

## Bepaling van het thermisch gedrag van verspanende machines

***Citation for published version (APA):***

Theuws, F. C. C. J. M. (1991). Bepaling van het thermisch gedrag van verspanende machines. *MB Produktietechniek*, 57(2), 45-49.

***Document status and date:***

Published: 01/01/1991

***Document Version:***

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

***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](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Bepaling van het thermisch gedrag van verspanende machines



Ir. F.C.C.J.M. Theuws,  
Laboratorium voor Geometrische  
Meettechniek, T.U. Eindhoven

**Bij verspanende machines zijn - behalve de fabricage-onnauwkeurigheden in de geleidingen en de eindige machinestijfheid - de thermische invloeden een belangrijke bron van afwijkingen. Voor een onderzoek naar de nauwkeurigheid van produktiemachines is een meetopstelling gebouwd waarmee het thermisch gedrag kan worden bepaald. Met deze opstelling is op de T.U. Eindhoven een groot aantal driftmetingen uitgevoerd aan een 5-assige freesmachine. Op basis van de resultaten is een model gegenereerd dat de drift van het gereedschap t.o.v. het werkstuk kan voorspellen als functie van de temperatuurverdeling van de machine. Het model kan in een later stadium leiden tot het via de besturing corrigeren van de thermische drift. De meetopstelling, de gemeten verplaatsingen en de validiteit van het ontwikkelde model zijn in dit artikel beschreven.**

## Inleiding

De nauwkeurigheidseisen voor verspanende machines worden steeds hoger; de verwachting is dat deze trend zich nog enige jaren zal voortzetten [1]. Aangezien de produktiemethode voor de geleidingen van deze machines in de loop der jaren is geoptimaliseerd, is een verdere verbetering op dit vlak nauwelijks haalbaar. Om te kunnen voldoen aan de vraag naar machines met hogere nauwkeurigheden is het nodig dat alle factoren die de nauwkeurigheid beïnvloeden in kaart worden gebracht. Vandaar dat op een aantal plaatsen wereldwijd onderzoek is gestart naar de bronnen van onnauwkeurigheden van verspanende machines, om tenslotte de resulterende totale afwijking in het produkt te kunnen vaststellen. Al geruime tijd is bekend dat - naast de afwijkingen in de sledebewegingen en de eindige stijfheid van de machine - het vervormen van de machineconstructie door thermische oorzaken een grote invloed heeft op de uiteindelijke produkt-nauwkeurigheid [2]. Het bepalen van het thermisch gedrag van machines heeft dan ook terecht grote aandacht van fabrikanten en onderzoekers. De uit het onderzoek verkregen resultaten kunnen worden gebruikt om de machine hardware- dan wel softwarematig te corrigeren, dat wil zeggen: constructief dan wel via de besturing te verbeteren. Tegenwoordig worden drie methoden gebruikt om het thermisch gedrag van een constructie te bepalen:

1. Op basis van materiaalspecifieke eigenschappen, zoals warmtegeleiding, uitzetting en soortelijke massa, bepaalt men een analytisch model van de constructie. Vervolgens bepaalt men de grootte van de warmtebronnen, het temperatuurbeeld en de vervormingen.
2. De constructie wordt gemodelleerd als een eindig aantal knooppunten; deze methode staat bekend als de eindige elementenmethode. Met gegeven warmtebronnen kan hiermee het temperatuurbeeld en de vervorming worden berekend.
3. Men maakt geen thermisch-analytisch model van de machine, maar bepaalt empirisch de relatie tussen de vervorming en de temperatuur op een aantal plaatsen van de machine.

Iedere methode heeft voor- en nadelen. Zo is de handicap bij de eerste twee methoden het aangeven van de grootte van de warmtebronnen [3]. Verder kunnen eigenschappen als warmtegeleidings- stralings- en convectie-coëfficiënten sterk variëren per aard en toestand van de constructie (kleur, smeer- en koelmiddel, luchtstroming, enz.).

Meestal zijn lang niet van alle machineconstructies tekeningen aanwezig voor het bepalen van de verschillende elementdimensies, hetgeen een probleem kan zijn bij het opstellen van een analytisch model.

Door deze onzekerheden is de praktische betekenis van de eerste twee methoden tot nu toe zeer beperkt gebleven. Het voordeel van deze methoden is echter dat wanneer een constructie thermisch wel goed kan worden berekend, in principe alle thermische situaties en daarmee de vervormingen kunnen worden voorspeld.

De derde methode heeft als belangrijk nadeel dat in de praktijk on-eindig veel thermische situaties kunnen optreden (afhankelijk van de begintemperatuur, de belastingsituatie van de machine, de ontwikkeling van de ruimtetemperatuur enz.), die alle in de metingen zouden moeten worden betrokken. Dit geeft praktische bezwaren, zodatslechts enige relevante thermische toestanden in de metingen kunnen worden opgenomen. Het grote voordeel van deze methode is de eenvoud en de snelheid waarmee de metingen kunnen worden uitgevoerd en de directe, praktische bruikbaarheid van de resultaten.

## Onderzoek naar thermisch gedrag

In oktober 1987 werd op de Technische Universiteit Eindhoven een, door de Stichting voor de Technische Wetenschappen gefinancierd, project gestart dat tot doel heeft een aanzet te geven tot de bepaling van de onnauwkeurigheid van produktiemachines. Als uitbreiding van dit project is op 1 november 1989 een door de EG gefinancierd project van start gegaan waaraan behalve de T.U. Eindhoven nog drie partners deelnemen. Voor dit project is een 5-assige produktiemachine ter beschikking gesteld, die als onderzoeks-object dient voor het bepalen en corrigeren van afwijkingen ten gevolge van geometrisch en thermisch gedrag.

Als benadering voor het bepalen en corrigeren van het thermisch gedrag is op de T.U. Eindhoven gekozen voor het empirisch model, omdat ervaringen van collega-onderzoekers hebben aangetoond dat analytische benaderingen nauwelijks praktisch bruikbare correc-

ties opleveren. Hieronder is aangegeven op welke wijze bij dit project het thermisch gedrag van de aanwezige produktiemachine wordt bepaald.

### Opstelling ter bepaling van het thermisch gedrag

Als men spreekt over de thermische drift van een machine is men in het algemeen minder geïnteresseerd in de drift van de afzonderlijke machinedelen, maar meer in de drift van het gereedschap t.o.v. het werkstuk. Men heeft dus een meetopstelling nodig die deze drift onder thermische belasting kan bepalen. Om een relatie te leggen tussen de drift en de temperatuur van de machine is het noodzakelijk dat op een groot aantal plaatsen van de machine de temperatuur wordt bepaald. Om aan deze eisen te voldoen, is een opstelling gebouwd die uit twee delen bestaat:

1. de verplaatsingsmeting van de hoofdspil t.o.v. de werkstuktafel;
2. de meting van de thermische situatie.

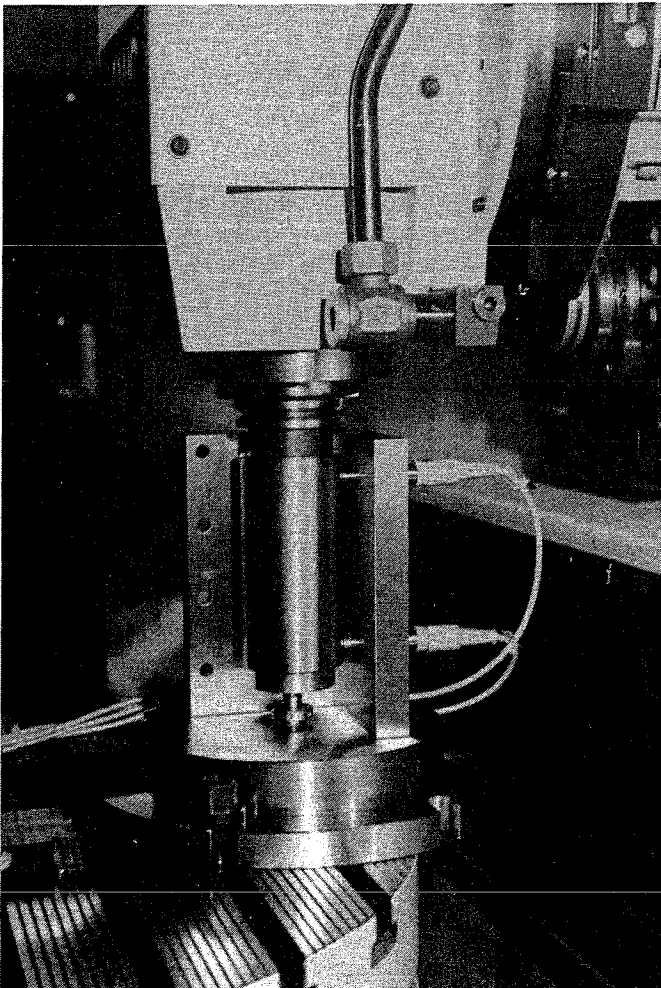
Ad 1. De machine is op de plaats van het gereedschap van een cilinder voorzien. Met behulp van inductieve sensoren kan de verplaatsing van de cilinder in verschillende richtingen gelijktijdig worden bepaald. De inductieve sensoren zijn afzonderlijk gekalibreerd met een verplaatsingsopnemer. Deze kalibratie is uitgevoerd in de uiteindelijke opstelling. De sensoren zijn gekoppeld aan een meetversterker die alle signalen gelijktijdig kan uitlezen en ze via een interface naar een computer kan zenden. De foto (figuur 1) toont de opstelling voor het bepalen van de drift.

Ad 2. Verspreid over de machine zijn verscheidene temperatuursensoren geplaatst (figuur 2). De sensoren van het Pt-100 type zijn met warmtegeleidende pasta op het blanke machine-oppervlak geplaatst en gefixeerd. De sensoren zijn verbonden met een schakelkast voor maximaal 100 sensoren; ze worden gemeten door een digitale voltmeter. Deze voltmeter kan de gemeten waarden via

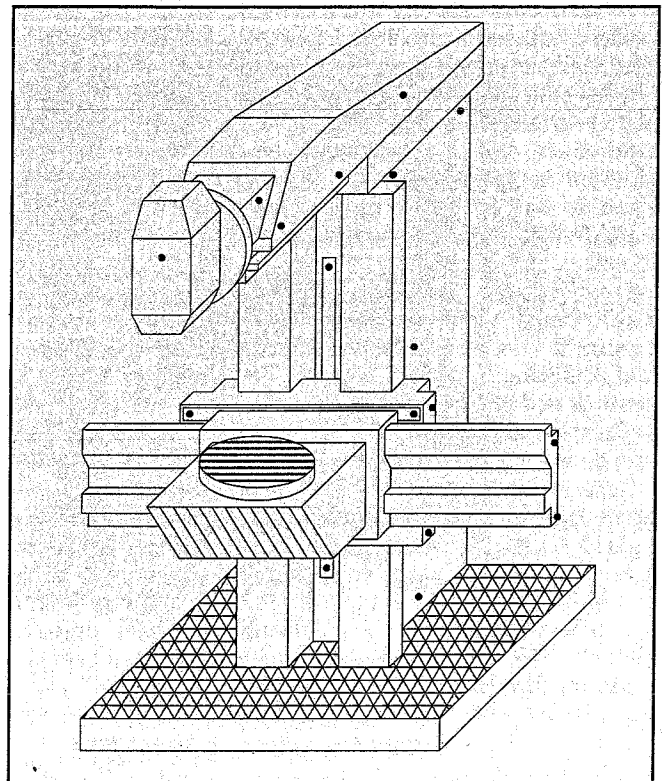
een interface naar de computer zenden, die vervolgens - met behulp van sensorspecifieke constanten - de temperatuur berekent. Iedere temperatuursensor is binnen het Laboratorium voor Geometrische Meettechniek gekalibreerd met een onnauwkeurigheid kleiner dan  $0,1^{\circ}\text{C}$ , hetgeen voor deze toepassing voldoende is [4].

Uit eerdere metingen is gebleken dat de warmteontwikkeling in de hoofdspillagers en die in de spilaandrijving, de belangrijkste warmtebronnen in de machine zijn [5]. Dit betekent voor het model dat de warmteontwikkeling in de aandrijfmotoren en de invloed hiervan op de thermische vervormingen van de machine voorlopig buiten beschouwing worden gelaten.

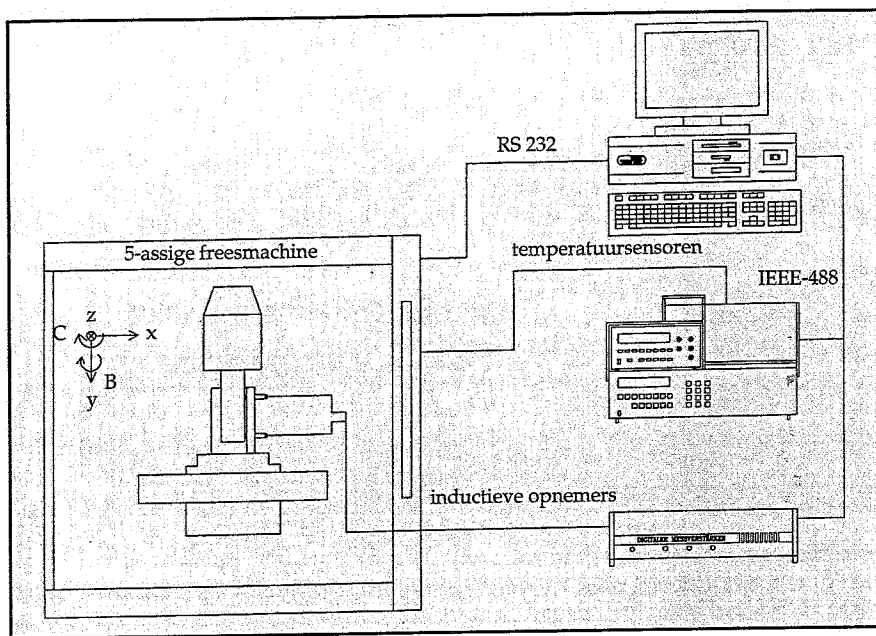
Bij de praktische uitvoering van de driftmetingen wordt de cilinder dicht bij de inductieve sensoren geplaatst, waarna de machine een bepaalde arbeidscyclus van de hoofdspil wordt voorgeschreven. Gelijktijdig wordt iedere minuut de drift van de cilinder t.o.v. de werkstuktafel en de temperatuurverdeling van de machine bepaald. Het geven van opdrachten aan de machine verloopt volledig automatisch via een aan de machine gekoppelde PC. Figuur 3 geeft een overzicht van de totale meetopstelling en de interfaces tussen de verschillende instrumenten.



Figuur 1 Opstelling ter bepaling van drift: cilinder en sensoren



Figuur 2 Positie van de temperatuursensoren op de machine



**Figuur 3** Schets van de meetopstelling voor het bepalen dan de thermische drift van de hoofdspil ten opzichte van de werkstuktafel

het verloop van de temperatuur van een aantal sensoren te zien bij een belasting-cyclus van 5000 omw / min gedurende 6 uur, gevolgd door een stilstand van 8 uur. Duidelijk is waarneembaar dat bij continue warmte-input de opbouw- en afkoelkrommen exponentiële functies zijn.

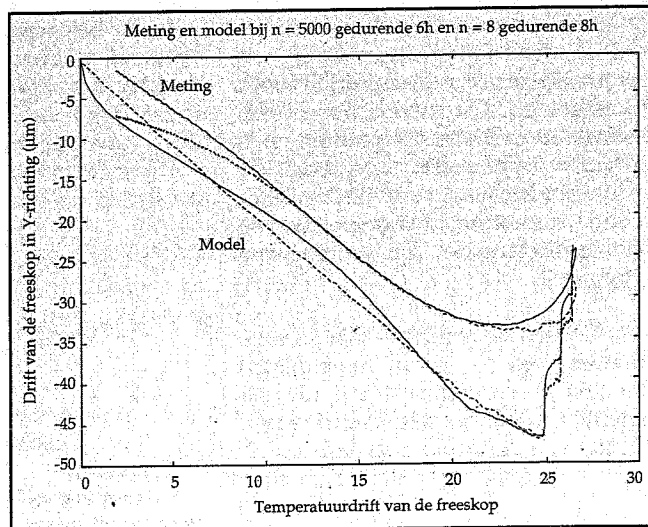
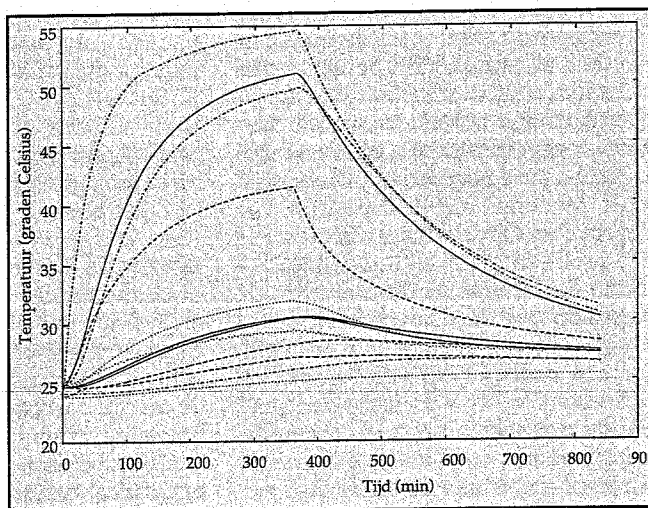
Uit de metingen van figuur 4 is een opmerkelijk feit af te leiden. Wanneer aan de freeskop een temperatuurstijging van ongeveer 25 graden Celsius wordt gemeten kan de driftwaarde in y-richting, afhankelijk van het feit of de machine aan het opwarmen dan wel aan het afkoelen is, resp. 52 en 40  $\mu\text{m}$  bedragen. In de Z-richting is de lusvorm in de meting nog groter en kan bij 25 graden Celsius temperatuurstijging van de freeskop de voorspelde drift zelfs 40  $\mu\text{m}$  verschillen (47 en 7). Hieruit kan men concluderen dat één temperatuursensor ter bepaling van de drift onvoldoende is.

**Meetresultaten en model**

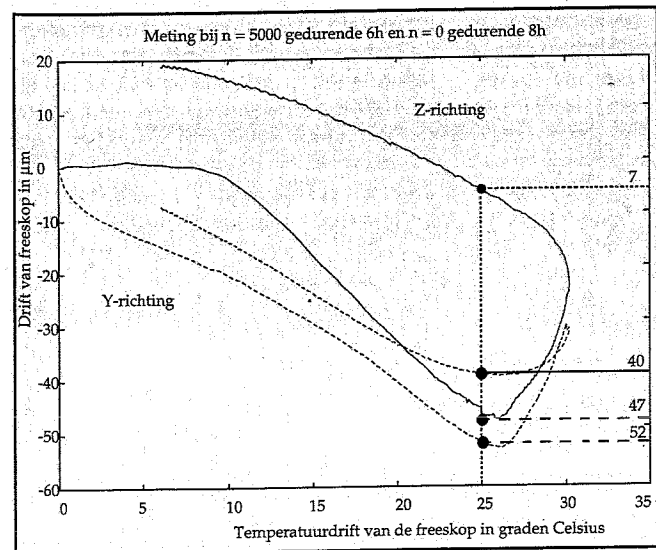
Met de beschreven opstelling zijn een aantal meetcycli uitgevoerd zonder gebruikmaking van de door de fabrikant reeds aangebrachte temperatuurcorrectie. In figuur 4 is het resultaat te zien van een driftmeting aan de hoofdspil bij 5000 omw./min gedurende 6 uur, gevolgd door een stilstand van 8 uur. Op de horizontale as is de temperatuurvariatie van de freeskop uitgezet in graden Celsius; op de verticale as de drift in  $\mu\text{m}$ . De hoofdspil stond bij deze meting in het centrum van het werkvolume.

Om een idee te geven van het temperatuurbeeld van de machine tijdens een dergelijke driftmeting, is in figuur 5

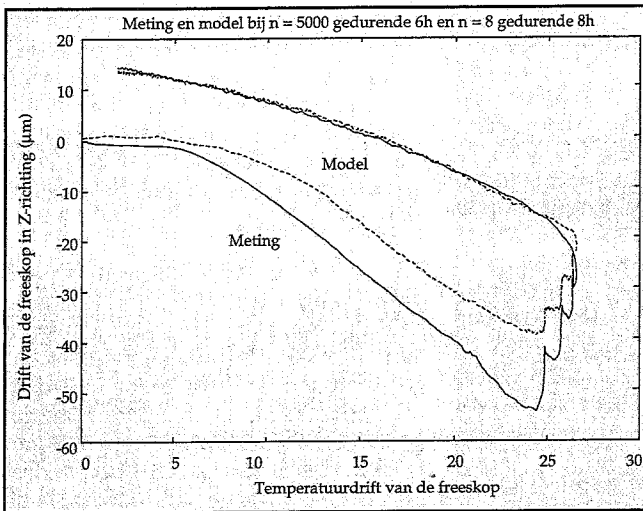
**Figuur 5** Temperatuurbeeld bij een belasting van 500 omw/min gedurende 6 uur, gevolgd door 8 uur stilstand



**Figuur 6** Driftmeting van de freeskop in Y-richting, samen met de voorspelde drift



**Figuur 4** Driftmeting in Y- en Z-richting



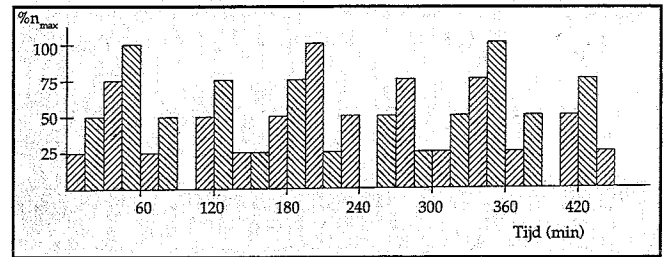
**Figuur 7** Driftmeting van de freeskop in Z-richting, samen met de voorspelde drift

Uit de meetgegevens wordt met behulp van de computer bepaald welke temperatuursensoren relevant zijn voor een bepaalde driftrichting (X, Y of Z). Daarna wordt een relatie bepaald tussen de temperatuurdift op een aantal plaatsen en de positiedrift van de hoofdspil. Het spreekt voor zich dat - om een representatieve relatie te verkrijgen - men een groot aantal metingen moet uitvoeren, met een spectrum van toerentallen. Op deze wijze wordt bereikt dat voor een gegeven temperatuursituatie de bijbehorende drift van de hoofdspil kan worden voorspeld.

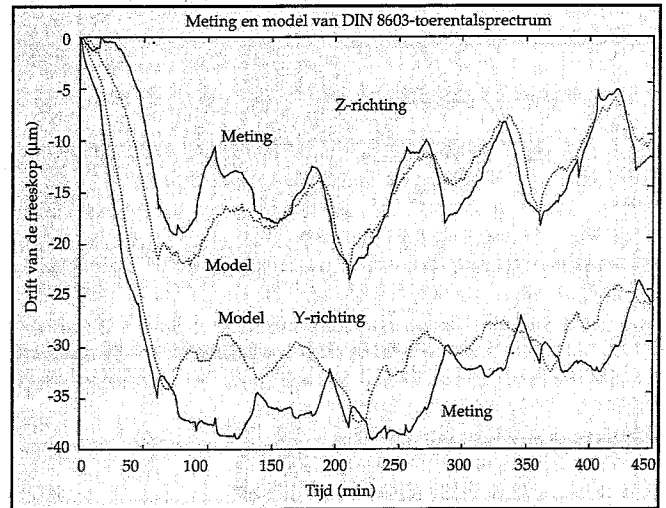
Met deze methode is uit de metingen een voorspelling gegenereerd ten aanzien van de drift. In de figuren 6 en 7 zijn de metingen uit figuur 4 gepresenteerd, samen met de voorspelling zoals die berekend is met het thermisch model.

Om een produktcyclus te simuleren is een driftmeting uitgevoerd bij een toerentalspectrum zoals dat in DIN 8602 is vastgelegd. Dit toerentalspectrum bestaat uit cycli van 15 minuten en is grafisch weergegeven in figuur 8. De resultaten hiervan voor de Y- en Z-richting, samen met de voorspelling van het thermisch model, zijn weergegeven in figuur 9.

Tijdens de metingen zijn geen simulaties uitgevoerd van verspaningskrachten. De reden hiervoor is dat aangenomen wordt dat nauwkeurige producten vrijwel altijd worden naverstaand, waarbij de optredende krachten ten opzichte van de machinestijfheid zo gering zijn, dat de hierdoor veroorzaakte afwijking ten opzichte van de thermische drift is te verwaarlozen.



**Figuur 8** DIN 8602-toerentalspectrum



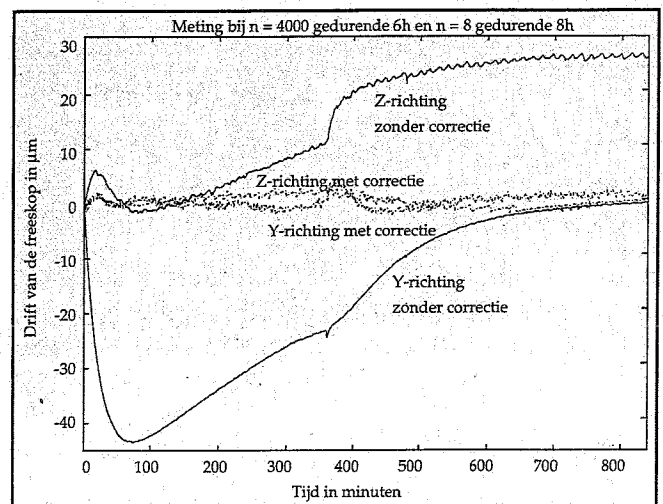
**Figuur 9** Driftmeting in Y- en Z-richting van DIN 8602-toerentalspectrum, samen met de voorspelde drift

**Correctie op machine**

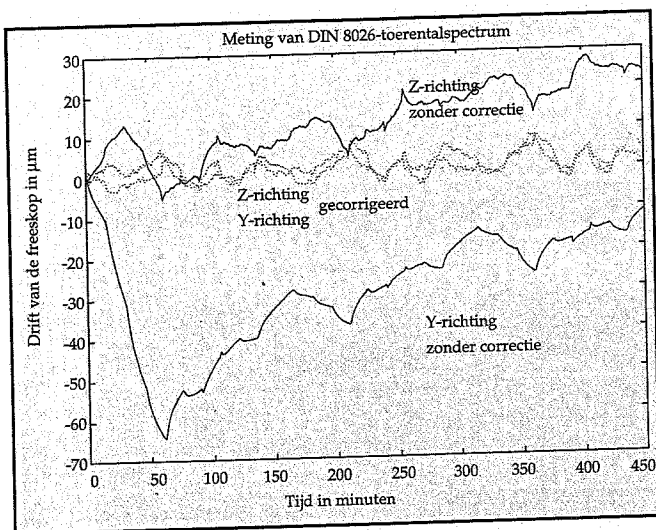
Het model van de temperatuurdift, zoals dat uit de metingen is gedestilleerd, is in een IBM-compatible PC gebracht. Tijdens een arbeidscyclus van de machine worden iedere minuut alle relevante temperatuursensoren gemeten. Met behulp van het model wordt een driftcorrectiewaarde berekend die vervolgens naar de besturing van de machine wordt gezonden. De machine gebruikt deze waarde om de positie van de hoofdspil t.o.v. de werkstuktafel bij te corrigeren.

Wanneer nu een driftmeting wordt uitgevoerd met de ingebrachte correctie actief, dan blijkt dat het verloop van de positie van de hoofdspil teruggebracht kan worden tot ongeveer 50% van de originele waarde, afhankelijk van de richting, het belastingspectrum en de positie op de machine.

In figuur 10 zijn de resultaten aangegeven van een driftmeting bij een toerental van 4000 omw/min gedurende 6 uur en een afkoelperiode van 8 uur.



**Figuur 10** Driftmetingen van de freeskop in Y- en Z-richting met en zonder correctie



**Figuur 11**  
Driftmeting van  
DIN-toerental-  
spectrum in Y- en  
Z-richting met en  
zonder correctie

Hierbij is een meting gedaan zonder enige correctie en een meting met de door de PC ingebrachte berekende correctie.

Uit de meting is af te leiden dat de toegepaste correctie zeer goed functioneert bij een belasting van één toerental. Dit geeft echter een vertekend beeld van de effectiviteit van de correctie, omdat in het model ook een meting is betrokken die uitgevoerd is onder een vergelijkbare thermische belasting. Om de praktische situatie, waarin sterk wisselende toerentallen kunnen optreden, te benaderen is een meting uitgevoerd met een toerentalspectrum zoals gespecificeerd in DIN 8602 (zie figuur 8). De resultaten met en zonder correctie zijn gepresenteerd in figuur 11.

### Conclusies en aanbevelingen.

Uit de resultaten van het onderzoek kan worden geconcludeerd dat de gekozen empirische benadering een goede aanzet is om tot vergaande eliminatie van thermische drift te komen. Toch is er een aantal beperkingen.

1. Men kan niet alle thermische situaties in het model betrekken, zodat een toestand van de machine kan ontstaan die niet gemodelleerd is en waardoor de correctie minder goed functioneert.
2. De driftmeting kan slechts met stilstaande sledes worden uitgevoerd,

waardoor de warmtestromen in de machine wezenlijk anders zijn dan bij bewegende assen, zoals in de praktische situatie het geval is.

3. Een reëel gevaar van de gekozen empirische methode is dat men temperatuursensoren in het model betreft die niets te maken hebben met de optredende drift. Dit verschijnsel staat bekend als "overfitting". In praktijk betekent dit dat het model van de metingen beter wordt, maar dat de voorspelling van een later optredende drift veel slechter kan zijn. Men kan dit trachten te omzeilen door sensoren die nauwelijks enig analytisch verband kunnen hebben met de richting van de drift zoveel mogelijk uit het model te elimineren. Ook sensoren met zeer kleine temperatuurvariaties zijn verdacht, hoewel men hier geen voorbarige conclusies mag trekken.

Verder is tijdens onderzoek gebleken dat de nodige aandacht moet worden besteed aan het elimineren van het effect van de tijdconstanten in de temperatuursensoren. Want hoewel deze bij "normaal" gebruik nauwelijks een relevante afwijking veroorzaken, is het bij deze metingen - waarbij de temperaturen onder invloed van grote warmtebronnen relatief snel variëren - gevaarlijk deze bron van afwijkingen te verwaarlozen [4].

Omdat de bij het onderzoek gemeten drift alleen wordt veroorzaakt door de warmteontwikkeling in de hoofdspil, zal in de toekomst ook de invloed van de aandrijfmotoren en het verspaningsproces nog dienen te worden onderzocht.

Tenslotte kan evenwel worden vermeld dat de huidige, eenvoudige correctie van de thermische drift bij een 5-assige freesmachine meer dan een factor 2 beter is dan bij een ongecorrigeerde machine. Het zal duidelijk zijn dat de gekozen methode veelbelovend is, zeker als de hier genoemde problemen kunnen worden opgelost.

### Dankwoord

De auteurs spreekt bij deze zijn dank uit voor de hulp die hij tijdens het onderzoek heeft ontvangen van alle medewerkers van de groep Geometrische Meettechniek van de T.U. Eindhoven. Een speciaal woord van dank gaat uit naar ir. J.A. Soons, die de nodige mathematische ondersteuning heeft gegeven, naar ir. H.A.M. Spaan, die de temperatuurmeetopstelling heeft gekalibreerd en naar technisch medewerker J.W.G. Cauwenberg, die de complete driftmeetopstelling bouwde.

### Literatuur

- [1] Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing; N. Taniguchi; CIRP Vol 32/2, 1983.
- [2] Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools; R. Venugopal; CIRP Vol 35/1, 1986.
- [3] Thermally induced errors; R. McClure; Technology of machine tools, Vol. 5, 1980.
- [4] Kalibratie van een 60-punts temperatuurmeetopstelling; H.A.M. Spaan; WPA-rapportnr. 0942, oktober 1990.
- [5] Geometrisches Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Last; A. Kersten; Dissertatie, Aken, 1983.