

De nauwkeurigheid van NC-gereedschapswerktuigen

Citation for published version (APA):

van der Wolf, A. C. H., & Hijink, J. A. W. (1989). De nauwkeurigheid van NC-gereedschapswerktuigen. *MB Produktietechniek*, 55(5), 169-173.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1989

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

De nauwkeurigheid van NC-gereedschaps-werktuigen



Prof. dr. ir. A.C.H. van der Wolf en ir. J.A.W. Hijink, Technische Universiteit Eindhoven, Vakgroep Productietechnologie en -Automatisering

Het gebruik van numeriek bestuurd gereedschapswerktuigen in de Nederlandse industrie neemt met name de laatste jaren sterk toe. Van deze werktuigen wordt verwacht dat ze in een hoog tempo reproduceerbaarheid afleveren. Ten opzichte van conventionele machines wordt het hoge tempo en de grote reproduceerbaarheid zeker wel gehaald. Om een grote nauwkeurigheid te halen zal men de produktie zeer goed voor moeten bereiden, zowel wat betreft de programmering als de gereedschapsinstelling. Daarnaast speelt natuurlijk de nauwkeurigheid van het gereedschapswerktuig zelf een belangrijke rol.

Inleiding

Er zijn een aantal redenen aan te geven waarom de totale nauwkeurigheid van het gereedschapswerktuig een steeds belangrijkere rol gaat spelen:

- Door miniaturisatie en integratie moeten produkten met grotere nauwkeurigheid worden geproduceerd;
- De kostprijzen van de produkten zijn vaak zo hoog, en deseries betrekkelijk klein, dat men het zich niet kan veroorloven om door middel van proefseries een optimale machine-instelling te verkrijgen;
- De economische levensduur van een produktiemachine is meestal groter dan de produktielooptijd van een bepaald produkt, zodat bij de introductie van een nieuw produkt een geschikte keuze gemaakt moet worden uit de beschikbare machines.

Dit betekent wel dat de nauwkeurigheid van de betrokken machines goed bekend moet zijn. Dit kan worden gerealiseerd door de machines niet alleen bij de afname, maar ook periodiek aan een controle te onderwerpen.

Bij de keuze en afname van een machine wordt vooral aandacht besteed aan de geometrische nauwkeurigheid en aan de positioneer-

Foutenbronnen

De machine-nauwkeurigheid wordt door een groot aantal factoren bepaald. Het schema in figuur 1 geeft een overzicht van de afwijkingen die op kunnen treden en die de machinenauwkeurigheid beïnvloeden. Hierbij wordt onder een afwijking het verschil tussen de gewenste (geprogrammeerde) en werkelijke positie van het gereedschap ten opzichte van het werkstuk verstaan. Hierbij moet onderscheid worden gemaakt tussen systematische en toevallige afwijkingen.

Een systematische afwijking is een door een foutenbron veroorzaakte afwijking die, indien deze meet- en berekenbaar zou zijn, in de toekomst voorspelbaar optreedt. Deze klasse van afwijkingen is in principe (voor een deel) te corrigeren of te compenseren. Met toevallige afwijkingen, die een willekeurig karakter hebben, is dit niet mogelijk.

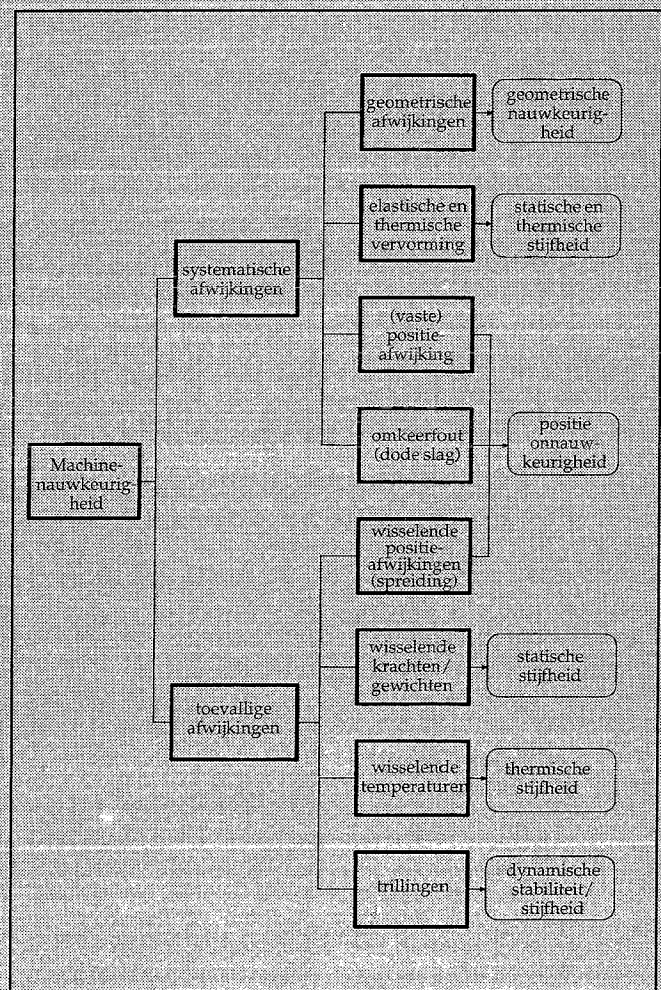
Bij de keuze en afname van een machine wordt vooral aandacht besteed aan de geometrische nauwkeurigheid en aan de positioneer-

on nauwkeurigheid. Destatische en thermische stijfheid worden wel onderkend als belangrijk, maar goede afspraken over de wijze van meten en grootte van de toelaatbare afwijkingen komen slechts moeizaam tot stand.

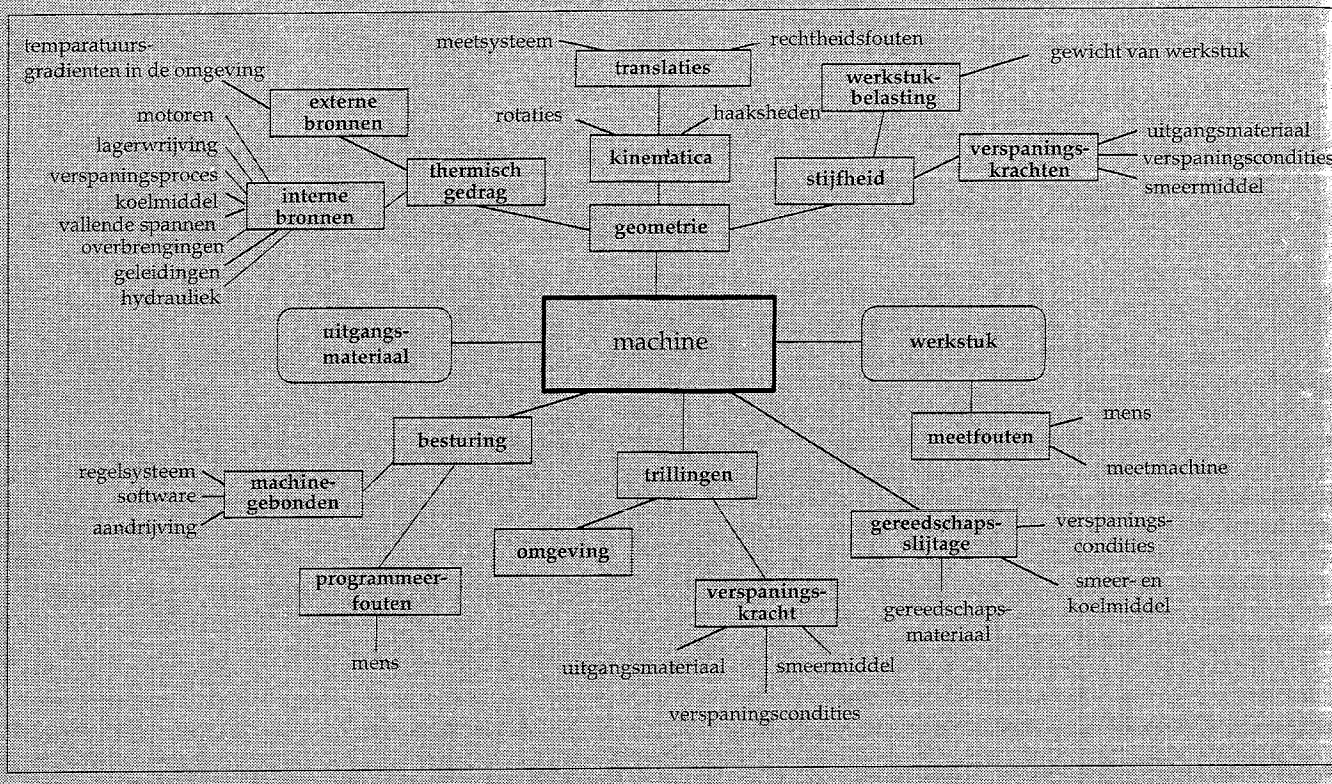
Uit het schema van figuur 1 wordt niet duidelijk wat mogelijke oorzaken zijn van optredende onnauwkeurigheden. Dit wordt duidelijker aan de hand van het overzicht in figuur 2. We zien dat

met name de geometrie van de machine door een groot aantal in- en uitwendige factoren wordt beïnvloed. Daarnaast wordt de geometrie van het werkstuk ook nog eens bepaald door onnauwkeurigheden in de besturing, door trillingen en door gereedschapsslijtage.

Op de belangrijkste factoren die aanleiding geven tot systematische fouten zullen we nader ingaan.



Figuur 1 Opbouw van de machinenauwkeurigheid



Figuur 2 Overzicht van factoren die de onnauwkeurigheid beïnvloeden

Geometrie
Kinematica van de machine

Tot de afwijkingen die invloed hebben op de kinematica van de machine wordt een aantal parameters gerekend die de imperfectie van de geleidingen en de structuur van de machine weergeven. Hieronder valt een aantal bekende grootheden van een geleiding, zoals rechtheid en daaruit resulterende rotatie-afwijkingen. Zo kan men bij een rechtgeleiding 6 mogelijke afwijkingen aangeven, 3 translaties en 3 rotaties. Op deze manier beschouwd heeft een 3 assige freesbank 21 bronnen van afwijkingen ten gevolge van onvolkomenheden in de geometrie (3 + 6 + 3 voor haaksheidsafwijkingen tussen de geleidingen onderling).

Het zal duidelijk zijn, dat het bepalen van de invloed van iedere afwijking op de positie van het gereedschap ten opzichte van het werkstuk geen eenvoudige zaak is. Binnen het Laboratorium voor Geometrische

Meettechniek van de T.U. Eindhoven, Vakgroep WPA, zijn mathematische modellen ontwikkeld die de afwijkingenstructuur van een 3D-meetmachine beschrijven [TEEU 89]. Aan uitbreiding van deze modellen wordt gewerkt, zodat deze ook op de geometrische structuur van produktiemachines toepasbaar zijn. Een voordeel van een mathematisch model is dat daarmee de geometrische nauwkeurigheid in het hele werkgebied van de machine kan worden vastgelegd en eventueel door middel van software kan worden gecorrigeerd.

De hoofdspil

Een geometrisch element dat een aparte plaats inneemt is de hoofdspil. Een roterende hoofdspil kan de volgende afwijkingen vertonen: een axiale fout, een radiale fout en een hoekfout. De invloed van deze fouten is bij de draai- en freesbank verschillend. Bij draaibanken zijn alleen de foutbewegingen in het vlak van de beitelbewegingen, dus evenwijdig aan

het bed en de dwarslede, van invloed. Bij freesmachines draait de gevoelige richting rond met het gereedschap.

Het meetsysteem

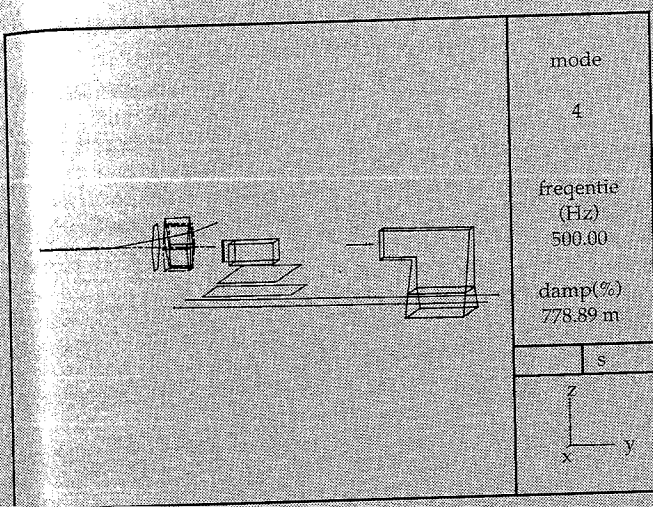
Hoewel het meetsysteem deel uitmaakt van de kinematica van de machine neemt het een bijzondere plaats in, reden waarom dit als een apart onderwerp wordt behandeld.

Indien men de afwijkingen van de meetsystemen wil bekijken, dan moet men onderscheid maken tussen directe en indirecte meetsystemen. Bij de directe meetsystemen worden de te meten grootheden rechtstreeks, dus zonder overbrenging gemeten. Een translatie-meetsysteem, gebruikt om lineaire verplaatsingen te meten en een rotatie-meetsysteem, gebruikt om hoekverdraaiingen te meten, zijn beiden voorbeelden van directe meetsystemen. Bij indirecte meetsystemen wordt de te meten grootheid eerst met behulp van een overbrenging omgezet, waarna de meting

plaatsvindt. Een veelgebruikte toepassing is de translatiemeting van een slede door middel van een rotatieopspil. Door deze overbrenging zal het aantal mogelijke foutbronnen toenemen. Mogelijke oorzaken van een afwijking kunnen dan zijn: fouten in de spoed van de kogelomloopspil, speling in de spillagers, torsie en buiging.

Het zijn met name deze factoren die bij de afname van een machine worden gecontroleerd. De geometrische protocols volgens Schlesinger en Salmon tot de jaren 60, en meer recent DIN 8601 voor de geometrie en VDI/DGQ 3441 voor de positionering, mogen bekend worden verondersteld. Deze testen zijn er met name op gericht om te controleren of bij de montage en afstelling door de fabrikant van het gereedschapswerktuig geen fouten zijn gemaakt. De afwijkingen die toelaatbaar zijn liggen in de orde van grootte van 10 µm, en leveren door de moderne fabricage methoden en goede kwaliteit

special report



Figuur 3 De belangrijkste trillings-mode van een CNC-draaibank

van de meetmiddelen over het algemeen geen al te grote problemen op.

Bovendien worden deze testmethoden gebruikt om machines periodiek, of direct na een botsing, te controleren, en indien noodzakelijk, bij te stellen.

De stijfheid van de machine

De statische en dynamische stijfheid bepalen mede de eindgeometrie van het werkstuk. De statische belasting bestaat uit het werkstukgewicht en de verspaningskrachten. Is het werkstukgewicht klein ten opzichte van de sleden bij een freesmachine, of de hoofdspil bij een draaibank, dan moet met name rekening worden ge-

houden met de verspaningskrachten. Bij grotere machines zal vaak de invloed van het werkstukgewicht overheersen.

De grootte van de afwijkingen hangt rechtstreeks af van de statische stijfheid van de machine en wordt bepaald door het materiaal, de geometrie en de wijze waarop de krachten worden ingeleid. Bij een gangbare statische stijfheid van 10^8 N/m betekent dit, dat bij een verspaningskracht van 1000 N of een werkstukmassa van 100 kg een deformatie van 10^{-5} m op zal treden.

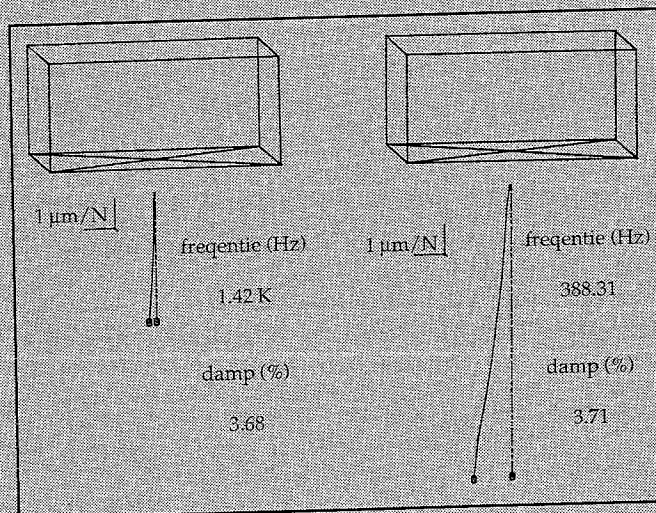
De verspaningskracht zal in het algemeen geen problemen opleveren, omdat deze krachten bij het nabewerken laag zijn. Ten gevolge van het werkstukgewicht

treden weliswaar deformaties op in de machine, maar dooreen goede keuze van het werkstuknulpunt zal men de effecten van deze deformaties slechts in beperkte mate terugvinden als geometriefouten in het produkt. Heeft men zeer zware werkstukken, dan zal men daarmee uiteraard bij de keuze van het gereedschapswerktuig rekening moeten houden.

Onvoldoende dynamische stijfheid uit zich in trillingen (chatter) tijdens de bewerking. De invloed van deze trillingen op de geometrie van het eindprodukt is gering, wel leidt het tot een slechtere oppervlaktekwaliteit van het werkstuk en een

moelijk om te voorspellen onder welke procescondities chatter op zal treden. Het dynamische gedrag van de hoofdspil wordt namelijk in grote mate beïnvloed door de massa en lengte van de toegepaste gereedschappen bij het frezen, of van het werkstuk bij draaien.

In figuur 5 is voor eenzelfde hoofdspil van een freesbank de belangrijkste mode opgetekend j toepassing van een korte kopfrees (lengte 90 mm) en van een opbouwgereedschap (lengte 220 mm). We zien dat de eigenfrequentie daalt van 1420 Hz naar 388 Hz, en de dynamische soepelheid stijgt van $80 \cdot 10^{-9}$ naar $1300 \cdot 10^{-9}$ m/N. Deze waarden maken ook



Figuur 5 De invloed van de gereedschapslengte op de trillings-modes

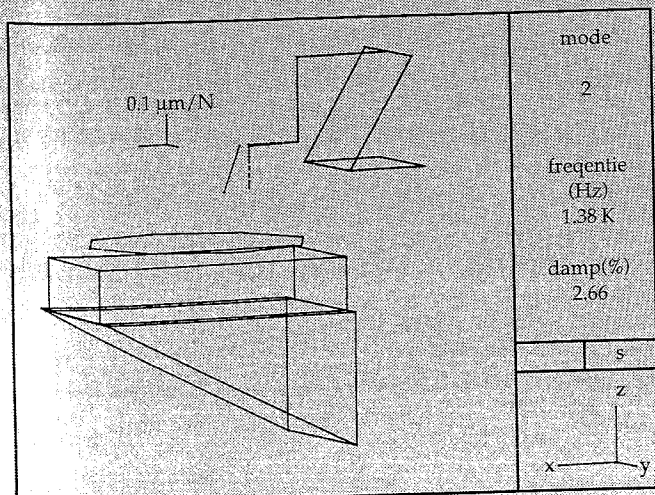
verhoogde slijtage van machine en gereedschap. Uit onderzoek dat de laatste jaren is uitgevoerd binnen de vakgroep WPA, blijkt dat de machine zelf zelden aanleiding geeft tot storende eigen-trilling-modes. Zowel bij draaibanken als bij freesmachines is het met name de hoofdspil die voor de meeste gevoelige modes verantwoordelijk is.

In figuur 3 is een voorbeeld gegeven van een CNC draaibank, en in figuur 4 van de kop van een CNC-freesmachine. Het feit dat met name de hoofdspil aanleiding zal geven tot trillingen, maakt het voor de gebruiker zeer

duidelijk waarom het verspanen met lange (opbouw) gereedschappen zo snel aanleiding geeft tot chatter, de oorzaak ligt in eerste instantie niet bij het gereedschap maar veel eerder in de stijfheid van de spil.

Thermisch gedrag

Onder invloed van de vele thermische bronnen (zie figuur 2) zal een productie-machine een zeker opwarmgedrag vertonen, met een bijbehorend temperatuurverloop. Dit thermisch gedrag is afhankelijk van de mate waarin de verschillende warmtebronnen bijdragen aan de op-



Figuur 4 De belangrijkste trillings-mode van een CNC-freesmachine

warming van de machine, maar blijkt in de praktijk een zekere mate van reproduceerbaarheid te bezitten. De tijd nodig om een thermisch stabiele evenwichtssituatie te verkrijgen is sterk afhankelijk van de verspaningscondities, en bedraagt 4 tot 8 uren.

De vervormingen die worden geïntroduceerd tijdens het opwarmen van de machine kunnen erg groot zijn. Was het bij conventionele machines nog mogelijk dat de operator gedurende het opwarmen de machines corrigeerde, bij de moderne CNC-machine heeft hij geen invloed meer op de geprogrammeerde posities.

Voor een middelgrote verticale freesmachine zijn in figuur 6 de positiefouten van een frees ten opzichte van het werkstuk weergegeven voor een spiltoerental van 4000 omw/min. Na 90 minuten blijkt de positiefout in verticale richting 80 µm te bedragen. Daarna treedt een zekere temperatuursvereffening in de machine op, waardoor de fout kleiner wordt, maar een stabiel niveau is zelfs na 300 minuten nog niet bereikt. Bij een spiltoerental van 2000 omw/min ziet de situatie er uit zoals weergegeven in figuur 7, na 180 minuten treedt er een stabilisering op. Met name bij het nafrezen van drie-dimensionale contouren met een bolkopfrees hebben deze temperatuur-effecten, gezien de lange freesduur, grote invloed op de eindgeometrie van het werkstuk.

Het beperken van de thermische uitwijkingen is vooral een zaak van de machine-ontwerper. Zo kunnen warmtebronnen gescheiden worden van de machine, kan inwendige koeling worden aangebracht en moet de constructie thermisch symmetrisch worden gemaakt. Hierbij moet ook veel aandacht worden besteed aan de montage van de linialen. De nieuwste ontwikkeling is het plaatsen van temperatuur-

sensoren op relevante plaatsen in de machine en het softwarematig corrigeren van de temperatuursinvloed. Een aantal fabrikanten heeft dit principe op kleine schaal reeds toegepast.

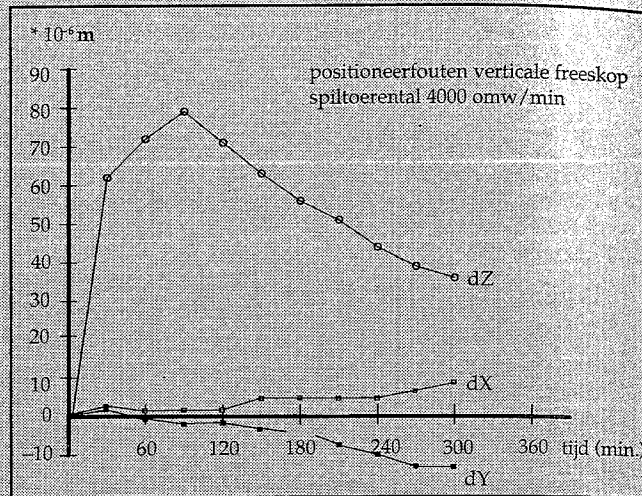
Binnen de vakgroep WPA vindt onderzoek plaats naar de relatie tussen de temperatuur op een aantal plaatsen aan de machine en de afwijkingen in de geometrie. De relatie die de grootte van een bepaalde afwijking beschrijft als functie van de plaats krijgt hierdoor als extra parameter de temperatuursverdeling. Het nadeel van deze benadering is dat relatief veel geometriemetingen dienen te worden uitgevoerd bij verschillende thermische toestanden van de machine.

Het voordeel zit in het feit dat de benodigde correctietermen voor de afwijkingen in de geometrie kunnen worden bepaald afhankelijk van de thermische toestanden van de machine, waardoor de machine variabel corrigeerbaar wordt en opwarmtijden, nodig om een thermisch stabiele machine te verkrijgen, belangrijk ingekort kunnen worden. De gezochte relatie tussen geometrie-afwijking en temperatuursverdeling dient met geschikte wiskundige en statistische hulpmiddelen te worden bepaald.

Men moet zich wel realiseren dat ook temperatuursverschillen tussen machine en werkstuk aanleiding geven tot fouten in de werkstukgeometrie. Een werkstuk gemaakt uit aluminium met een lengte van 1 m heeft bij een temperatuurverschil van 10 °C met de machine een relatieve verlenging van $(23-11) \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10 = 120 \cdot 10^{-6} = 0.12 \text{ mm}$, dus een respectabele waarde.

De besturing

De besturing van een gereedschapswerktuig controleert en coördineert, via de aandrijving en het meetsysteem, de verschillende bewegingen van het gereedschap en/of werkstuk. De besturing



Figuur 6 De positioneerfouten tijdens het opwarmen (toerental 4000 omw/min).

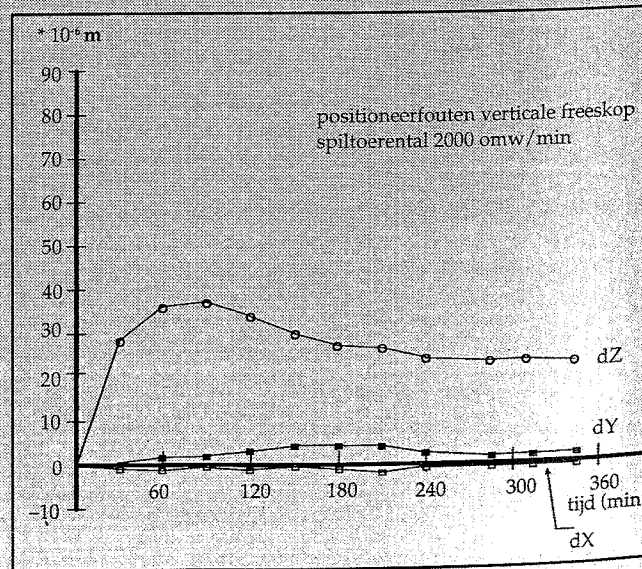
heeft een drietal taken:

- **Rekentaak:** Aan de hand van de gegevens betreffende de contour en het materiaal worden de stuurgrootheden voor de aandrijving van slede en hoofdspil berekend.
- **Regeltaak:** De resultaten van destuursignalen worden gecontroleerd en eventueel door terugkoppelsystemen bijgesteld. Het betreft hier vooral terugmeldingen van positie-signalen. De snelheidssignalen worden via het servo-systeem geregeld.
- **Logische taak:** Toestandsgrootheden, zoals bijvoorbeeld het koelmiddel

en de eindschakelaars van de sleden, worden bewaakt of geschakeld.

Afwijkingen ten gevolge van de besturing zijn te verdelen in tijdseffecten, drift en "off"-positie, en uiten zich met name bij het beschrijven van bewegingen die niet parallel lopen aan een van de assen.

Door de steeds sneller wordende processoren in de besturingen, worden de fouten in de baanbesturing kleiner en kunnen de contouren sneller worden gevolgd. Vooral bij het werken met snelloopspliden en hoge voedingssnelheden is dit van groot belang.



Figuur 7 De positioneerfouten tijdens het opwarmen (toerental 2000 omw/min).

Periodieke controles

Teneinde de nauwkeurigheid van een machine te bewaken is het noodzakelijk periodiek een controle uit te voeren. Het is bij zo'n controle niet noodzakelijk de gehele afwijkingenstructuur opnieuw vast te leggen, maar om te zien of zich veranderingen hebben voorgedaan. Het is dan ook de vraag of in deze periodieke controle het thermische gedrag en de stijfheid moeten worden opgenomen, beide factoren zijn voornamelijk afhankelijk van de constructie van de machine en zullen door slijtage nauwelijks wijzigen. De geometrie is wel afhankelijk van de slijtage en zal zeker in het geval van botsingen gecontroleerd moeten worden. Om veranderingen in de geometrie te bepalen kan een aantal tests worden uitgevoerd. De belangrijkste op dit moment zijn:

1. De positioneerstest volgens VDI 3441 (zie ook hoofdstuk Geometrie);

2. De "Kreisform"-test;

3. De produktie van proefwerkstukken.

De kreisformtest [KNAP83] is een testmethode die een aantal jaren geleden is ontwikkeld en uitgewerkt door Dr. W. Knapp. Het principe bestaat uit het meten van het verschil tussen een door de produktiemachine uitgevoerde cirkelbaan en een nominaal perfecte cirkel, aanwezig in een hulpstuk. De test wordt uitgevoerd door een meettaster in de gereedschapopname te plaatsen en deze de afwijking tussen een geprogrammeerde en een nominale cirkel te laten meten.

Het doel van deze test is tweeledig. Enerzijds kunnen de aandrijving en besturing gecontroleerd worden, anderzijds is het ook mogelijk om met deze methode de geometrie van de machine in onbelaste toestand te controleren.

Om de machine geometrisch te controleren kan

men ook overwegen één of meer werkstukken te maken en deze vervolgens nauwkeurig te meten. Werkstukken die hiervoor in aanmerking komen zijn bijvoorbeeld werkstuk VDI 2851 of het bekende NAS-werkstuk (National Aerospace Standards). Het grote voordeel van het maken van proefwerkstukken is dat men de zekerheid heeft dat alle invloeden die de nauwkeurigheid verstoren in het resultaat worden meegenomen. Een nadeel is dat men altijd een steekproef neemt van het werkvolume, zodat geen garantie kan worden gegeven voor de haalbare nauwkeurigheid van een willekeurig produkt. Om het risico van een onjuiste goedkeur te beperken kan men overwegen om verschillende produkten te maken, verspreid over het hele werkvolume van de machine.

Conclusie

De nauwkeurigheid van gereedschapswerktuigen is afhankelijk van een

groot aantal factoren. Gelukkig is het zo, dat men in de meeste gevallen uiterst tevreden kan zijn over de kwaliteit en nauwkeurigheid van de moderne machines. Is men echter verplicht hoognauwkeurige produkten in kleine series te produceren, dan zal men zeker op een aantal problemen stuiten. De temperatuur blijkt hierbij een grote rol te spelen en is daarom een van de onderzoekgebieden, waar op dit moment veel aandacht aan wordt besteed.

Literatuur

[1] KNAP 83, W. Knapp, Circular tests for three coordinate measuring machines and machine tools, *Prec. Engineering*, vol. 5, nr. 3, p.115-124, 1983

[2] TEEU 89, J. W. Teeuwsen, Performance evaluation and a quality control system for three dimensional measuring machines, dissertatie T.U. Eindhoven, 1989