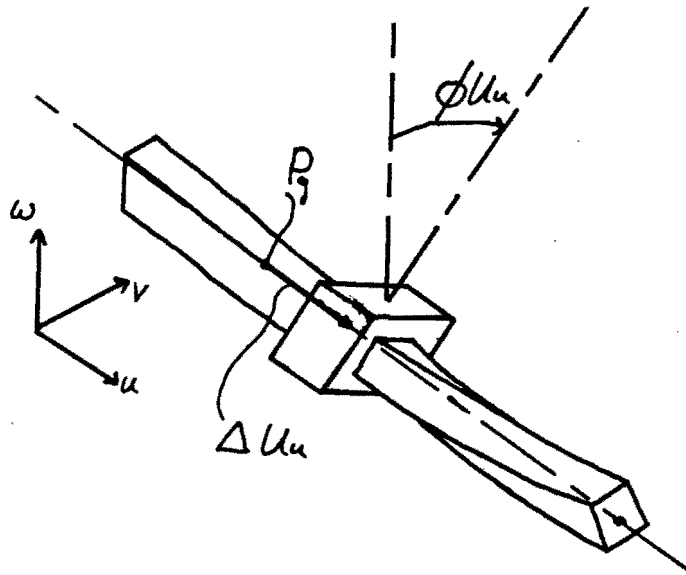
### A.2 De geometrische bronnen van afwijkingen

In principe wordt de plaats en stand van een object in de ruimte bepaald door 6 vrijheidsgraden, namelijk 3 translaties en 3 rotaties. Vanuit dit oogpunt heeft een geleiding 6 mogelijke bronnen van afwijkingen waardoor de slede op een andere positie of in een andere stand kan staan dan gewenst is. Per geleiding zijn dit 3 verplaatsings-afwijkingen:  $\Delta U_i$ ,  $\Delta V_i$  en  $\Delta W_i$  en 3 draaiings-afwijkingen:  $\phi U_i$ ,  $\phi V_i$  en  $\phi W_i$ , met  $i = u, v$  of  $w$ . In tabel A.2 wordt de gehanteerde afwijkingensymboliek verklaard. De translatie-afwijking van een geleiding in de bewegingsrichting van de betreffende geleiding heet de lineariteitsafwijking. In figuur A.3.a wordt als voorbeeld voor de u-geleiding de lineariteitsafwijking  $\Delta U_u$  aangegeven.

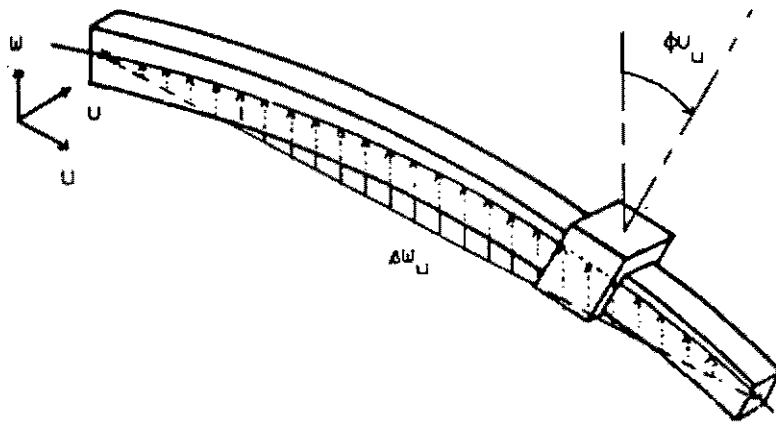
1 <sup>ste</sup> Symbool	2 <sup>de</sup> Symbool	Index
Bron van afwijking	Bepaling van afwijking	Geleiding
$\Delta$ : verplaatsing	U, V, W : verplaatsingsrichting	u, v, w
$\phi$ : draaiing	U, V, W : draaiing-as	u, v, w
$\theta$ : haaksheid	U, V : referentie-as	v, w

Tabel A.2 De symboliek voor de geometrische bronnen van afwijkingen.

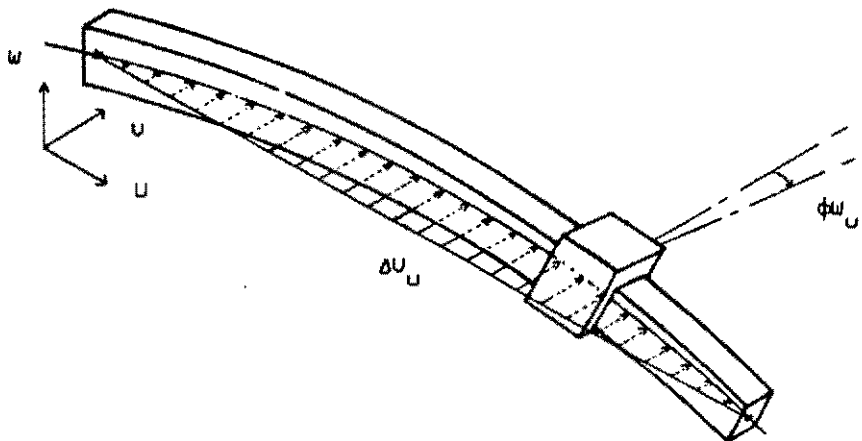
De translatie-afwijkingen van een geleiding in de richting van een van de andere twee geleidingen zijn de rechtheids-afwijkingen van de desbetreffende geleiding. In figuur A.3.b&c wordt de rechtheids-afwijking van de u-geleiding in de richting van de w-geleiding, oftewel de  $\Delta W_u$ -afwijking, en de rechtheids-afwijking in de richting van de v-geleiding, dus de  $\Delta V_u$ -afwijking aangegeven. Bij de draaiings-afwijkingen is de rotatie-afwijking die afwijking waarbij de geleiding om zijn eigen as roteert (fig.A.3.a,  $\phi U_u$ ). Vervolgens zijn er nog twee draaiingen van een geleiding om een van de andere twee geleidingen aan te geven, de zogenaamde kantel-afwijkingen van een geleiding (fig.A.3.b&c,  $\phi V_u$  en  $\phi W_u$ ). Een 3DM bezit 3 geleidingen waardoor er nog 3 haaksheids-afwijkingen  $\theta U_v$ ,  $\theta U_w$  en  $\theta V_w$  gedefiniëerd moeten worden. Dit omdat de 3 geleidingen nooit exact haaks staan, d.w.z. geen orthogonaal stelsel vormen. In het totaal zijn er in een 3DM dus  $3 \times 6 + 3 = 21$  mogelijke geometrische bronnen van afwijkingen.



Figuur A.3.a Schematische weergave van de lineariteitsafwijking ( $\Delta U_u$ ) en de rotatie-afwijking ( $\phi U_u$ ) van de u-geleiding.



Figuur A.3.b Schematische weergave van de rechtheids-afwijking  $\Delta w_u$  en de kantel-afwijking  $\phi_u$  van de u-geleiding.



Figuur A.3.c Schematische weergave van de rechtheids-afwijking  $\Delta U_u$  en de kantel-afwijking  $\phi_w u$  van de u-geleiding.

### A.3 De afwijkingen-analyse

In deze paragraaf blijkt ten eerste dat alle soorten van afwijkingen, die veroorzaakt worden door de geometrische bronnen van afwijkingen, te vertalen zijn naar afwijkings-vectoren en -matrices in het CSU. Ten tweede blijkt dat de waargenomen meetvector ( $\underline{Amw}$ ) gelijk is aan de ketting van vectoren, die de ideale meetvector ( $\underline{Ami}$ ) vormt, waaraan deze afwijkings-vectoren en -matrices op een juiste wijze zijn toegevoegd.

Bron van afw.	Geleiding	Afwijkings-vector/matrix
Verplaatsing	u, v, w	$\underline{\Delta Au} = \begin{bmatrix} \Delta Uu \\ \Delta Vu \\ \Delta Wu \end{bmatrix}$ $\underline{\Delta Av} = \begin{bmatrix} \Delta Uv \\ \Delta Vv \\ \Delta Wv \end{bmatrix}$ $\underline{\Delta Aw} = \begin{bmatrix} \Delta Uw \\ \Delta Vw \\ \Delta Ww \end{bmatrix}$
Draaiing	u, v, w	$\phi_i = \begin{bmatrix} 1 & -\phi W_i & \phi V_i \\ \phi W_i & 1 & -\phi U_i \\ -\phi V_i & \phi U_i & 1 \end{bmatrix}$ $i = u, v \text{ of } w$
Haaksheid	v, w	$\underline{Av} = - \begin{bmatrix} V^* Uv \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\underline{Aw} = - \begin{bmatrix} W^* Uw \\ W^* Vw \\ 0 \end{bmatrix}$

Tabel A.3 Mathematische beschrijving van de afwijkings-vectoren en -matrices.

#### A.3.1 Verplaatsings-afwijkingen

Verplaatsings-afwijkingen van een geleiding worden één op één doorgegeven naar de taster. Deze afwijkingen worden dan ook gecorrigeerd door aan de u-, v- en w-geleidingsvector respectievelijk de afwijkings-vectoren  $\underline{Au}$ ,  $\underline{Av}$  en  $\underline{Aw}$  toe te voegen (tabel A.3). De component van de afwijkings-vectoren parallel aan de geleidings-vector is de lineariteitsafwijking, terwijl de andere twee componenten de rechtheidsafwijkingen aangeven.

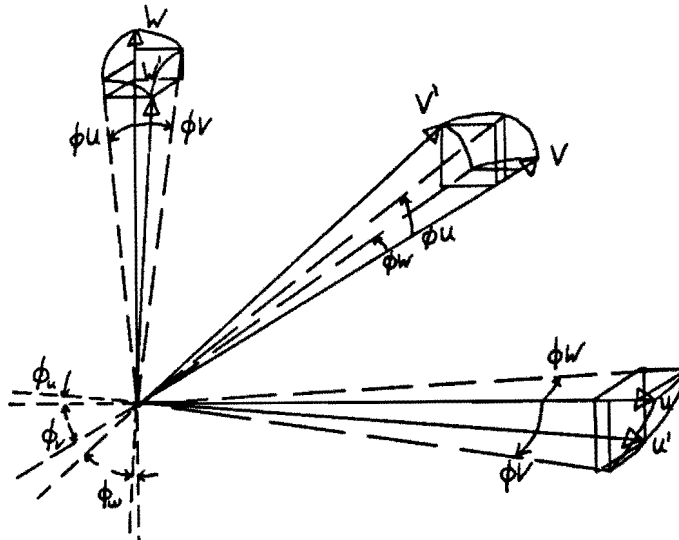
### A.3.2 Draaiings-afwijkingen

De afwijkingen die ontstaan door draaiingen worden d.m.v. de drie draaiings-afwijking-matrices  $\phi_u$ ,  $\phi_v$  en  $\phi_w$  verdisconteerd. Beschouw hiertoe twee orthogonale coördinatensystemen  $CSU$  en  $CSU'$ , waarbij  $CSU'$  t.o.v.  $CSU$  om  $\phi_u$ ,  $\phi_v$  en  $\phi_w$  gedraaid is (figuur A.4). Daar de grootte-orde van de hoekverdraaiingen boogsecondes zijn, geldt:

$$\cos\phi_i = 1$$

$$\sin\phi_i = \phi_i \quad (A.4)$$

$$\tan\phi_i = \phi_i$$



Figuur A.4 Het coördinatensysteem  $CSU'$  dat t.o.v.  $CSU$  gedraaid is. De hoeken tussen respectievelijk U- en U'-as, V- en V'-as en W- en W'-as zijn  $\phi_u$ ,  $\phi_v$  en  $\phi_w$ . D is het draaipunt.

De transformatie van  $\underline{CSU}$  naar  $\underline{CSU}'$  wordt, met behulp van vergelijking A.4, in matrixvorm gegeven door:

$$\underline{U}' = \begin{bmatrix} 1 & -\phi W & \phi V \\ \phi W & 1 & \phi U \\ -\phi V & \phi U & 1 \end{bmatrix} * \underline{U} = \Phi * \underline{U} \quad (\text{A.5})$$

met :

$$\underline{U}' = \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix}, \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

De verplaatsings-afwijking ( $\Delta \underline{Ud}$ ) tengevolge van de draaiingen is afhankelijk van de gedraaide hoeken en van de armen waarop die hoeken werken, hiervoor geldt:

$$\Delta \underline{Ud} = \underline{U}' - \underline{U} = [\Phi - I] * \underline{U} \quad (\text{A.7})$$

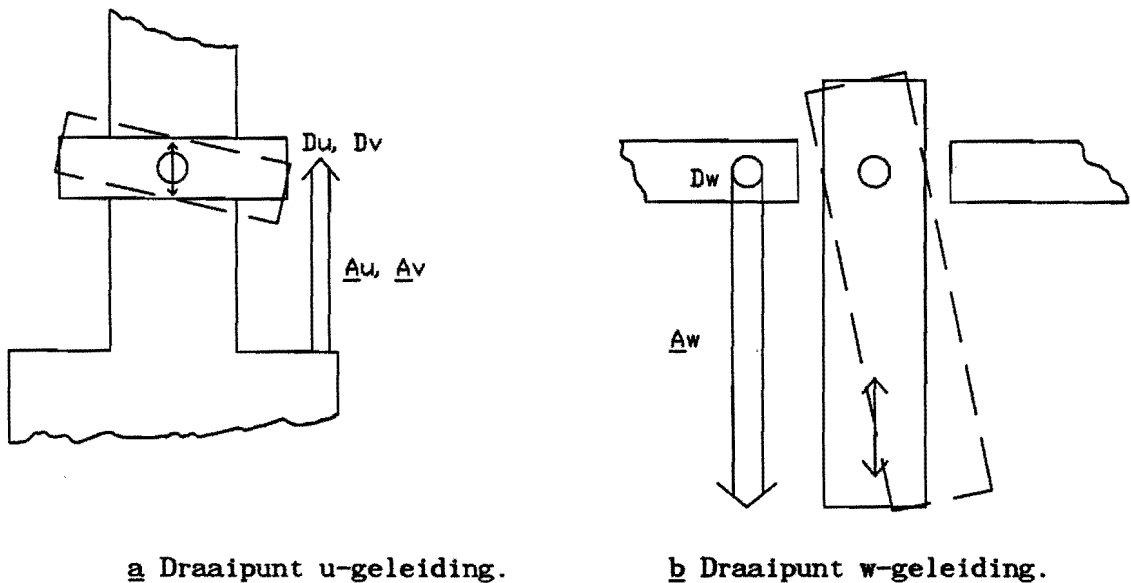
Afhankelijk van de plaats van het draaipunt in de kinematische ketting kunnen zo meerdere afwijkings-vectoren opgesteld worden. De draaipunten  $D_u$ ,  $D_v$  en  $D_w$  van respectievelijk de u-, v- en w-geleiding bevinden zich op:

- het eindpunt van respectievelijk de u- en v-geleidingsvector voor  $D_u$  en  $D_v$ .
- het beginpunt van de w-geleidingsvector voor  $D_w$ .

Dit verschil in plaats tussen  $D_u$ ,  $D_v$  en  $D_w$  volgt uit de configuratie van de geleidingen, dit is in figuur A.5 schematisch weergegeven. Voor de u- en v-geleiding geldt dat het draaipunt zich verplaatst met de geleidingsvector. Dit heeft tot gevolg dat de bij de geleiding behorende draaiings-afwijking-matrix de geleidingsvector niet draait. De w-geleidingsvector wordt daarentegen wel gedraaid door de draaiings-afwijking-matrix, daar het draaipunt zich niet met de geleidingsvector mee verplaatst. Draaiings-afwijking-matrices zijn altijd werkzaam op vectoren die ten opzichte van het betreffende draaipunt in rangorde hoger liggen in de kinematische ketting.



De draaiings-afwijking-matrices zijn commutatief, d.w.z. dat de totale afwijkingvector ten gevolge van draaiingen van de drie geleidingen gelijk is aan de som van de draaiings-afwijkingen van de 3 geleidingen afzonderlijk. Oftewel, de totale afwijkingvector in een bepaald punt in het meetvolume, is onafhankelijk van de gevolgde weg naar dit punt.



a Draaipunt u-geleiding.

b Draaipunt w-geleiding.

Figuur A.5 De ligging van de draaipunten.

### A.3.3 Haaksheids-afwijkingen

Haaksheids-afwijkingen worden in rekening gebracht door aan de v- en w-geleidingsvectoren respectievelijk de haaksheids-afwijking-vectoren  $\theta_{Av}$  en  $\theta_{Aw}$  (tabel A.3) toe te voegen. Beschouw hiertoe het orthonormale stelsel  $CSU$  en het niet orthonormale stelsel  $CSU''$  (figuur A.6). Per definitie wordt nu het  $CSU''$  t.o.v. het  $CSU$  zodanig genomen dat de  $U''$ - en  $U$ -as en het  $U''V''$ -en  $UV$ -vlak samenvallen. Analoog aan de in de literatuur gangbare haaksheidshoek definitie, wordt ook hier de hoek positief genomen als de hoek tussen de geleidingen groter is dan 90 graden.

Met behulp van vergelijking A.4 volgt voor de transformatie van  $CSU$  naar  $CSU''$ :

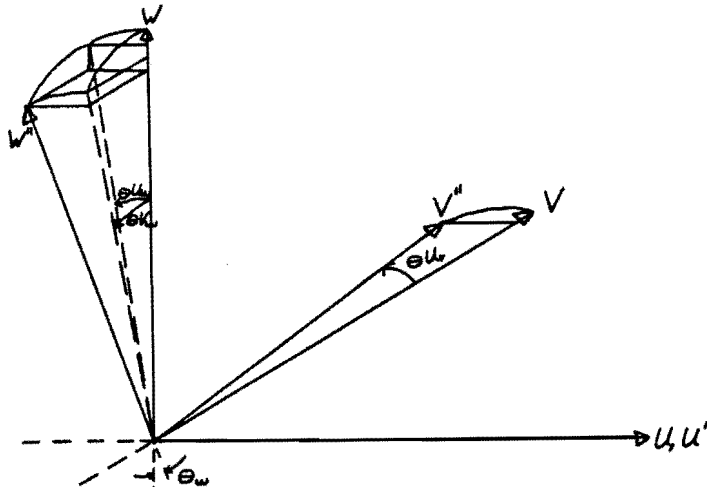
$$U'' = U - V \times \theta_{Uv} - W \times \theta_{Uw}$$

$$V'' = V - W \times \theta_{Vw} \quad (A.8)$$

$$W'' = W$$

De verplaatsings-afwijking ( $\Delta U_h$ ) tengevolge van het niet haaks zijn van de drie geleidingen is:

$$\Delta U_h = \begin{bmatrix} U'' - U \\ V'' - V \\ W'' - W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V \times \theta_{Uv} - W \times \theta_{Uw} \\ 0 - W \times \theta_{Vw} \\ 0 - 0 \end{bmatrix} = \theta_{Av} + \theta_{Aw} \quad (A.9)$$



Figuur A.6 Het niet haakse  $CSU''$  t.o.v. het  $CSU$ .

Hieruit is af te leiden dat het verplaatsen van de eerste geleiding t.g.v. de gekozen definitie geen aanleiding geeft tot haaksheids-afwijkingen. Door de tweede geleiding te verplaatsen vanuit het  $CSU$ -nulpunt ontstaat een haaksheids-afwijking-vector  $\theta_{Av}$  en door de derde geleiding te verplaatsen een afwijkings-vector  $\theta_{Aw}$ .

#### A.4 De totale meetafwijking

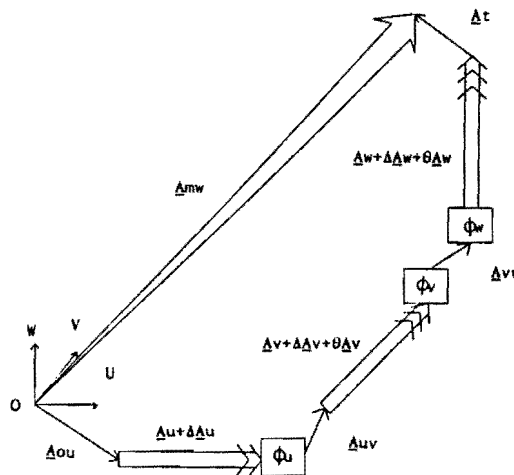
De door de 3DM waargenomen meetvector ( $\underline{Amw}$ ) bestaat uit de kinematische ketting van vectoren, die de ideale meetvector ( $\underline{Ami}$ ) vormt, waaraan op de juiste plaats de besproken afwijkings-vectoren en afwijkings-matrices zijn toegevoegd. De waargenomen meetvector is schematisch weergegeven in figuur A.7 en wordt gegeven door:

$$\underline{Amw} = \underline{Aou} + \underline{Au} + \Delta \underline{Au} + \Phi_u \times (\underline{Auv} + \underline{Av} + \Delta \underline{Av} + \theta \underline{Av} + \Phi_v \times (\underline{Avw} + \Phi_w \times (\underline{Aw} + \Delta \underline{Aw} + \theta \underline{Aw} + \underline{At}))) \quad (\text{A.10})$$

De meetafwijking ( $\Delta \underline{Um}$ ) is de waargenomen meetvector (vgl.A.1) minus de ideale meetvector (vgl.A.10), oftewel:

$$\Delta \underline{Um} = \underline{Amw} - \underline{Ami} \quad (\text{A.11})$$

In tabel A.4 wordt de uitwerking van vergelijking A.11 gegeven waarbij tweede-orde effecten verwaarloosd zijn. De verplaatsings-afwijkingen  $\Delta U_i$ ,  $\Delta V_i$  en  $\Delta W_i$  en de draaiings-afwijkingen  $\phi U_i$ ,  $\phi V_i$  en  $\phi W_i$  zijn allen functies die afhangen van de desbetreffende machinecoördinaat (= geleidings-coördinaat) U, V en W en de tastercoördinaten  $U_t$ ,  $V_t$  en  $W_t$ , zoals aangegeven in de eerste kolom. De afwijkingen zijn gerangschikt naar de componenten (u-, v- en w-richting) van de meetafwijking en naar geometrische bron van afwijking.



Figuur A.7 Schematische voorstelling van de vector  $\underline{Amw}$ .

Foutbron	$\Delta U_{mu}$	$\Delta U_{mv}$	$\Delta U_{mw}$
Linear.: $\Delta U_u = \Delta U(U-U_t)$ $\Delta V_v = \Delta V(V-V_t)$ $\Delta W_w = \Delta W(W-W_t)$	1	1	1
Rechth.: $\Delta U_v = \Delta U(V-V_t)$ $\Delta U_w = \Delta U(W-W_t)$ $\Delta V_u = \Delta V(U-U_t)$ $\Delta V_w = \Delta V(W-W_t)$ $\Delta W_u = \Delta W(U-U_t)$ $\Delta W_v = \Delta W(V-V_t)$	1 1	1 1	1 1
Kantel.: $\phi U_v = \phi U(V-V_t)$ $\phi U_w = \phi U(W-W_t)$ $\phi V_u = \phi V(U-U_t)$ $\phi V_w = \phi V(W-W_t)$ $\phi W_u = \phi W(U-U_t)$ $\phi W_v = \phi W(V-V_t)$	$d(W+W_{uv}+W_{vw})$ $d(W)$ $d(-V-V_{uv}-V_{vw})$ $d(-V_{vw}-V_t)$	$d(-W-W_{vw})$ $d(-W)$ $d(U_{uv}+U_{vw}+U_t)$ $d(U_{vw}+U_t)$	$d(V_{vw}+V_t)$ $d(V_t)$ $d(-U_{uv}-U_{vw}-U_t)$ $d(-U_t)$
Rotatie: $\phi U_u = \phi U(U-U_t)$ $\phi V_v = \phi V(V-V_t)$ $\phi W_w = \phi W(W-W_t)$	$d(W+W_{vw})$ $d(-V_t)$	$d(-W-W_{uv}-W_{vw})$ $d(U_t)$	$d(V+V_{uv}+v_{vw})$ $d(-U_{vw}-U_t)$
Haaksh.: $\theta U_v$ $\theta U_w$ $\theta V_w$	-V -V		

**Tabel A.4** De componenten  $\Delta U_{mu}$ ,  $\Delta U_{mv}$  en  $\Delta U_{mw}$  van de meetafwijkingvector  $\underline{U}_m$ . In de 3 rechterkolommen staan vermenigvuldigingsfactoren. Voorbeeld: de bijdrage in de u-component van de meetafwijking ( $\Delta U_{mu}$ ) door rotatie  $\phi V_v$  is  $[W+W_{vw}] \times \phi V(V-V_t)$ .

In de tabel zien we bij de kantel- respectievelijk rotatie-afwijkingen een extra factor die, afhankelijk van de keuze van het UVW-assenkruis en de ligging van het machinenulpunt, +1 of -1 kan zijn. Deze factor, in de tabel vernoemd als "d", is gedefiniëerd als:

$$d = E * T \quad (A.12)$$

Hierin zijn "E" en "T" op zich ook weer factoren die alleen +1 of -1 kunnen zijn. De factor "E" geeft aan of het gekozen UVW-assenkruis een rechtsdraaiend ( $E=1$ ) dan wel linksdraaiend ( $E=-1$ ) systeem is. De factor "T" beschrijft de overgang van het UVW-assenkruis naar het XYZ-assenkruis. Wanneer de richting van een as van het gekozen UVW-assenkruis tegengesteld is aan de corresponderende richting van het XYZ-assenkruis zullen de tekens met betrekking tot de kantel-afwijkingen omgekeerd zijn. Op deze manier kan men alle drie de richtingen van het UVW-assenkruis vergelijken met die van het XYZ-assenkruis. Dit levert drie richtingsfactoren  $T_u$ ,  $T_v$  en  $T_w$  op. Door deze factoren,  $T_u$ ,  $T_v$  en  $T_w$ , met elkaar te vermenigvuldigen kan men tot een factor  $T$  komen die de overgang van het UVW-assenkruis naar het XYZ-assenkruis eenduidig beschrijft. In figuur A.8 is een voorbeeld gegeven van het hetgeen hierboven beschreven is.

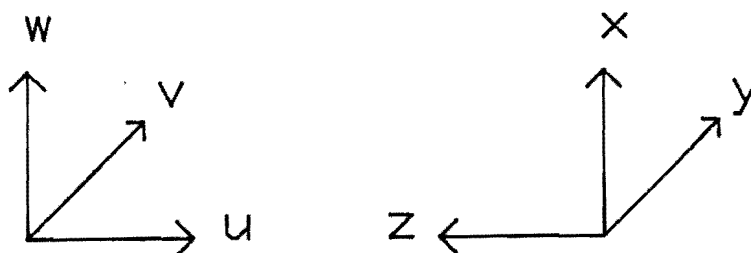
UVW = rechtsdraaiend  $\implies E = 1$ .

U tegengesteld aan Z  $\implies T_u = -1$ .

V gelijk aan Y  $\implies T_v = 1$ .  $\implies T = -1 * 1 * 1 = -1$

W gelijk aan X  $\implies T_w = 1$ .

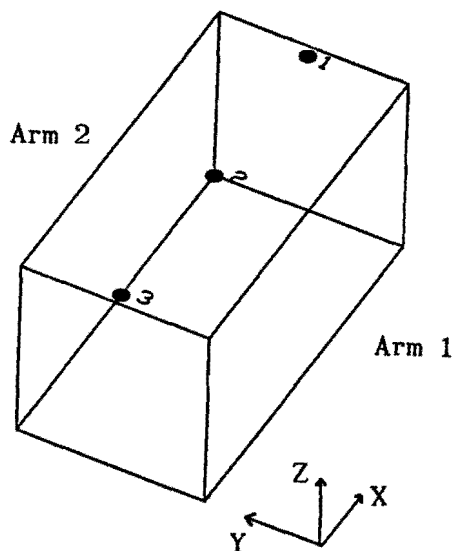
Totaal:  $d = E * T = 1 * -1 = -1$ .



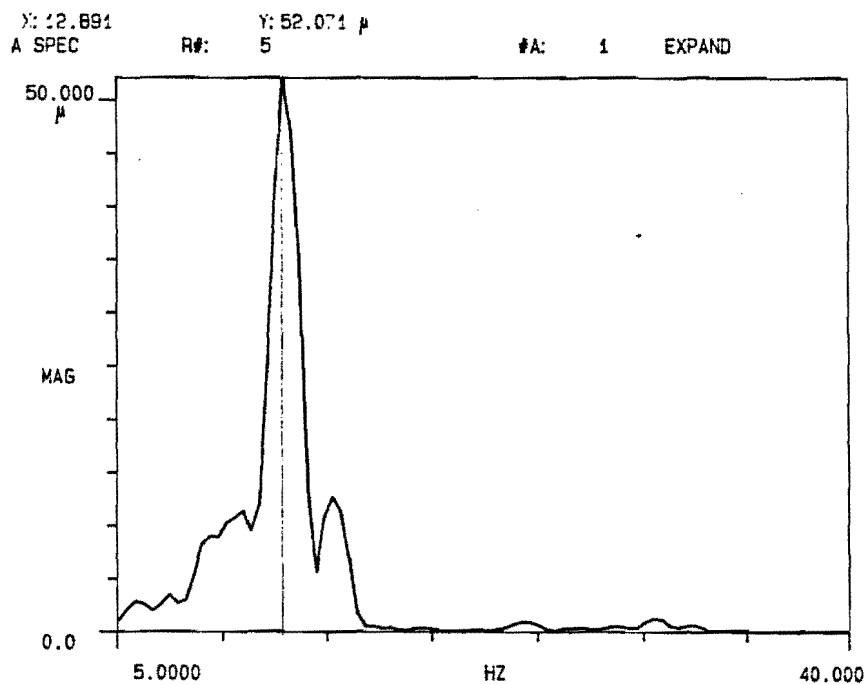
Figuur A.8 Bepaling van de factor  $d$  voor de kantel-afwijkingen.

Het blijkt dat de 21 mogelijke bronnen van afwijkingen die in een 3DM kunnen voorkomen 30 mogelijke afwijkingen opleveren. Met behulp van deze afwijkingen-analyse kan nu iedere meetafwijking, die resulteert uit een afwijking in de geometrie van de geleidingen, binnen het meetvolume worden bepaald. Hoe de 21 geometrische bronnen van afwijkingen gemeten worden, wordt hier niet besproken.

Appendix B Posities trillingsmetingen en voorbeeld resultaat



Figuur B.1 Posities trillingsmetingen in het meetvolume.



Figuur B.2 Voorbeeld van een trillingsmeting aan DEA Bravo 4207 in de pershal te Born.

Appendix C Principeschetsen meetinstrumenten

In de onderstaande beschouwingen zullen de volgende symbolen worden gehanteerd voor de verschillende objecten:

- L : laserbron.
- DP: deelprisma.
- AS: afbuigspiegel.
- T : triplespiegel.
- W : wollastonprisma.
- RS: rechtheidsspiegel.

C.1 Positie-afwijkingen

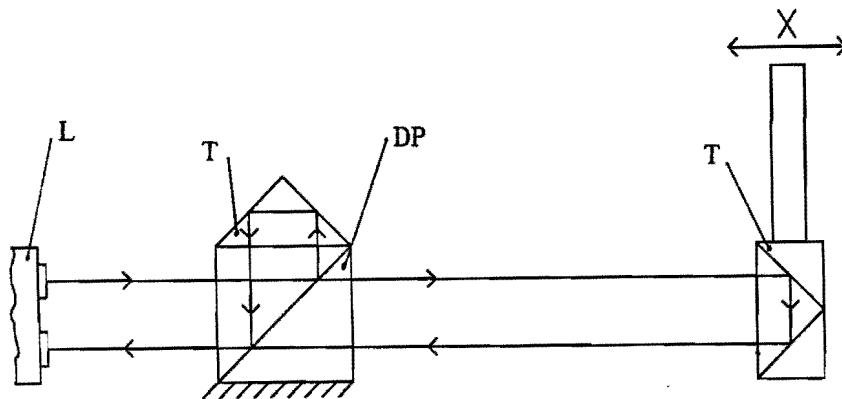
Bij de bepaling van de positie-afwijking van een machine is het zaak dat een door de machine uitgegeven verplaatsing wordt vergeleken met de werkelijke verplaatsing die aan de tasterpunt wordt gegenereerd. De werkelijke verplaatsing moet worden bepaald met een instrument dat in ieder geval nauwkeuriger dient te zijn dan de machine. Voor meetmachines zijn de volgende mogelijkheden aan de orde:

- 1) Laserinterferometer.
- 2) Eindmaat.
- 3) Stappeneindmaat.

Ad 1. De hier gebruikte laserinterferometer maakt gebruik van het optisch dopplereffect om een verplaatsing te bepalen. Voor een positiebepaling wordt één frequentie van de bifrequente laserbundel door een interferometer afgebogen en de andere normaal doorgelaten. De afgebogen bundel wordt door een vast opgestelde triplespiegel weerkaatst terwijl de doorgelaten bundel wordt teruggezonden door de triplespiegel die aan het bewegende object is bevestigd.



Door het optisch dopplereffect zal de laserstraal die van het bewegende deel terugkomt een frequentieverschuiving gekregen hebben. Hieruit kan de verplaatsing worden bepaald door integratie (SCHE 86). In figuur C.1 wordt een prinscheschets gegeven voor deze meting.



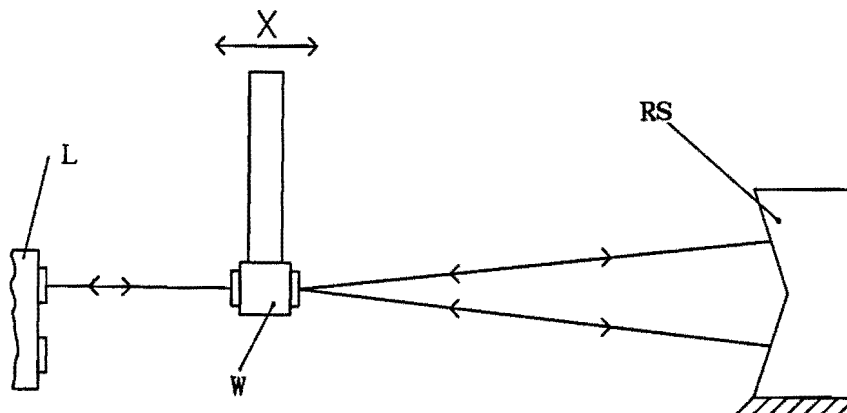
Figuur C.1 Prinscheschets verplaatsingsmeting met behulp van een laserinterferometer.

### C.1 Rechtheids-afwijkingen

Een rechtheids-afwijking is gedefiniëerd als een afwijking van een machine-as in een richting loodrecht op de verplaatsingsrichting. Deze afwijking wordt genomen ten opzichte van de best passende lijn door de metingen. Als meetmiddel komen de volgende instrumenten in aanmerking:

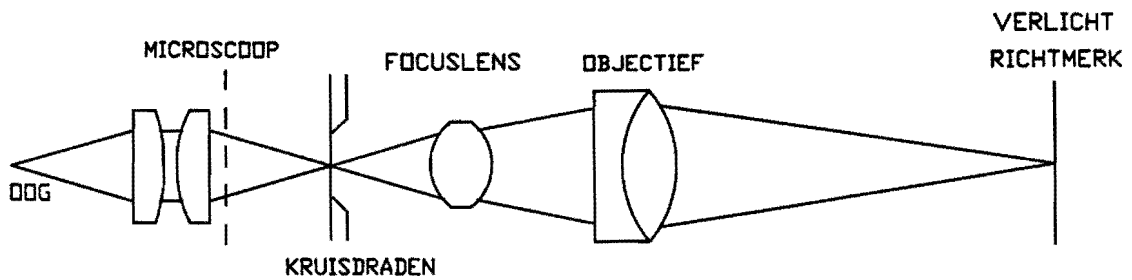
- 1) Laserinterferometer.
- 2) Richtkijker.
- 3) Optisch waterpas.

Ad 1. Rechtheids-afwijkingen kunnen gemeten worden met een laserinterferometer met behulp van een wollastonprisma en een rechtheidsspiegel. In figuur C.2 wordt een prinsipeschets gegeven van deze meting. Z er belangrijk is hierbij dat het wollastonprisma aan het bewegende object wordt bevestigd terwijl de rechtheidsspiegel vast wordt opgesteld. Het wollastonprisma bestaat uit twee lagen materiaal met frequentiegevoelige brekingsindices dat zo is opgebouwd dat  en frequentie naar boven en  en frequentie naar onder wordt afgebogen. Verplaatst het wollaston zich in het vlak van afbuiging dan wordt de afgelegde weg van de ene laserbundel korter terwijl die van de andere laserbundel langer wordt. Hieruit is door integratie de verplaatsing loodrecht op de richting van de bundel in het vlak van afbuiging te bepalen.



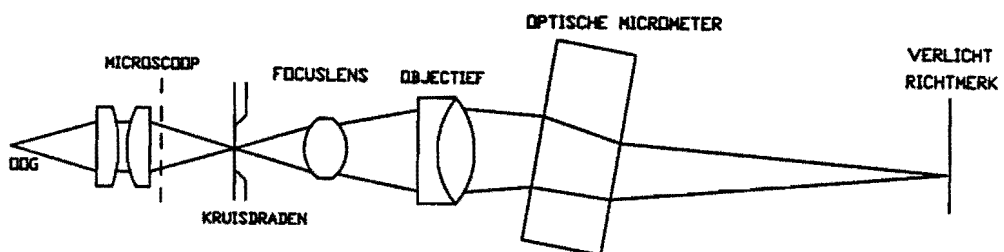
Figuur C.2 Prinsipeschets rechtheidsmeting met behulp van de laserinterferometer.

Ad 2. De richtkijker is een optisch meetinstrument dat in combinatie gebruikt wordt met een verlicht richtmerk. Een prinsipeschets wordt gegeven in figuur C.3.



Figuur C.3 Principeschets richtkijker.

Ad 3. Het optisch waterpas kan, in combinatie met hetzelfde merk als bij de richtkijker, gebruikt worden om een rechtheidsafwijking te bepalen. In figuur C.4 is een principeschets gegeven van het instrument. Doordat de optische delen in zeer slappe bladveren zijn opgehangen, blijft de optische as altijd horizontaal, ongeacht de materiële stand van het instrument, dit uiteraard binnen zekere grenzen.



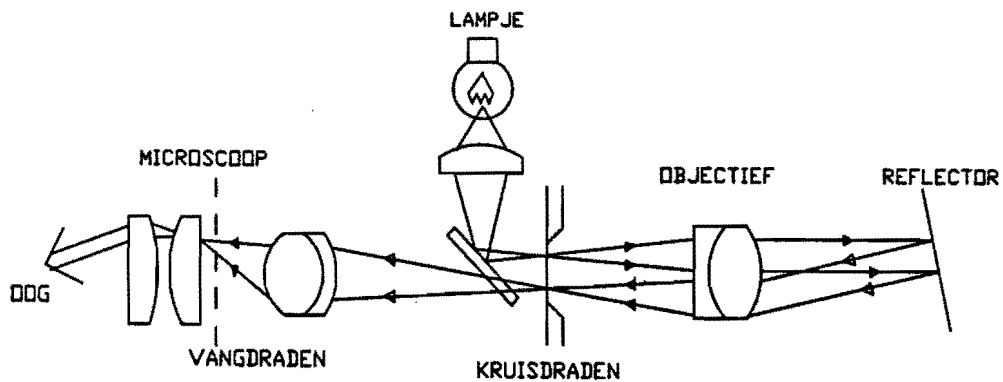
Figuur C.4 Principeschets optisch waterpasinstrument.

### C.3 Kantel-afwijkingen

Kantel-afwijkingen zijn gedefiniëerd als draaiingen van een bepaalde machine-as om een andere as dan zichzelf. Als eenheid worden boogseconden genomen waardoor bij sommige meetinstrumenten een omrekening noodzakelijk is. De volgende meetinstrumenten zijn geschikt om een kantel-afwijking rechtstreeks te bepalen:

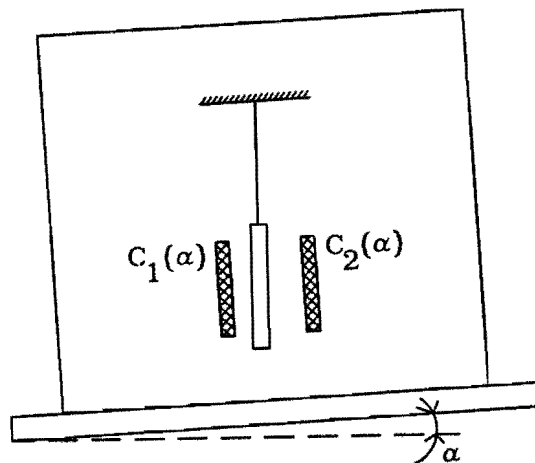
- 1) Autocollimator.
- 2) Elektronisch waterpas.
- 3) Laserinterferometer.

Ad 1. Een autocollimator is een optisch hoekmeetinstrument. Een prinsipeschets wordt gegeven in figuur C.5. Doordat de bundel het instrument evenwijdig verlaat is de afstand instrument-spiegel en een verplaatsing van de spiegel loodrecht op de bundelrichting niet van invloed op de meting. Alleen een hoekverdraaiing van de spiegel zal een verplaatsing geven van de reflectie van de kruisdraden.



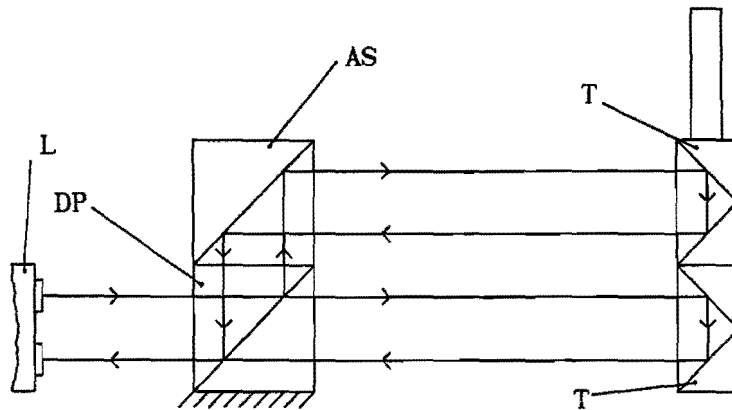
Figuur C.5 Prinsipeschets autocollimator.

Ad 2. Een elektronisch waterpas is een instrument dat de hoek rechtstreeks digitaal uitgeeft in  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Een prinsipeschets wordt gegeven in figuur C.6. De werking is capacitief. Een dun schijfje metaal hangt in een aantal slappe bladveren tussen twee platen. Bij een helling zal het schijfje dichterbij één plaat gaan hangen en verder van de andere. Hierdoor veranderen de capaciteiten tussen de platen en het schijfje. Door een nauwkeurige verschilmeting van de capaciteiten is zo een gevoelig hoekmeetinstrument gecreëerd.



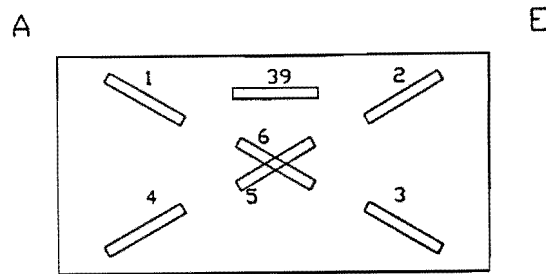
Figuur C.6 Prinsipeschets elektronisch waterpas.

Ad 3. Met de laserinterferometer kunnen nauwkeurig hoeken worden bepaald. Een prinsipeschets voor deze meting wordt gegeven in figuur C.7. De werking is gebaseerd op vergelijking van de verplaatsing van twee triplespiegels. Zoals bij de positiemeting splitst de interferometer de bifrequente laserbundel in twee bundels met een andere frequentie. Nu gaan echter beide bundels naar het bewegende object zodat een evenwijdige verplaatsing van het object geen meetwaarde zal opleveren, daar het verschil in verplaatsing tussen de ene en de andere laserbundel wordt bepaald. Een hoekverdraaiing van het object zal echter de ene laserbundel een langere weg doen afleggen dan de andere. Samen met de bekende afstand tussen de laserbundels kan hieruit de hoekverdraaiing worden bepaald.



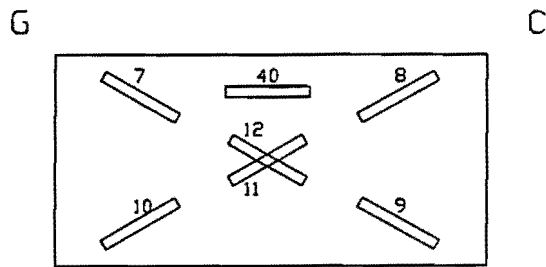
**Figuur C.7** Principeschets hoekmeting met laserinterferometer.

Appendix D Posities eindmaat in meetvolume voor afname  
DEA-machines



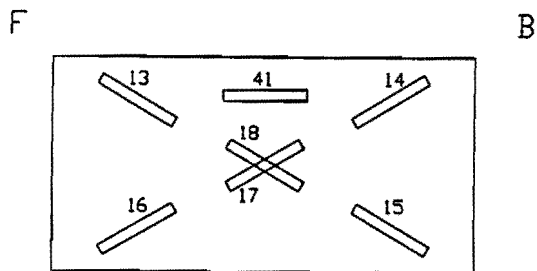
M Q

Figuur D.1 Eindmaatposities in vlak AEQM.



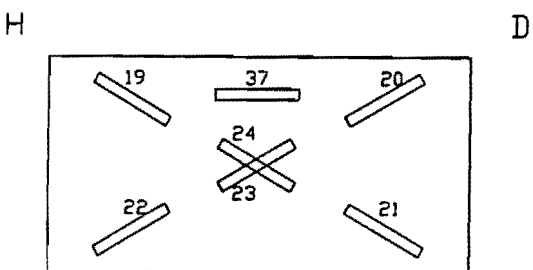
S □

Figuur D.2 Eindmaatposities in vlak GCOS.



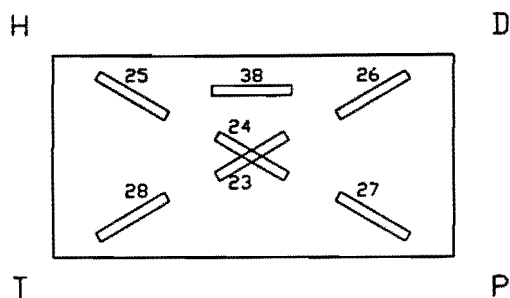
R N

Figuur D.3 Eindmaatposities in vlak FBNR.

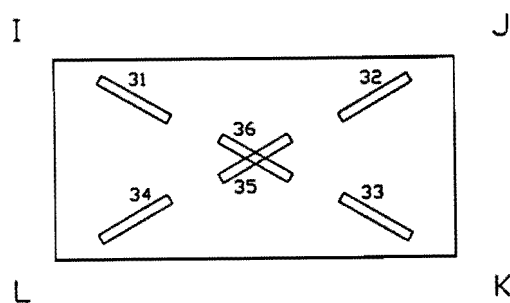


T P

Figuur D.4 Eindmaatposities in vlak HDPT met arm 1.



Figuur D.5 Eindmaatposities in vlak HDPT met arm 2.



Figuur D.6 Eindmaatposities in vlak IJKL.

<u>Positie.</u>	<u>Benodigde meetarm.</u>	<u>Positie.</u>	<u>Benodigde meetarm.</u>
1	1	8	1
20	1	35	1
19	1	14	1
2	2	7	2
25	2	36	2
26	2	13	2
39	1 + 2	37	1 + 2
38	1 + 2	5	1 + 2
23	1 + 2	11	1 + 2
17	1 + 2	6	1 + 2
24	1 + 2	12	1 + 2
18	1 + 2	34	1 + 2
33	1 + 2	29	1
30	1	31	2
32	2	4	1
9	1	15	1
21	1	27	2
3	2	16	2
10	2	28	2
22	1		

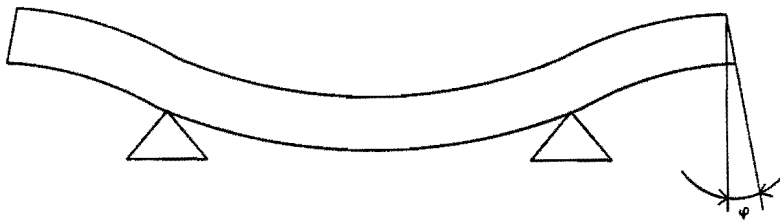
Tabel D.1 Benodigde armen eindmaatmetingen.



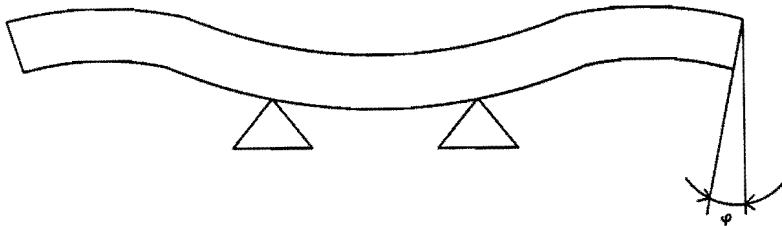
Appendix E. De invloed v/d steunpuntsafstand op een eindmaat

Omdat de eindmaat wordt opgelegd op twee steunpunten zal deze een bepaald doorbuigingsgedrag vertonen. In figuur E.1 t/m E.3 is de invloed van de steunpuntsafstand gegeven op de vorm van de eindmaat. Wanneer de meetvlakken van de eindmaat niet parallel aan elkaar staan, is de gemeten lengte afhankelijk van de aantastpositie. Om te zorgen dat de meetvlakken van de eindmaat steeds parallel staan dienen de steunpunten als volgt te worden gekozen:

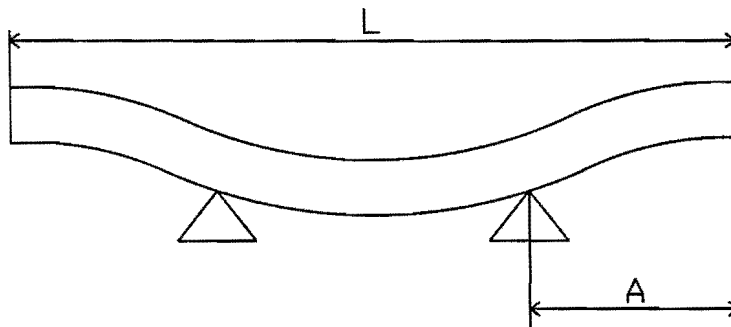
$$A \approx 0.2 * L \quad (\text{LEI 54}) \quad (\text{E.1})$$



Figuur E.1 Grote steunpuntsafstand.



Figuur E.2 Kleine steunpuntsafstand.



Figuur E.3 Juiste steunpuntsafstand.

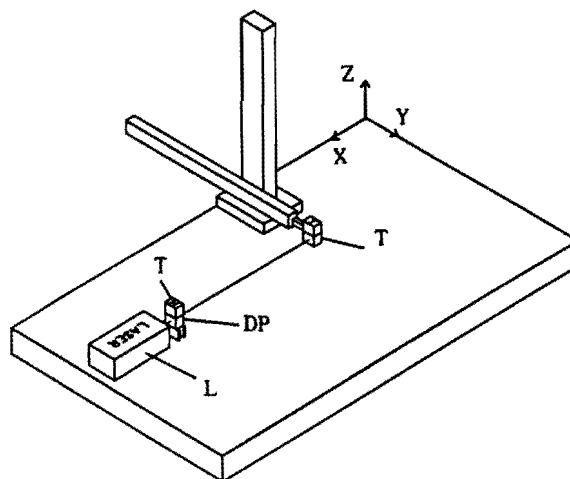
Appendix F Opstellingsschetsen afname Stiefelmayer-,  
Mora- en Zeiss-machines

In de onderstaande beschouwingen zullen de volgende symbolen worden gehanteerd voor de verschillende objecten:

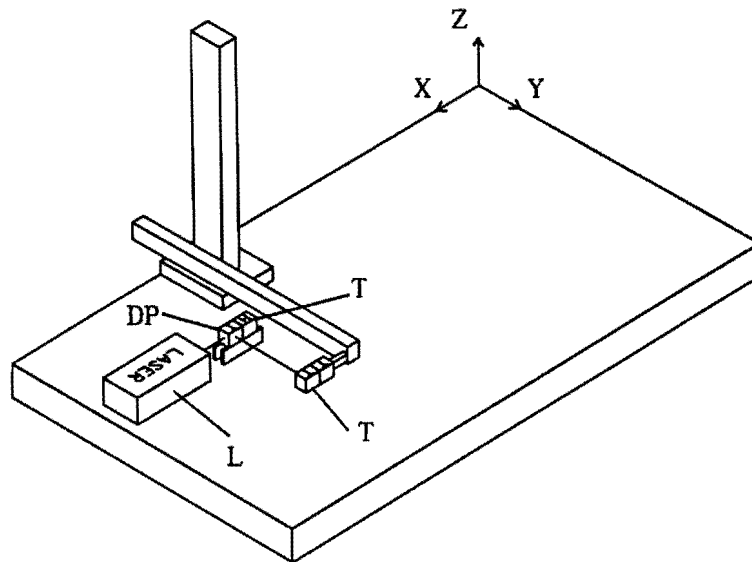
- L : laserbron.
- DP : deelprisma.
- AS : afbuigspiegel.
- T : triplespiegel.
- P : pentagonprisma.
- RK : richtkijker.
- RM : richtmerk.
- OPW: optisch waterpas.
- ELW: elektronisch waterpas.

F.1 Positie-afwijkingen

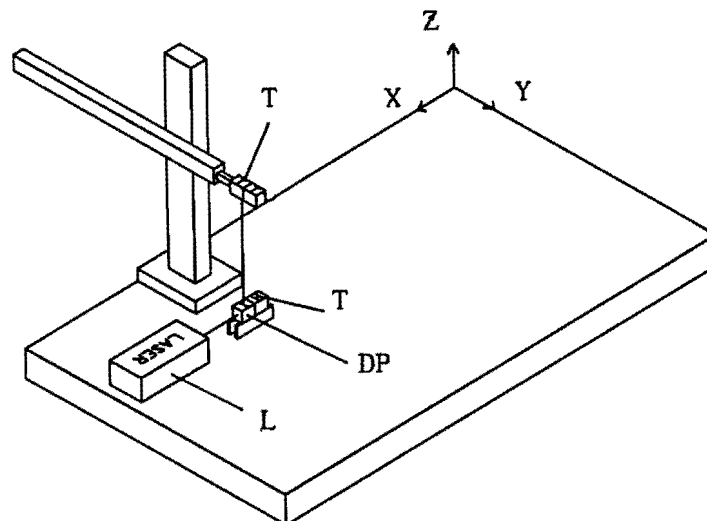
De positie-afwijkingen moeten zo dicht mogelijk bij de betreffende geleiding worden bepaald daar anders de invloed van eventuele rotatie-afwijkingen gaat overheersen. In figuur F1 t/m F3 worden opstellingsschetsen gegeven voor het bepalen van de diverse positie-afwijkingen.



Figuur F.1 TXx meting.



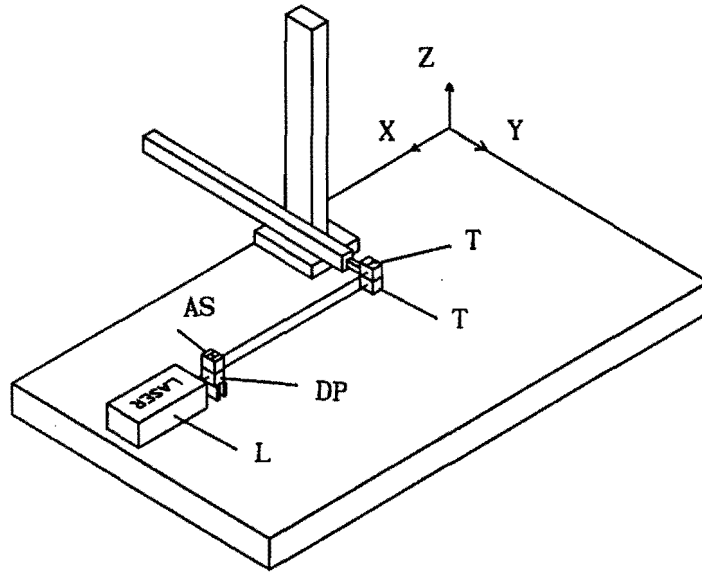
Figuur F.2 TYy meting.



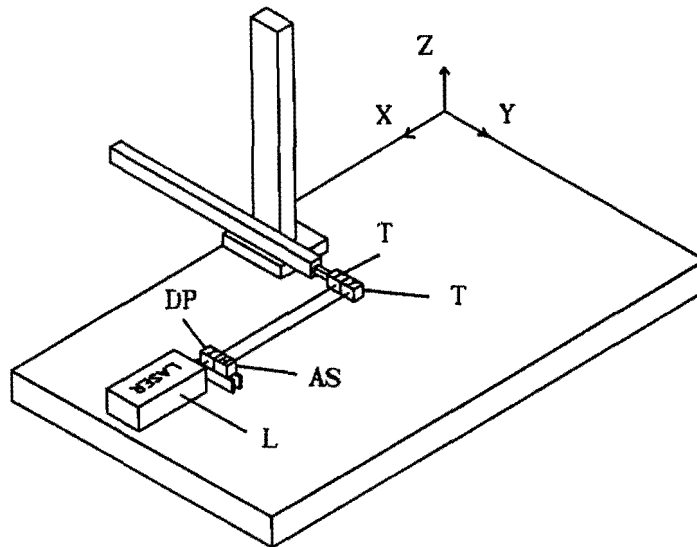
Figuur F.3 TZz meting.

### F.2 Kantel-afwijkingen

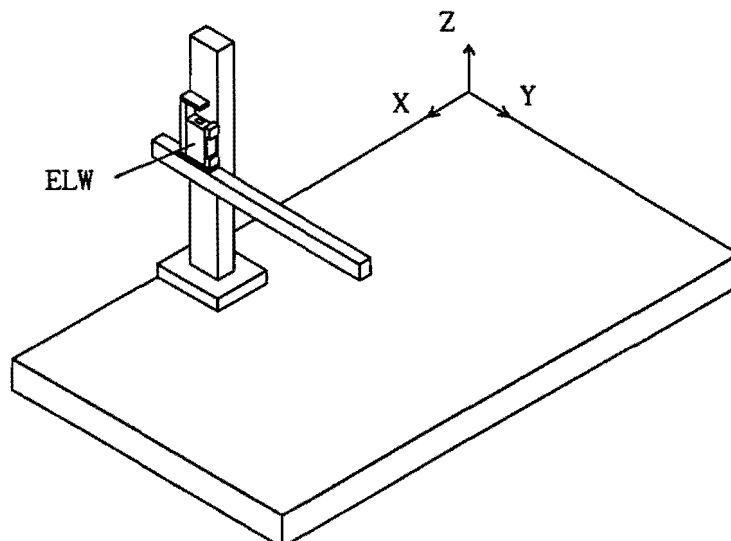
De kantel-afwijkingen dienen eveneens zo dicht mogelijk bij de geleiding te worden bepaald met uitzondering van de RXz-afwijking die bepaald dient te worden met de Y-arm uitgeschoven. Als meetinstrument dient hier eveneens de laserinterferometer voor RYx en RZx. De RXz-afwijking dient bepaald te worden met behulp van een elektronisch waterpas. In de figuren F.4 t/m F.6 worden opstellingschetsen gegeven voor deze metingen.



Figuur F.4 RYx-meting.



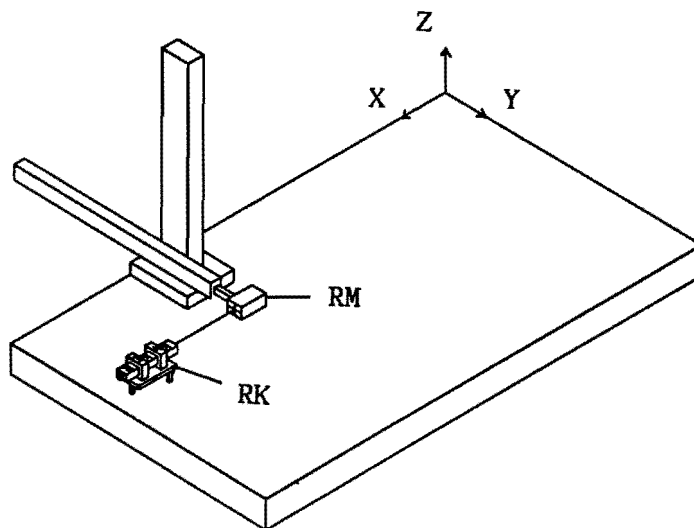
Figuur F.5 RZx-meting.



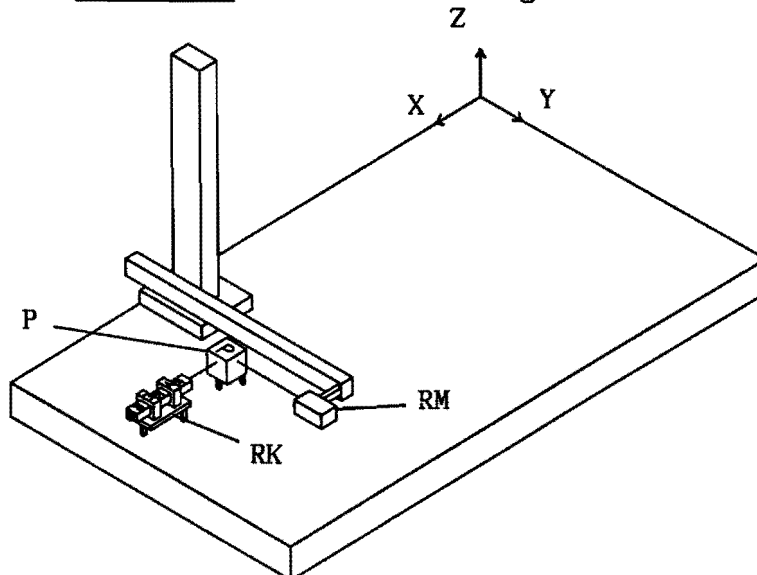
Figuur F.6 RXz-meting.

### F.3 Rechtheids-afwijkingen

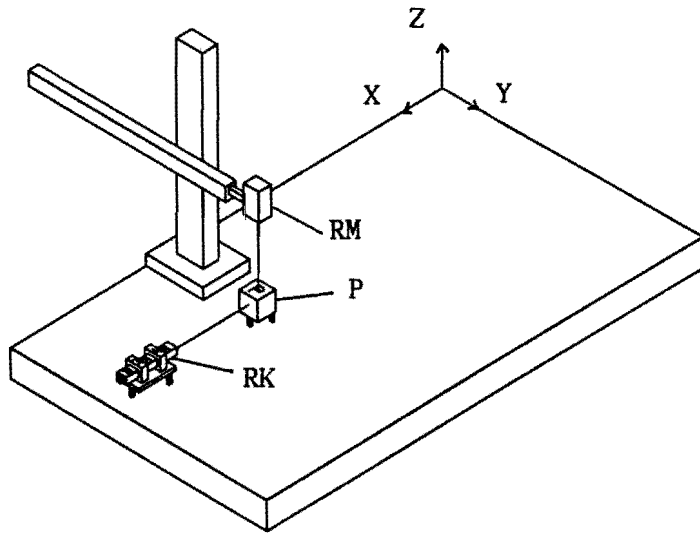
De rechtheids-afwijkingen worden allen bepaald met behulp van een richtkijker met bijbehorend merk. Voor de TZy- en TYz-meting wordt de richtkijker eerst aan het tafelloppervlak uitgelijnd. Bij de TYz-meting dienen twee metingen plaats te vinden namelijk met Y-arm in- en met Y-arm uitgeschoven. Voor de overige metingen dient uitgericht te worden bij de kleinste en grootste coördinaat. In de figuren F.7 t/m F.11 worden opstellingschetsen gegeven voor de verschillende metingen.



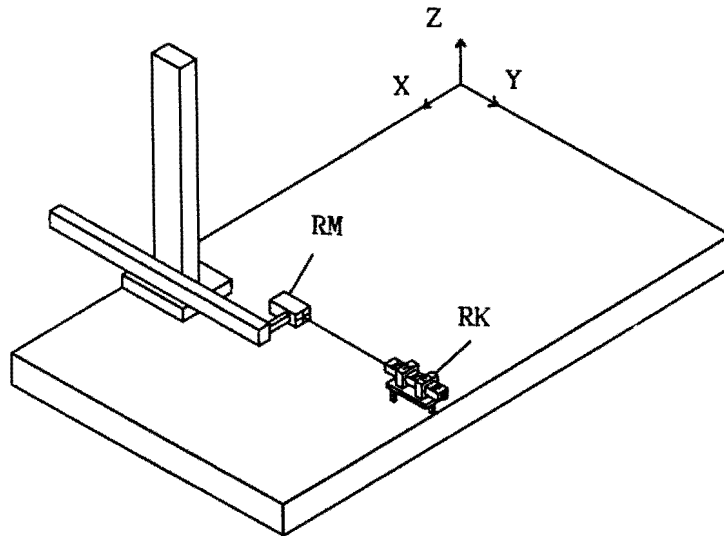
Figuur F.7 TYx- en TZx-meting.



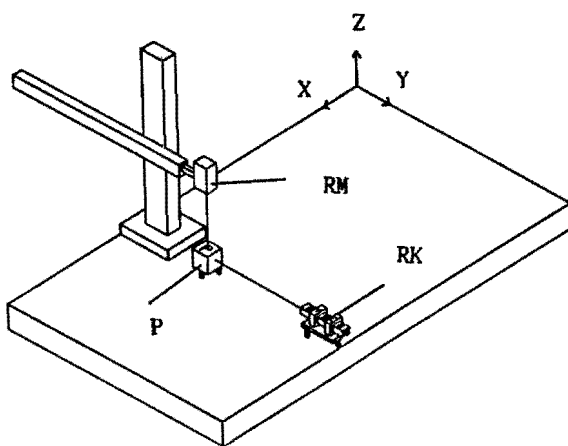
Figuur F.8 TXY-meting.



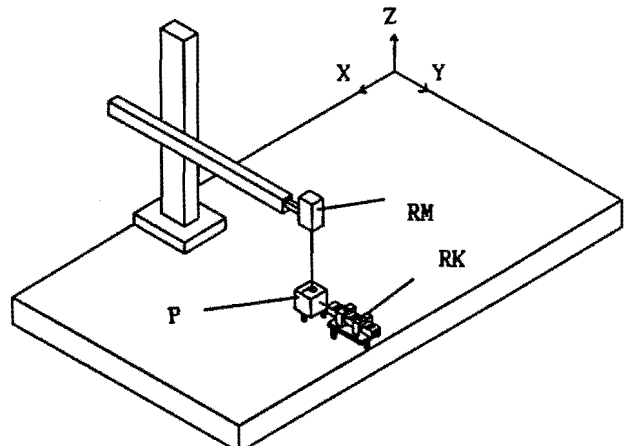
Figuur F.9 TXz-meting.



Figuur F.10 TZy-meting.



A Y-arm ingeschoven.

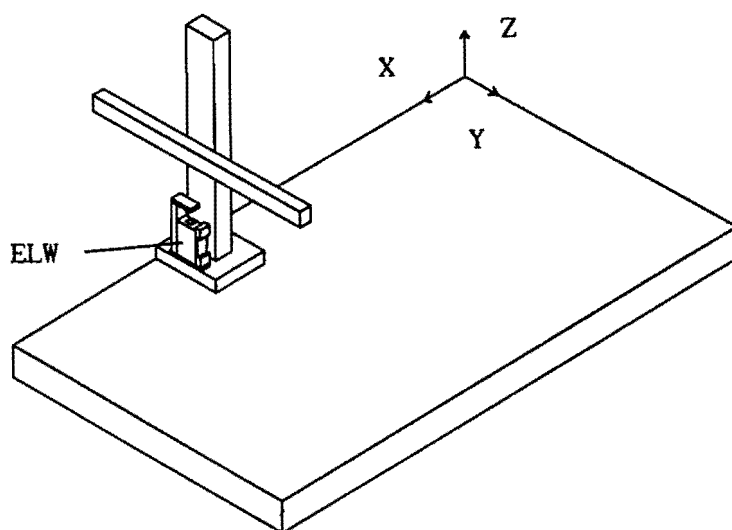


B Y-arm uitgeschoven.

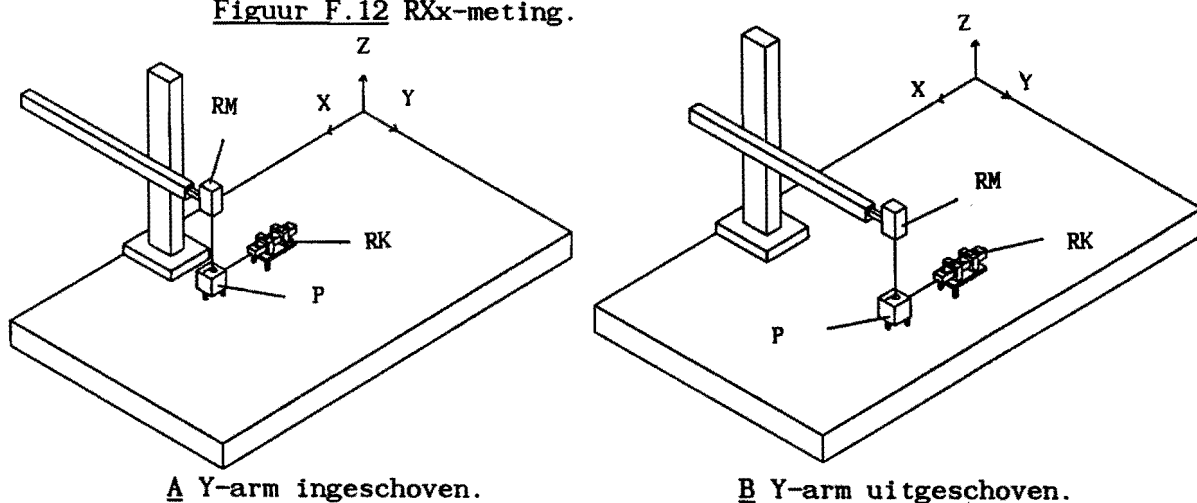
Figuur F.11 TYz-meting.

#### F.4 Rotatie-afwijkingen

De rotatie-afwijking  $RX_x$  kan rechtstreeks worden bepaald door het elektronisch waterpas op de X-geleiding te plaatsen. Een opstellingsschets is gegeven in figuur F.12. De rotatie-afwijking  $RZ_z$  kan echter alleen bepaald worden via twee rechtheidsmetingen. In figuur F.13 is aangegeven hoe de opstelling moet worden gemaakt met de richtkijker als meetinstrument, voor de meting met twee verplaatsingsopnemers en een rechtheidslineaal wordt verwezen naar figuur 3.8.



Figuur F.12  $RX_x$ -meting.



Figuur F.13 Afgeleide  $RZ_z$ -meting.

Appendix G Opstellingsschetsen voor afname  
Mitutoyo-machines

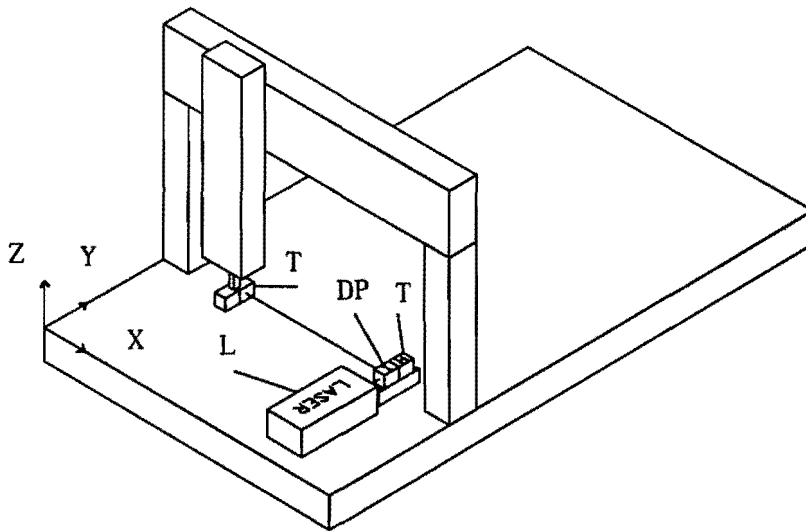
In de onderstaande beschouwingen zullen de volgende symbolen worden gehanteerd voor de verschillende objecten:

- L : laserbron.
- DP : deelprisma.
- AS : afbuigspiegel.
- T : triplespiegel.
- W : wollastonprisma.
- RS : rechtheidsspiegel.
- RT : rechtheidstriplespiegel.
- P : pentagonprisma.
- ELW: elektronisch waterpas.

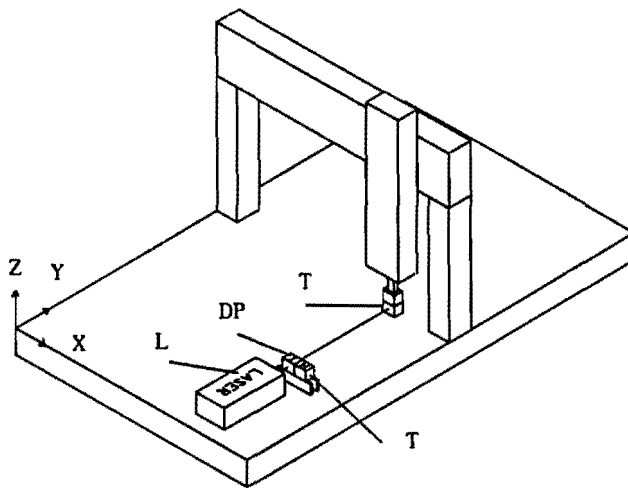
G.1 Positie-afwijkingen

De positie-afwijkingen moeten in principe zo dicht mogelijk bij de betreffende geleiding worden bepaald daar anders de invloed van eventuele rotatie-afwijkingen gaat overheersen. Zoals vermeld in hfdst 3.3.3 levert dit echter voor de TXx-positie-afwijking bezwaren op zodat hier een uitzondering moet worden gemaakt. Alle positie-afwijkingen kunnen met behulp van een laserinterferometer bepaald te worden. In de figuren G.1 t/m G.3 worden opstellingsschetsen gegeven voor het bepalen van de diverse positie-afwijkingen.

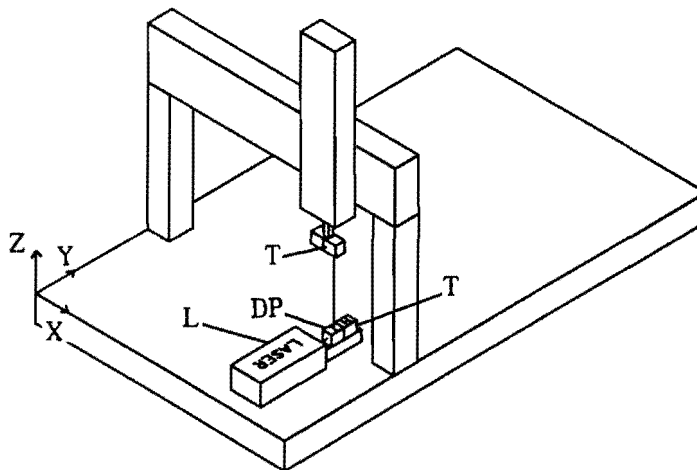




Figuur G.1 TXx meting.



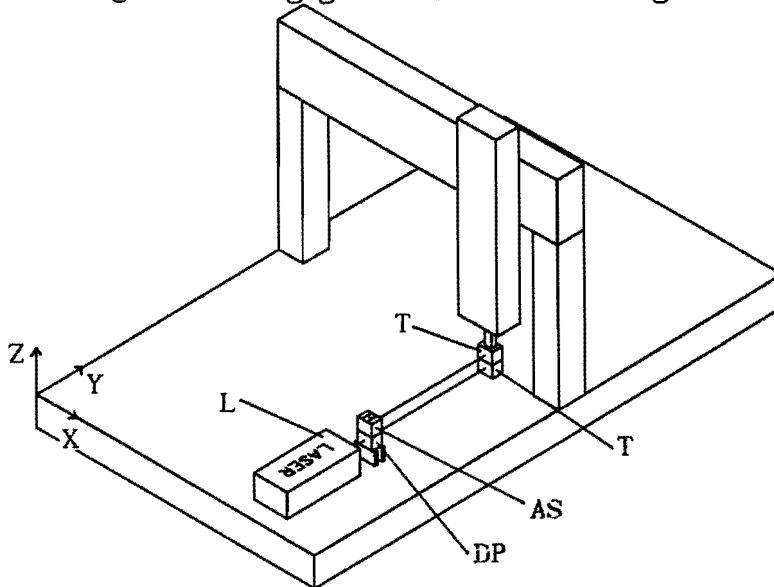
Figuur G.2 TYy meting.



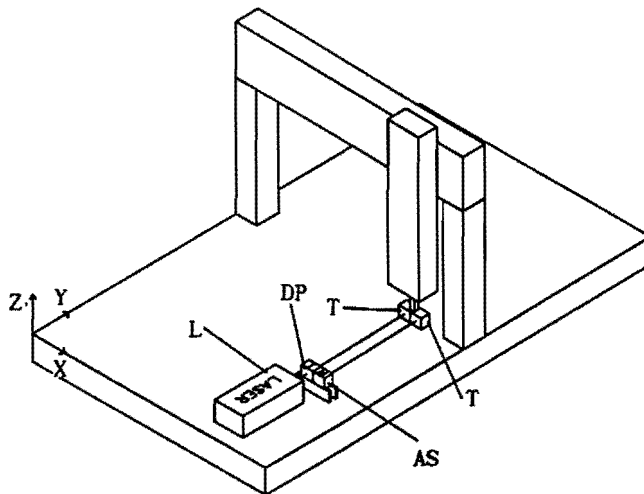
Figuur G.3 TZz meting.

## G.2 Kantel-afwijkingen

De kantel-afwijkingen dienen eveneens zo dicht mogelijk bij de geleiding te worden bepaald. Als meetinstrument dient hier eveneens de laserinterferometer. In de figuren G.4 en G.5 worden opstellingsschetsen gegeven voor deze metingen.



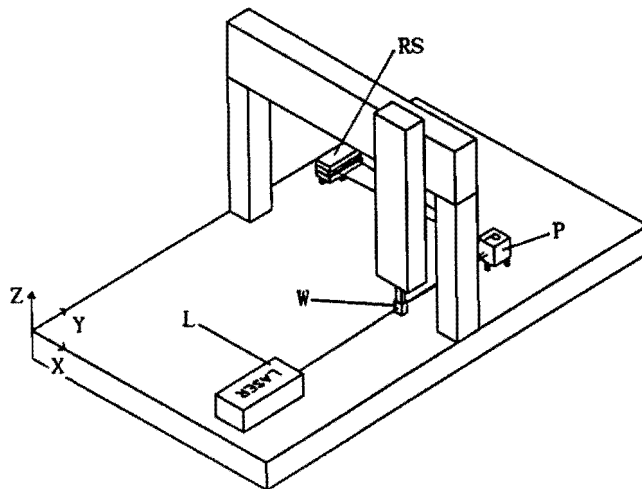
Figuur G.4 Rxy-meting.



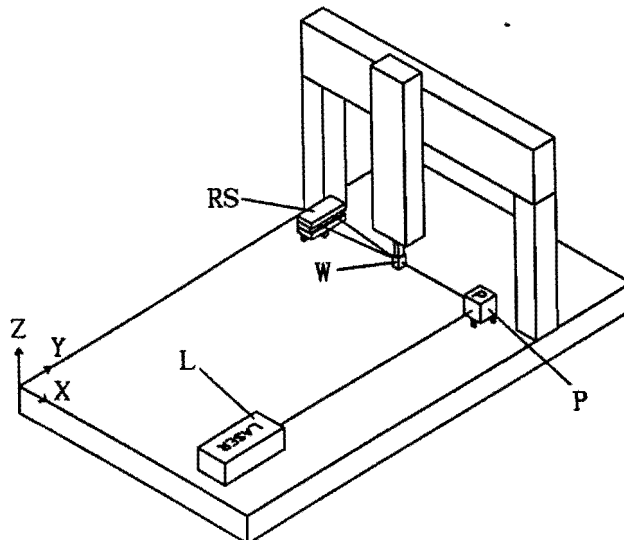
Figuur G.5 RZy-meting.

### G.3 Rechtheids-afwijkingen

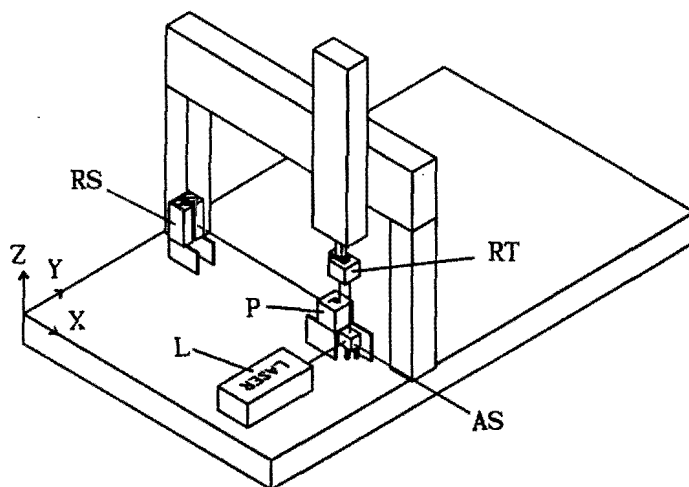
De rechtheids-afwijkingen worden allen bepaald met behulp van de laserinterferometer. In de figuren G.6 t/m G.11 worden opstellingsschetsen gegeven voor de verschillende metingen. De complexiteit van de opstellingen vloeit voort uit het feit dat ten tijde van het onderzoek de Hewlett-Packard optiek niet aanwezig was.



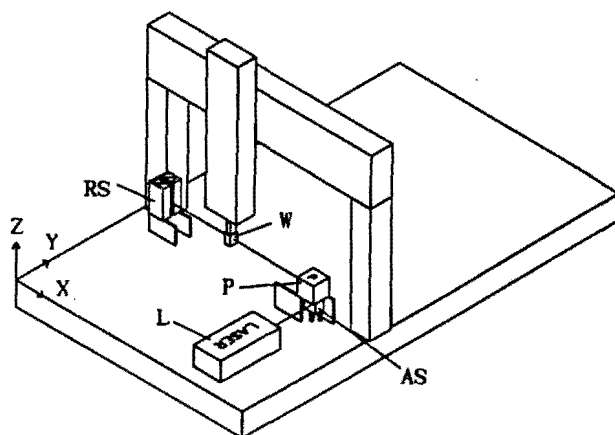
Figuur G.6 T<sub>Xy</sub>-meting en deel  $\theta_{Yx}$ -meting.



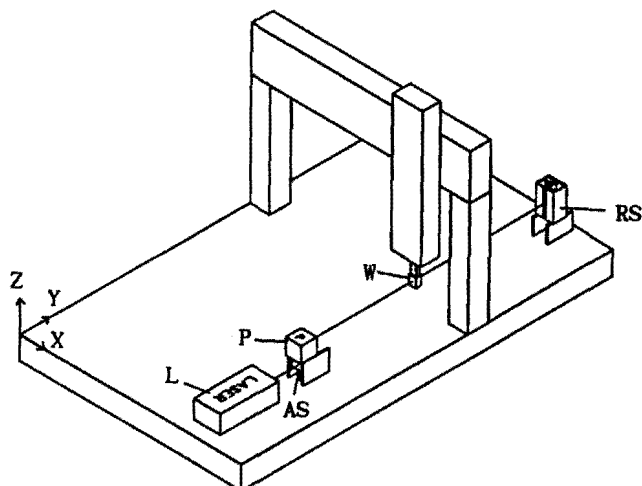
Figuur G.7 T<sub>Yx</sub>-meting en deel  $\theta_{Yx}$ -meting.



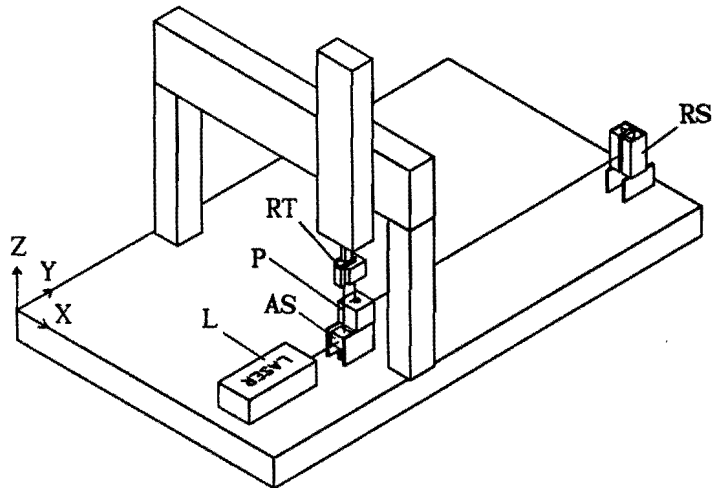
Figuur G.8 TXz-meting en deel  $\theta_{Xz}$ -meting.



Figuur G.9 TZx-meting en deel  $\theta_{Xz}$ -meting.



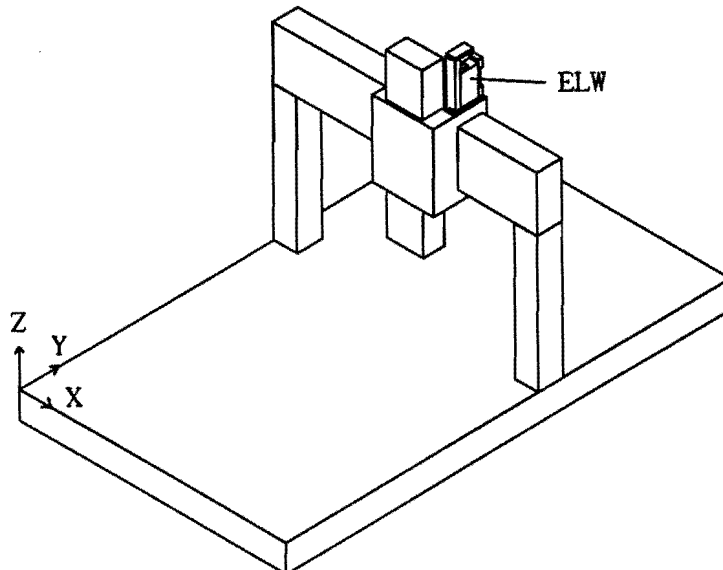
Figuur G.10 TZy-meting en deel  $\theta_{Yz}$ -meting.



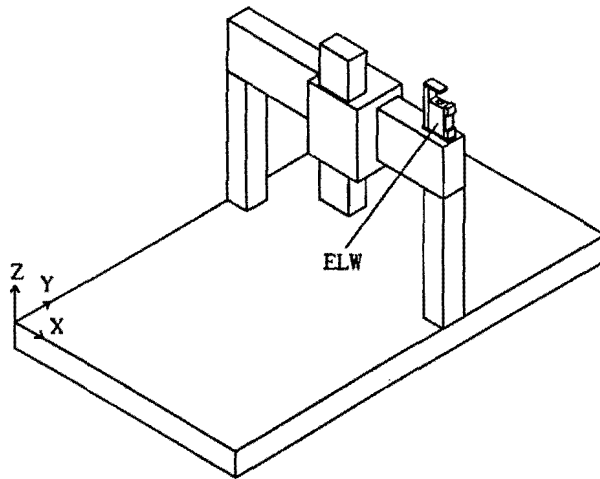
Figuur G.11 TYz-meting en deel  $\theta$ Yz-meting.

#### G.4 Rotatie-afwijkingen

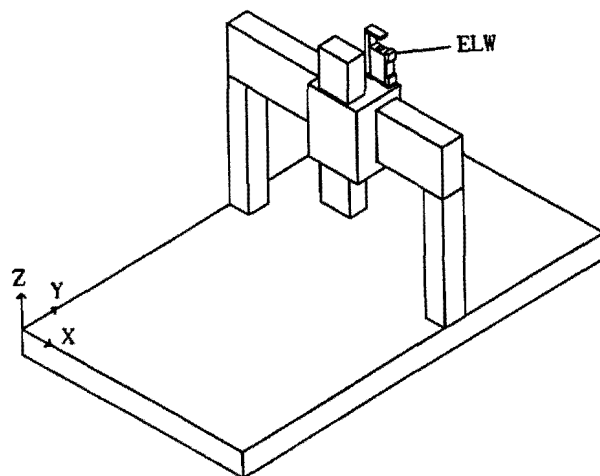
De rotatie-afwijkingen  $R_{Xx}$ ,  $R_{Yy}$  en  $R_{Yx}$  kunnen rechtstreeks worden bepaald door het elektronisch waterpas op de verschillende geleidingen te plaatsen. De opstellingsschetsen zijn gegeven in de figuren G.12 t/m G.14.



Figuur G.12  $R_{Xx}$ -meting.



Figuur G.13 RYy-meting.



Figuur G.14 RYx-meting.

Appendix H. Tabel van afwijkingen voor machines van  
groep 2 en groep 3.

---



---

UUU	UUU	AAAA	TTTTTTTTTTTT	AAAA	MM	MM
UU	UU	AA AA	TTTTTTTTTTTT	AA AA	MMMM	MMMM
UU	UU	AA AA	TTT	AA AA	MM	MMMMMM MM
UU	UU	AA AA	TTT	AA AA	MM	MM MM
UU UU		AAAAAAAA	TTT	AAAAAAAA	MM	MM
UUUU		AA AA	TTT	AA AA	MM	MM
UU		AA AA	TTT	AA AA	MM	MM

Volvo Accuracy check and Testing of Accuracy of 3-D Measuringmachines

---

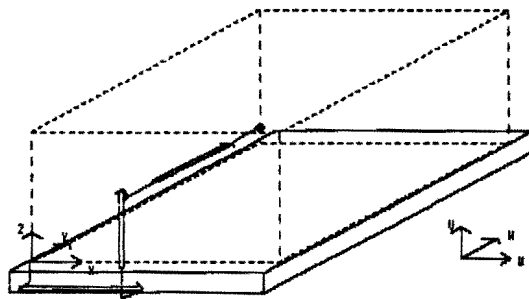


---

```

*****
*
* OPERATOR          MERK          NUMMER          DATUM
* F.c. Theuws      Zeiss          600604          1987-09-11
*
*
*****

```



ASBENOEMING : 1-ste geleiding --> U = X  
 2-de geleiding --> U = Z  
 3-de geleiding --> W = Y

MEETBEREIK : X-bereik --> XB = 8300.0 mm  
 Y-bereik --> YB = 1600.0 mm  
 Z-bereik --> ZB = 1800.0 mm

VERBINDINGSVECTOREN: Uuv --> Xxz = 0.0 mm  
 Uuv --> Zxz = 420.0 mm  
 Wuv --> Yxz = -150.0 mm  
 Uvw --> Xzy = 110.0 mm  
 Uvw --> Zzy = -140.0 mm  
 Wvw --> Yzy = 220.0 mm

TASTERCOMPONENTIEN : X-component --> Xt = 0.0 mm  
 Z-component --> Zt = 0.0 mm  
 Y-component --> Yt = 200.0 mm

AS-COORDINATIEN : X-as --> X" = X-Xt  
 Y-as --> Y" = Y-Yt  
 Z-as --> Z" = Z-Zt

FOUTSOORT	dx	dz	dy
LINEARITEIT			
TXx=TX(x) TZz=TZ(z) TYy=TY(y")	TXx	TZz	TYy
RECHTHEID			
TXz=TX(z) IXy=IX(y") IZx=IZ(x) IZy=IZ(y") IYx=IY(x) IYz=IY(z)	TXz IXy IZx IZy	IZx IZy	IYx IYz
HAAKSHEID			
SXz SXy SZy	-SXz* [Z] -SXy* [Y]	-SZy* [Y]	
KANTEL			
RXz=RX(z) RXy=RX(y") RZx=RZ(x) RZy=RZ(y") RYx=RY(x) RYz=RY(z)	-RZx* [Y+Yxz+Yzy] -RZy* [Yt] RYx* [Z+Zxz+Zzy] RYz* [Zzy+Zt]	RXz* [Y+Yzy] RXy* [Yt] -RYx* [Xxz+Xzy+Xt] -RYz* [Xzy+Xt]	-RXz* [Zzy+Zt] -RXy* [Zt] RZx* [Xxz+Xzy+Xt] RZy* [Xt]
ROTATIE			
RXx=RX(x) RZz=RZ(z) RYy=RY(y")	-RZz* [Y+Yzy] RYy* [Zt]	RXx* [Y+Yxz+Yzy] -RYy* [Xt]	-RXx* [Z+Zxz+Zzy] RZz* [Xzy+Xt]

**Figuur H.1** Tabel van afwijkingen-voortplanting voor machines uit groep 2.



```

UUU      UUU      AAAAA      TTTTTTTTTTTT      AAAAA      MM      MM
UU       UU       AA      AA      TTTTTTTTTTTT      AA      AA      MMMM      MMMM
  UU      UU      AA      AA      III           AA      AA      MM MMMMM      MM
    UU     UU     AA      AA      III           AA      AA      MM      MM      MM
      UU    UU    AAAAAAAAAA      III           AAAAAAAAAA      MM      MM
        UUU   AA      AA      III           AA      AA      MM      MM
          UU   AA      AA      III           AA      AA      MM      MM

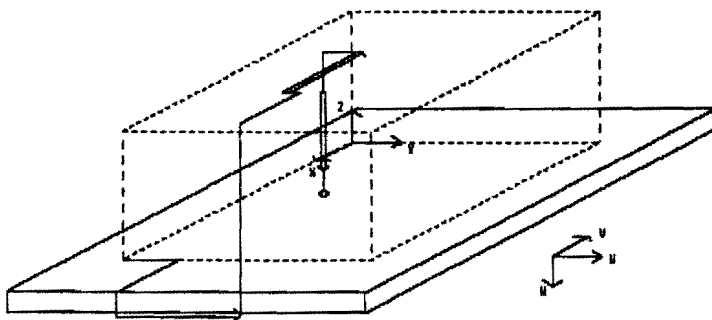
```

Volvo Accuracy check and Testing of Accuracy of 3-D Measuringmachines

```

*****
*
* OPERATOR          MERK          NUMMER          DATUM
* F.c. Theuws      Mitutoyo     13632          1987-09-11
*
*****

```



AFBHANGENDIG : 1-ste geleiding --> U = Y  
 2-de geleiding --> U = XB-X  
 3-de geleiding --> W = ZB-Z

MEETBEREIK : X-bereik --> XB = 700.0 mm  
 Y-bereik --> YB = 1000.0 mm  
 Z-bereik --> ZB = 600.0 mm

VERBINDINGSVECTOREN: Uuv --> Yyx = -60.0 mm  
 Uuv --> Xyx = -190.0 mm  
 Wuv --> Zyx = 880.0 mm  
 Uvw --> Yxz = -160.0 mm  
 Uvw --> Xxz = 0.0 mm  
 Wvw --> Zxz = -180.0 mm

TASTERCOMPONENTEN : Y-component --> Yt = 0.0 mm  
 X-component --> Xt = 0.0 mm  
 Z-component --> Zt = -100.0 mm

AS-COORDINATEN : X-as --> X" = X-Xt  
 Y-as --> Y" = Y-Yt  
 Z-as --> Z" = Z-Zt

FOUISOORT	dy	dx	dz
LINEARITEIT			
TYy=TY(y) TXx=TX(x) TZz=TZ(z")	TYy	TXx	TZz
RECHTHEID			
TYx=TY(x) TYz=TY(z") TXy=TX(y) TXz=TX(z") TZy=TZ(y) TZx=TZ(x)	TYx TYz	TXy TXz	TZy TZx
HAAKSHEID			
SYx SYz SXz	-SYx* [X] -SYz* [Z]	-SXz* [Z]	
KANIEL			
RYx=RY(x) RYz=RY(z") RXy=RX(y) RXz=RX(z") RZy=RZ(y) RZx=RZ(x)	-RXy* [Z-ZB+Zyx+Zxz] -RXz* [Zt] RZy* [X-XB+Xyx+Xxz] RZx* [Xxz+Xt]	RYx* [Z-ZB+Zxz] RYz* [Zt] -RZy* [Yyx+Yxz+Yt] -RZx* [Yxz+Yt]	-RYx* [Xxz+Xt] -RYz* [Xt] RXy* [Yyx+Yxz+Yt] RXz* [Yt]
ROTATIE			
RYy=RY(y) RXx=RX(x) RZz=RZ(z")	-RXx* [Z-ZB+Zxz] RZz* [Xt]	RYy* [Z-ZB+Zyx+Zxz] -RZz* [Yt]	-RYy* [X-XB+Xyx+Xxz] RXx* [Yxz+Yt]

**Figuur H.2** Tabel van afwijkingen-voortplanting voor meetmachines uit groep 3.