

Het thermisch gedrag van verspanende machines

Citation for published version (APA):

Spaan, H. A. M. (1992). *Het thermisch gedrag van verspanende machines*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1399). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

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.

Het thermisch gedrag van verspanende machines.

Tekst en sheets van lezing voor het Regionaal
Centrum Werktuigbouwkunde d.d. 29 September
1992 te Eindhoven

Ir. H.A.M. Spaan

Rapport nr: WPA 1399, September 1992.

Het thermisch gedrag van verspanende machines

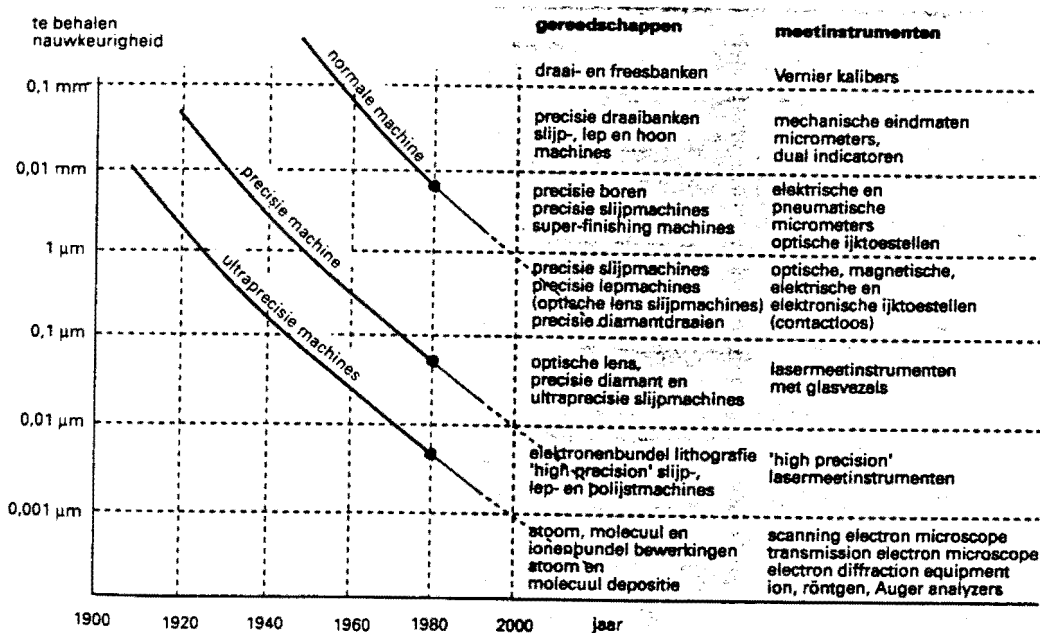
Ir. H.A.M. Spaan
 Technische Universiteit Eindhoven
 Sectie: Precision Engineering

Samenvatting:

Binnen de groep Precision Engineering van de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven wordt onderzoek verricht naar methodes om de nauwkeurigheid van produktiemachines te verbeteren met behulp van software correctie. Hiertoe wordt uitgebreid onderzoek gedaan naar de grootste bronnen van afwijking, welke optreden gedurende het bewerkingsproces. Uit dit onderzoek bleek dat het thermisch gedrag de grootste afwijkingen bron vormt in bewerkingsmachines. Het thermisch gedrag zal dan ook uitgebreid aan de orde worden gesteld. Het onderzoek heeft geleid tot een software correctie voor deze thermische afwijkingen. De resultaten van de software correctie zullen worden besproken. Teneinde de uiteindelijke nauwkeurigheid van de machine vast te stellen gedurende bewerkingen is tevens een nieuw type proefwerkstuk ontworpen. Dit proefwerkstuk zal worden besproken. Aan de hand van dit werkstuk zal de te verwachten prestatie van de software correctie worden getoetst. Tevens zullen aanbevelingen worden gedaan tot een verbeterde bewerkingstrategie, wat kan leiden tot een hogere produkt-nauwkeurigheid.

Inleiding

De eisen die door de gebruikers worden gesteld aan de nauwkeurigheid van verspanende produktiemachines worden steeds hoger. De verwachting is dat deze trend zich nog een aantal jaren zal doorzetten (zie figuur 1).



Figuur 1 Verwachting van bewerkingsnauwkeurigheden

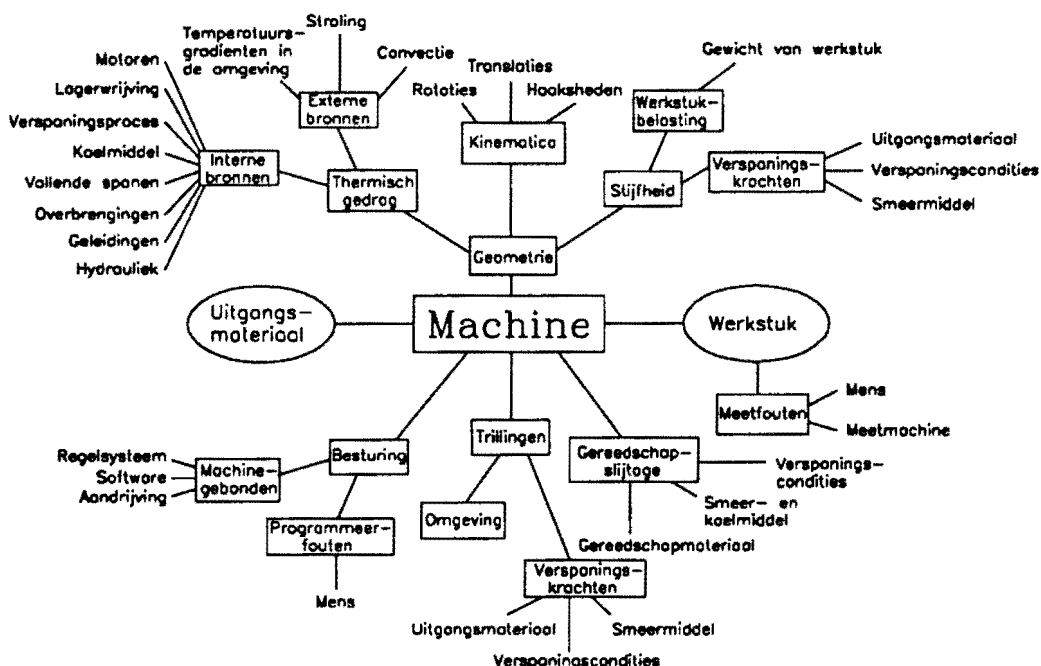
Aangezien de produktiemethode van de geleidingen van deze machines in de loop der jaren sterk is geoptimaliseerd, is een verdere hardwarematige verbetering op dit vlak nauwelijks haalbaar. Teneinde te voldoen aan de vraag naar machines met nog hogere nauwkeurigheid is men genoodzaakt om alle factoren die de productie-nauwkeurigheid beïnvloeden in kaart te brengen. Daarom is op een aantal plaatsen onderzoek gestart naar de bronnen van afwijkingen bij verspanende machines en de beschrijving van de totale resulterende afwijking in het produkt.

Op 1 januari 1990 is aan de Technische Universiteit Eindhoven een onderzoek gestart naar deze bronnen van afwijking. Dit onderzoek wordt uitgevoerd samen met nog drie andere partners: Maho, Philips Machine Tool Controls en PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt). Het project wordt financieel ondersteund door BCR (een van de EG-fondsen).

De opdracht van het project gaat verder dan het alleen in kaart brengen van bronnen van afwijking. Het uiteindelijke doel van het project is het realiseren van een hogere produkt-nauwkeurigheid door middel van softwarematige compensatie van reproducerende afwijkingen.

Overzicht afwijkingen gereedschapsmachines

In figuur 2 wordt een overzicht gegeven van bronnen van afwijking, welke op kunnen treden gedurende de bewerking van een produkt.



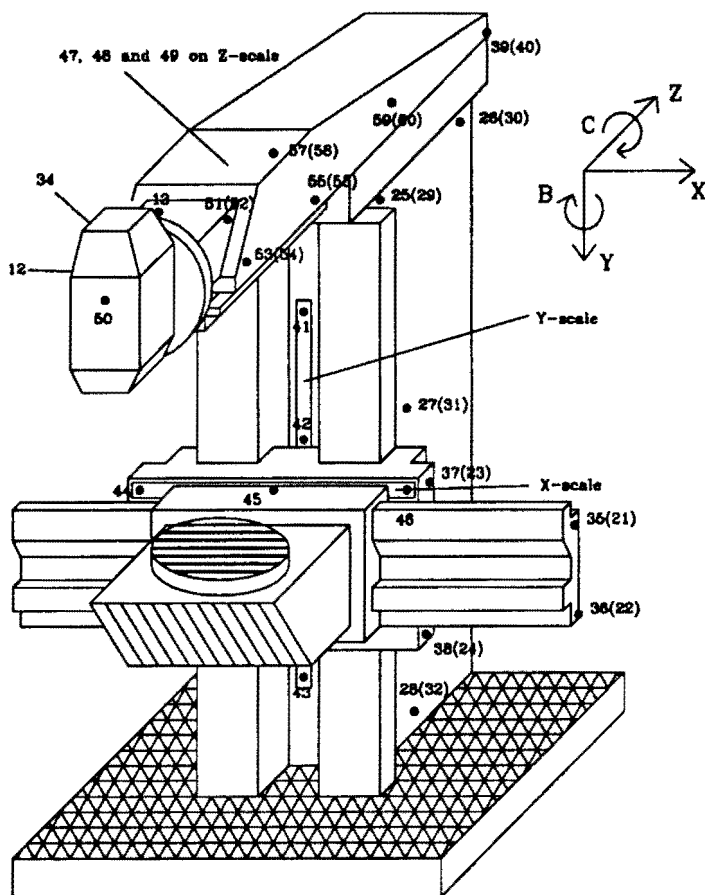
Figuur 2 Overzicht van factoren die de nauwkeurigheid beïnvloeden

Als belangrijkste factoren die de nauwkeurigheid beïnvloeden, worden de volgende drie afwijking bronnen nader geanalyseerd:

- Geometrie
- Eindige stijfheid
- Thermisch gedrag.

Deze drie afwijkingen dragen samen bij tot meer dan 70% van de totale machine onnauwkeurigheid.

Het onderzoek wordt toegepast op een vijf-assige freesmachine, welke door Maho ter beschikking is gesteld. Er is voor een vijf-assige machine gekozen, vanwege de hoge mate van complexiteit van de afwijkingen. Bij deze machine zijn de aanwezige software compensaties verwijderd, teneinde een goed inzicht te krijgen in de werkelijke afwijking. Tevens is voor deze machine gekozen vanwege een goed reproducerend gedrag van de afwijkingen, wat noodzakelijk is voor een software correctie. In figuur 3 is een schematische presentatie weergegeven van de beschikbare machine.



Figuur 3 Schematische weergave van de 5-assige freesmachine met de locatie van de temperatuursensoren

Thermisch gedrag

Bij het onderzoek naar het thermisch gedrag is gekeken naar de vervormingen van de diverse elementen bekeken onder invloed van temperatuursvariaties. Hierbij is in eerste instantie onderzoek gedaan naar de invloed van interne warmtebronnen. Externe omgevingsinvloeden zijn geëlimineerd door conditionering van de omgeving.

De volgende elementen zijn nader geanalyseerd:

1) Machinestructuur

De temperatuursvariaties in de machinestructuur zijn vastgesteld met behulp van een infrarood camera. Hierbij is de machine belast met een constant toerental. Uit dit onderzoek bleek dat met name de hoofdspil, de hoofdspil lagering en overbrenging de voornaamste warmtebronnen vormen in de machine. Door een goede constructie heeft de hoofdspilmotor geen invloed.

2) Werkstuk

Gedurende het verspanen zal het werkstuk opwarmen door de machine en het verspaningsproces zelf. Zelfs wanneer alleen wordt naverspaand, worden er temperatuursvariaties in het werkstuk vastgesteld van 16°C. Het gebruik van koelmiddel reduceert dit tot 3°C.

3) Gereedschap

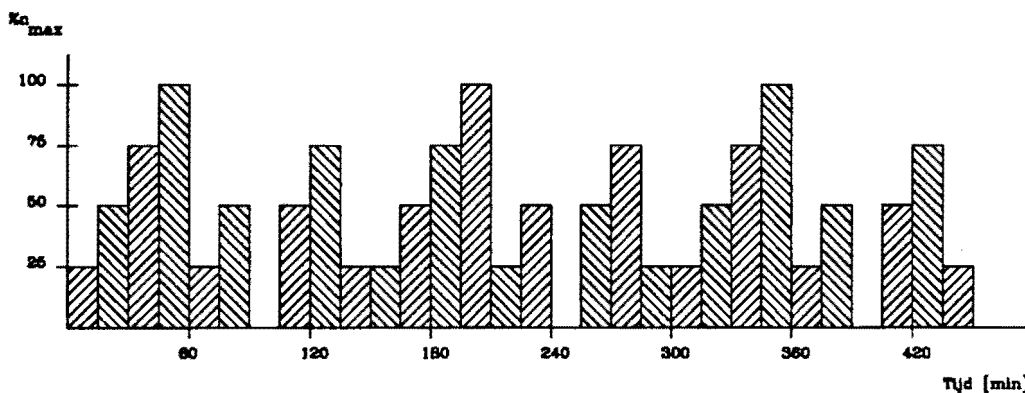
Ook het gereedschap zal zich opwarmen gedurende het bewerkingsproces. Een gereedschap met een lengte van 200 mm vertoont een uitzetting van 20 µm door opwarming vanuit de machine. Wanneer de machine wordt stopgezet, treedt er een snelle expansie op tot 40 µm. Het wisselen van gereedschap in een warme machine dient dus met enige voorzichtigheid te gebeuren.

Resultaten empirisch onderzoek

Het doel van het onderzoek is een compensatie methode, welke toegepast kan worden om het thermisch gedrag van een bewerkingsmachine te verbeteren.

Hiertoe zijn een aantal temperatuursensoren aangebracht op de machine. Door nu de temperatuursverdeling over de machine simultaan te meten met de verplaatsing van het gereedschap, is het mogelijk een empirische relatie vast te stellen tussen deze verplaatsing en relevante temperatuursensoren. Gebruik makend van deze relatie, is het mogelijk om de verplaatsing van het gereedschap te voorspellen uit de temperatuursverdeling over de machine.

De relatie is onder diverse belastingen en op verschillende posities vastgesteld. Bij het vaststellen van de drift van de freeskop onder een belasting volgens DIN 8602 (figuur 5), blijkt dat de eerste 60 minuten de freeskop een grote drift vertoont. Na deze 60 minuten stabiliseert de machine zich.



Figuur 4 Toerental spectrum volgens DIN 8602

De drift van de freeskop is niet alleen afhankelijk van de belasting (toerental), maar ook van de positie van de Z-as. De positie van de X- en Y-as hebben geen invloed. Dit kan op eenvoudige wijze verklaard worden uit het feit dat de warmtebronnen alleen gelokaliseerd zijn in de Z-as.

De orde grootte van de resulterende afwijking is 50 - 130 μm .

Compensatie

Het uiteindelijke doel van het project is het realiseren van een hogere produkt-nauwkeurigheid. Hiertoe is de volgende methode ontwikkeld:

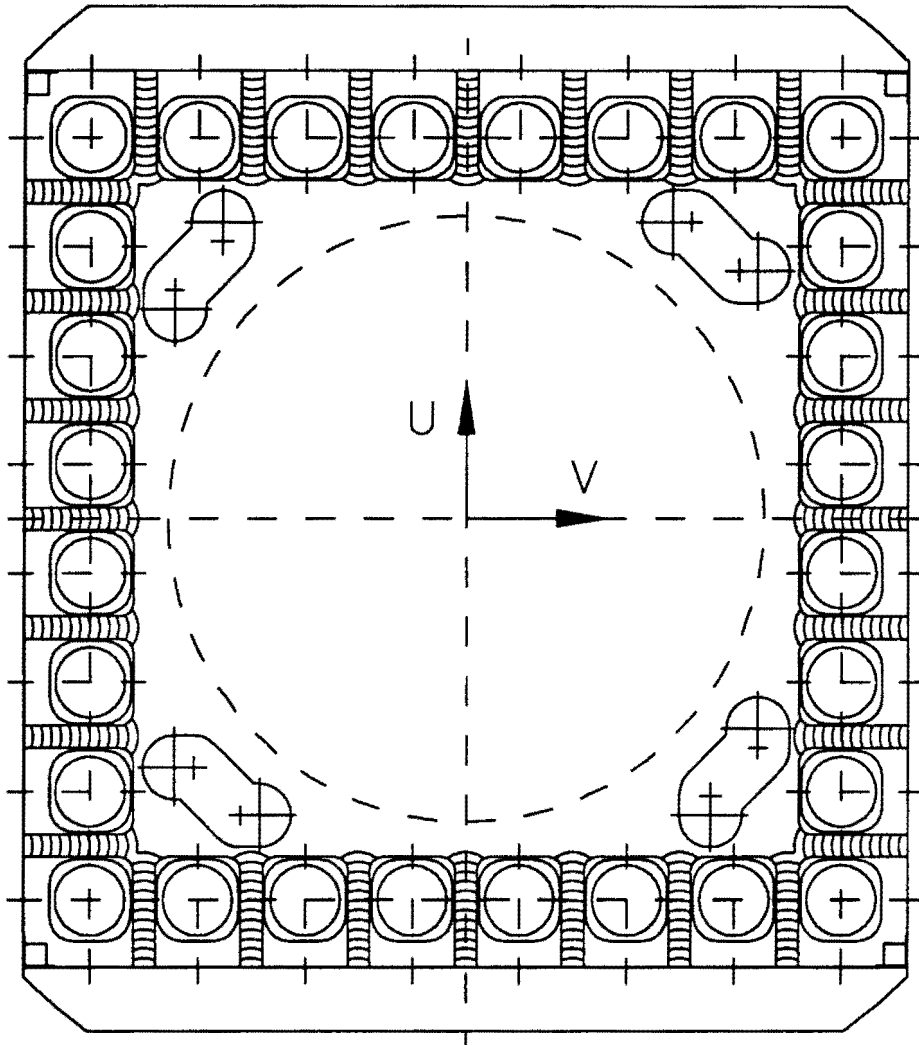
Real-time compensatie

Bij real-time compensatie wordt de correctie rechtstreeks geïmplementeerd in de besturing van de NC-machine. Aangezien de besturing niet in staat is te communiceren met het temperatuurmeetstation, is in eerste instantie de model evaluatie geïmplementeerd op een externe computer. Op grond van temperaturen, gemeten aan de machine, wordt de drift van het gereedschap berekend. Deze drift wordt bepaald als functie van de positie van de Z-as. In de vorm van een compensatie tabel wordt deze drift verstuurd naar de besturing van de machine. Met behulp van deze tabel wordt de drift van het gereedschap verdisconteerd.

De thermische correctie is geverifieerd met behulp van drift metingen, waarbij de meting met en zonder compensatie is uitgevoerd. Er wordt een verbetering gerealiseerd met een factor 3.

Proefwerkstukken

Er bestaan reeds proefwerkstukken om de prestatie van een bewerkingsmachine te valideren (NAS 979, VDI 2851, Blatt 3). Deze werkstukken zijn echter te beperkt om een goed inzicht te geven in het thermisch gedrag van een bewerkingsmachine. Daarom is een nieuw werkstuk ontworpen, waarmee het thermisch gedrag van bewerkingsmachines kan worden vastgesteld (figuur 5).



Figuur 5 Proefwerkstuk

Ter verificatie van de thermische compensatie zijn op verschillende posities proefwerkstukken gefreesd. Hierbij was de machine nog niet gecompenseerd. Op grond van de gemeten temperaturen is naderhand de drift voorspeld. Deze berekende drift wordt afgetrokken van de vastgestelde drift. De overgebleven residuen geven een maat voor de prestaties van het model. Met deze simulatie wordt een potentiële nauwkeurigheidsverbetering vastgesteld met een factor 3. Later zullen deze proefwerkstukken worden gefreesd met de real-time software correctie.

Aanpassen bewerkingsstrategie

Naast compensatie is het ook mogelijk een hogere produkt-nauwkeurigheid te realiseren door de bewerkingsvolgorde aan te passen. Dit geldt vooral voor thermische afwijkingen.

Thermische afwijkingen laten zich reduceren door de machine op te laten warmen. Ook het werkstuk en het gereedschap dienen op temperatuur gebracht te worden, zodat expansies gedurende nauwkeurige bewerkingen zoveel mogelijk worden voorkomen. Ook dient het de aanbeveling koelmiddel te gebruiken, zodat temperatuursvariaties sterk gereduceerd worden. Het werkstuk dient reeds een juiste temperatuur te hebben alvorens het wordt opgespannen. Dit kan gerealiseerd worden door eerst koelmiddel over het werkstuk te laten lopen en dan pas op te spannen. Als laatste aanbeveling dienen nauwkeurige bewerkingen snel achtereen te worden uitgevoerd. Hierdoor zullen temperatuursvariaties minder invloed hebben op de uiteindelijke produkt-nauwkeurigheid.

Het thermisch gedrag van verspanende machines

Lezing R.C.W. d.d. 29 September 1992

**Door: Ir. H.A.M. Spaan
Technische Universiteit Eindhoven
Vakgroep Productietechnologie & Automatisering
Leerstoel Precision Engineering**

Inhoud:

- **Inleiding**
- **Overzicht afwijkingen gereedschapsmachines**
- **Thermisch gedrag**
 - **Analyse thermisch gedrag**
 - **Resultaten empirisch onderzoek**
- **Compensatie afwijkingen**
- **Proefwerkstukken**
- **Aanpassen bewerkingstrategie**

Inleiding

- **Werkkring:**

Sectie Precision Engineering

- **Onderzoek in kader van BCR-project**

- **Periode :**

Januari 1990 - December 1992

- **Partners:**

Maho

Philips Machine Tool Controls

PTB

TUE (coördinator)

- **Opdracht:**

Ontwikkeling van methodes t.b.v. software correctie van gereedschapsmachines.

- **Doel:**

Hogere produkt-nauwkeurigheid

Inleiding

- **Hogere produkt-nauwkeurigheid:**
 - **Betere prestatie en betrouwbaarheid**
 - **Miniaturisatie en integratie**
 - **Mechanisatie**

- **Verbetering nauwkeurigheid productie-proces**

Trend voorspeld door Taniguchi

- **Reduceren machine-onnauwkeurigheid**
 - 1) **Verbeteren hardware**
 - 2) **Modelleren van de bronnen van afwijking & compenseren**

Methode 1: Fysische grenzen; duur

Daarom onderzoek naar de mogelijkheden van methode 2

Overzicht afwijkingen gereedschapsmachines

- **Belangrijkste oorzaken voor de onnauwkeurigheid bij gereedschapsmachines**
 - Geometrie
 - Eindige stijfheid
 - Thermisch gedrag
 - > 70%

- **Onderzoek naar compensatie methodes**
 - Reproducerende afwijkingen

- **Onderzoek toegepast op C-type freesmachine met 5 assen**

Thermisch gedrag

Analyse thermisch gedrag

Vervorming van de diverse elementen onder invloed van temperatuursvariaties

- interne warmtebronnen
- conditionering omgeving

- 1) Machinestructuur
- 2) Werkstuk
- 3) Gereedschap

1) Machinestructuur

Belangrijkste bronnen

- Hoofdspil
- Hoofdspil lagering
- Overbrenging

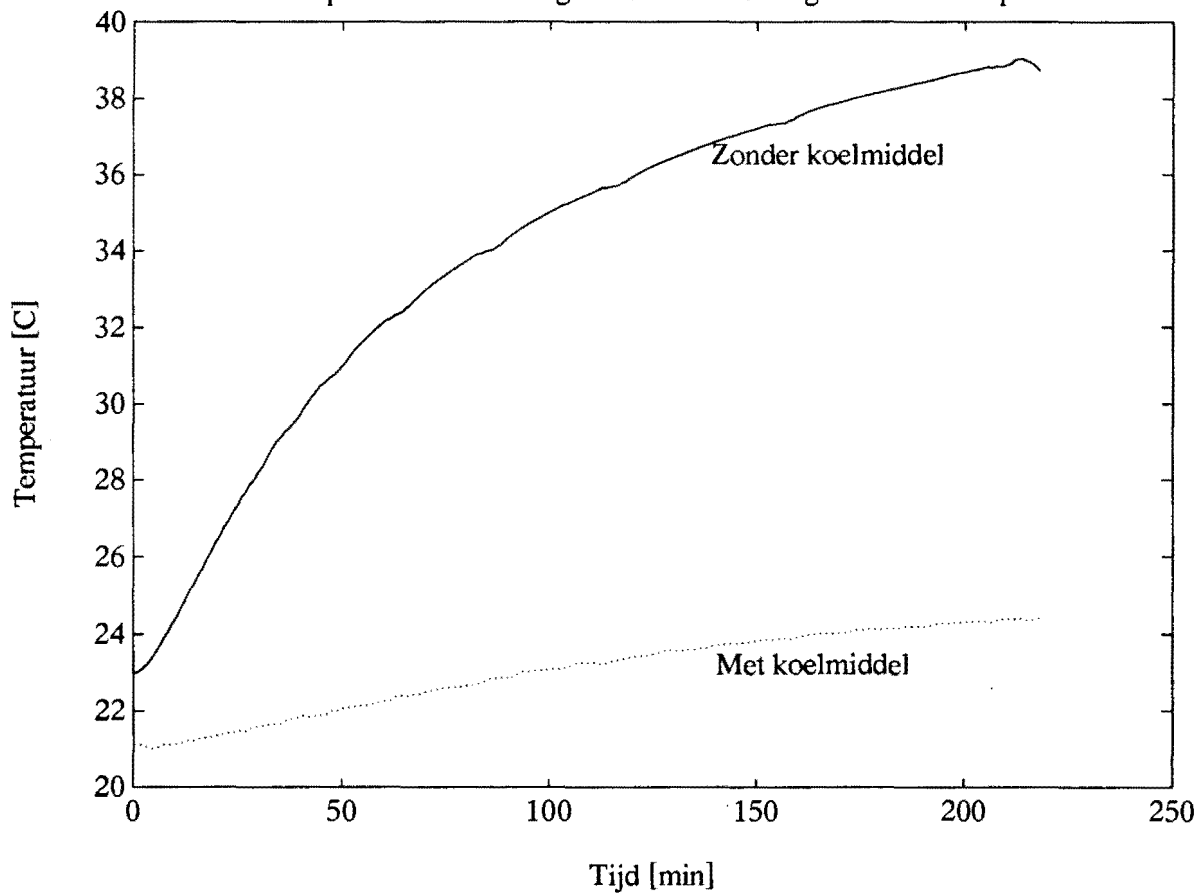
Thermisch gedrag

2) Werkstuk

Opwarming door machine
en verspanings proces

Oplossing:
Verspanen met koelmiddel

Temperatuur werkstuk gedurende bewerking met $N=6000$ rpm

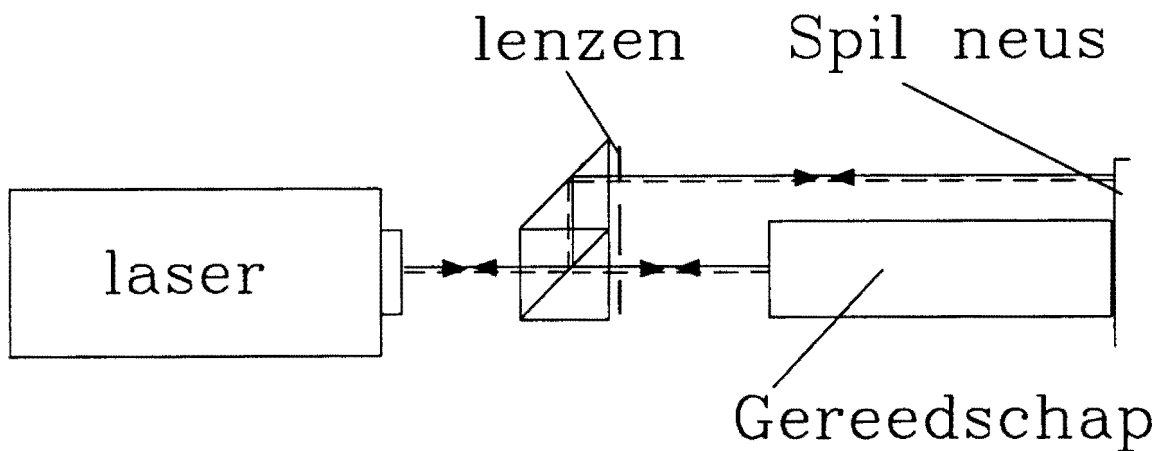


Thermisch gedrag

3) Gereedschap

**Opwarming door machine
en verspanings proces**

**Experiment:
Vaststellen invloed opwarming
door machine:**



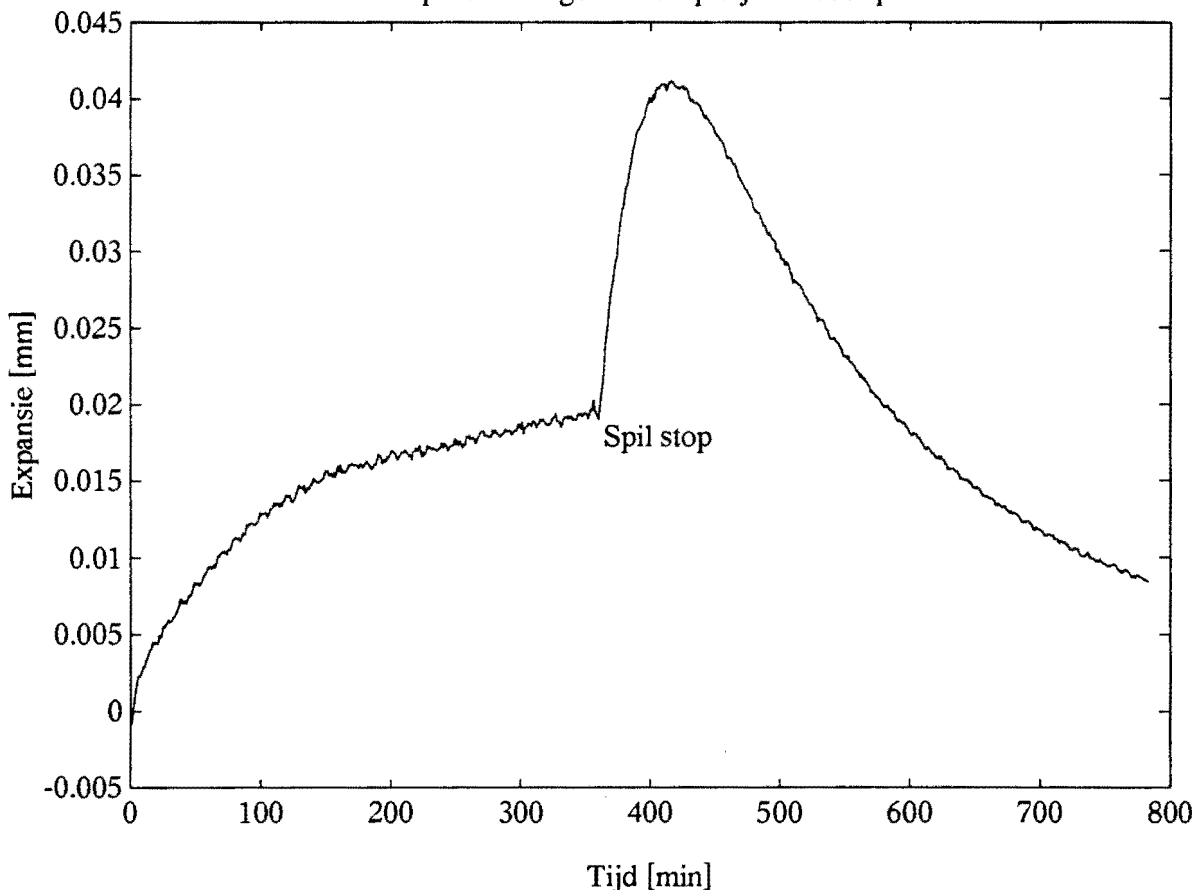
Thermisch gedrag

**Uitzetting van het gereedschap ($l = 200$ mm)
door opwarming vanuit de machine**

Oplossingen:

- Gereedschap koelen
- Nauwkeurige bewerkingen zonder gereedschapwissel uitvoeren
- Gereedschap op temperatuur laten komen
- Nauwkeurige bewerkingen snel achtereen uitvoeren

Expansie van gereedschap bij $N=6000$ rpm



Ir. H.A.M. Spaan

Thermisch gedrag

Resultaten empirisch onderzoek

Doel:

Methode ter compensatie thermisch gedrag

Methode:

Simultaan meten van:

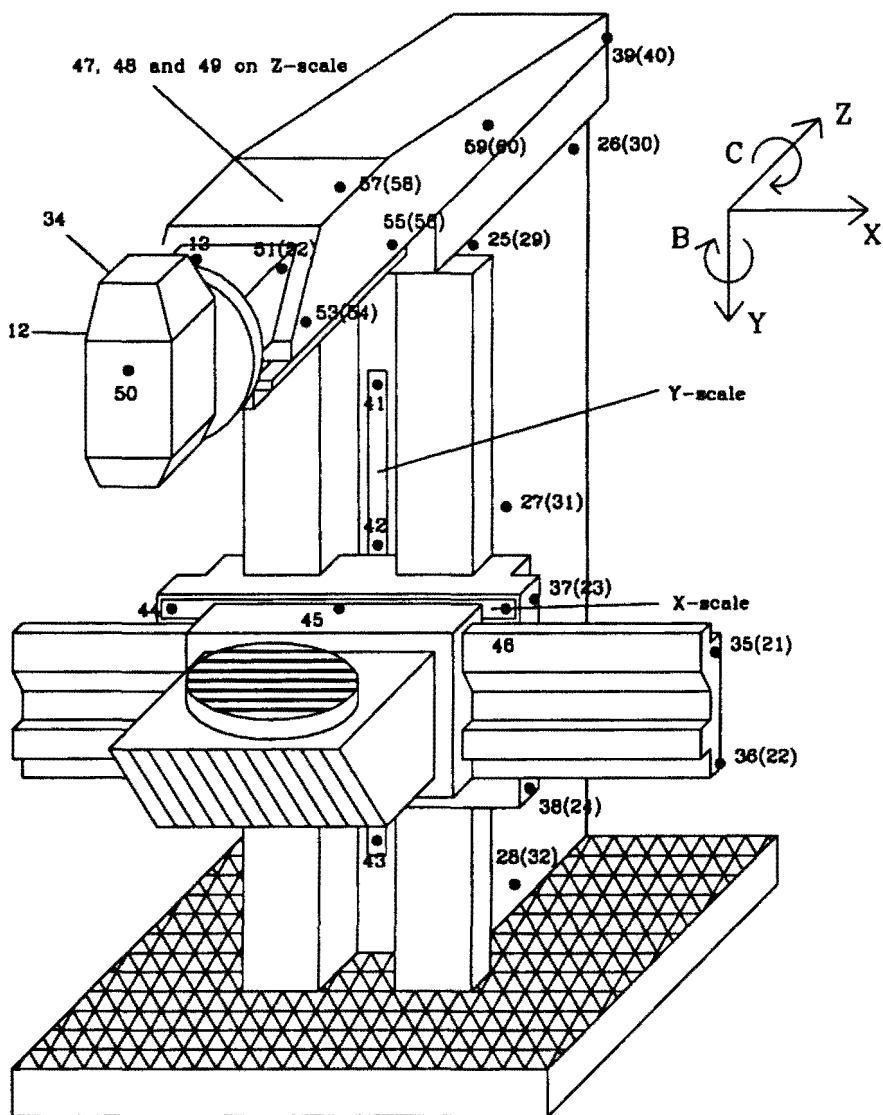
- Verplaatsing gereedschap
- Temperatuursverdeling over machine
 - onder diverse belastingen
 - op verschillende posities

Resultaat:

Empirische relatie tussen relevante temperatuur sensoren en de verplaatsing van het gereedschap

Thermisch gedrag

37 PT-100 temperatuursensoren

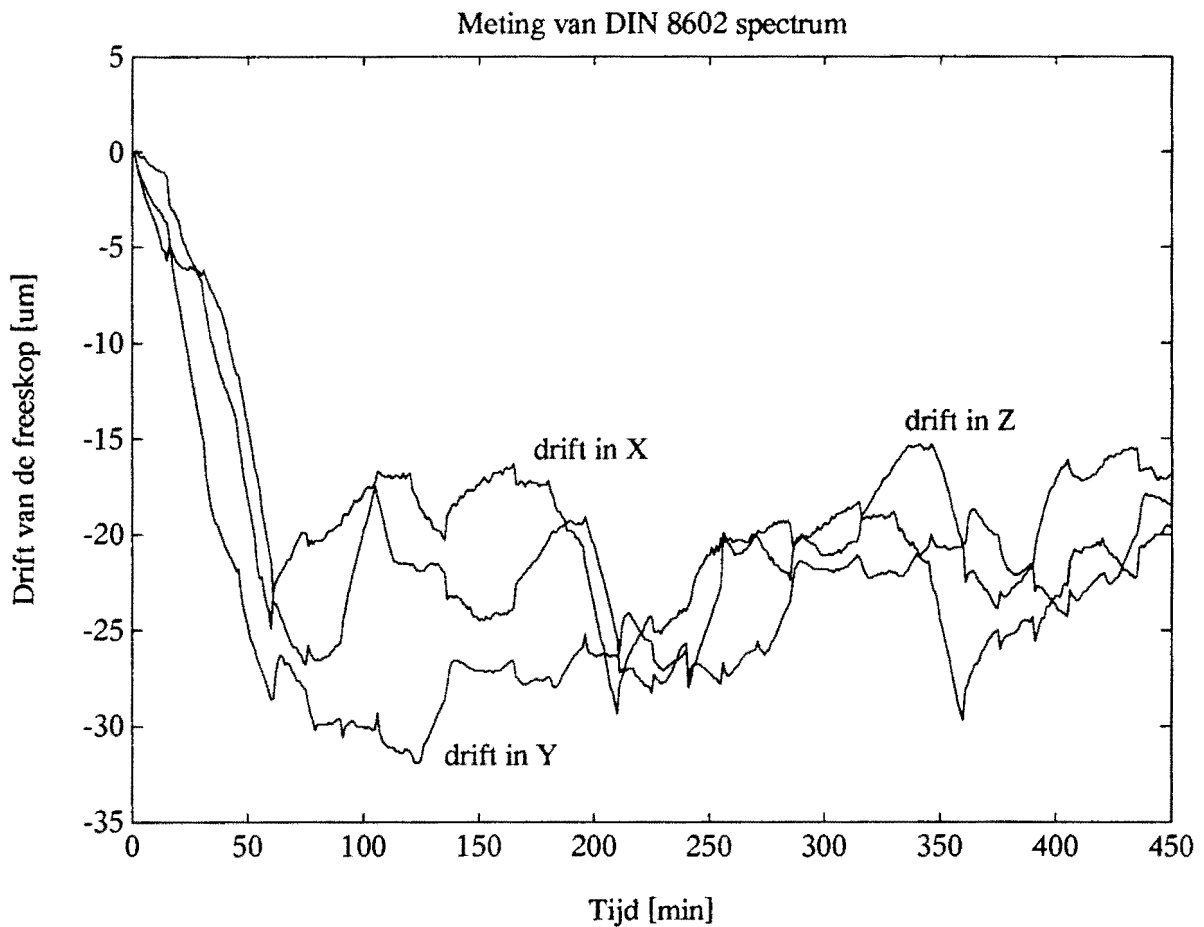


Ir. H.A.M. Spaan

Thermisch gedrag

Resultaten empirisch onderzoek

Drift freeskop bij belasting volgens DIN 8602

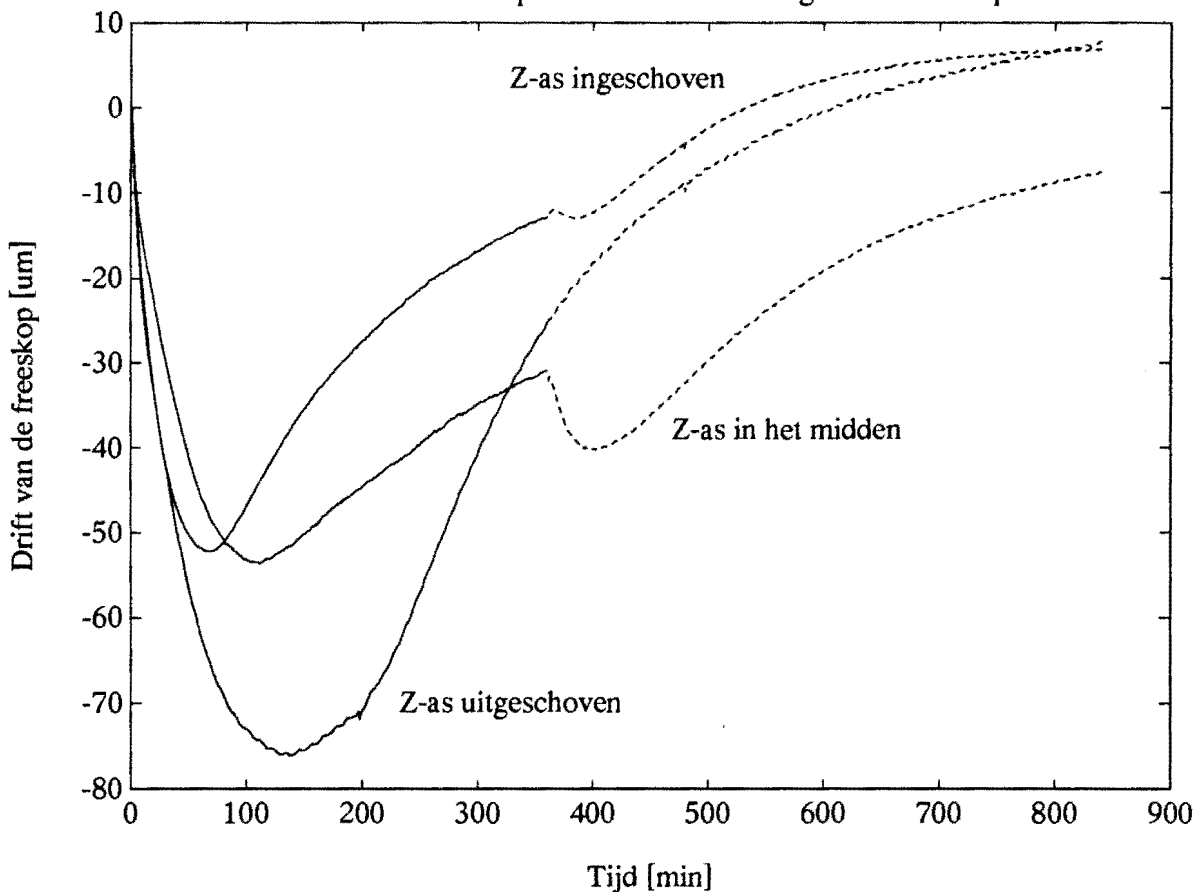


Thermisch gedrag

Resultaten empirisch onderzoek

- Relatie is afhankelijk van positie Z-as
niet van positie X- & Y-as
- Ordegrootte resulterende afwijkingen:
50 - 130 μm

Drift van de freeskop in Y met een belasting van N=5000 rpm



Compensatie afwijkingen

Doel onderzoek:

Hogere produkt-nauwkeurigheid

Methode:

Real-time software correctie

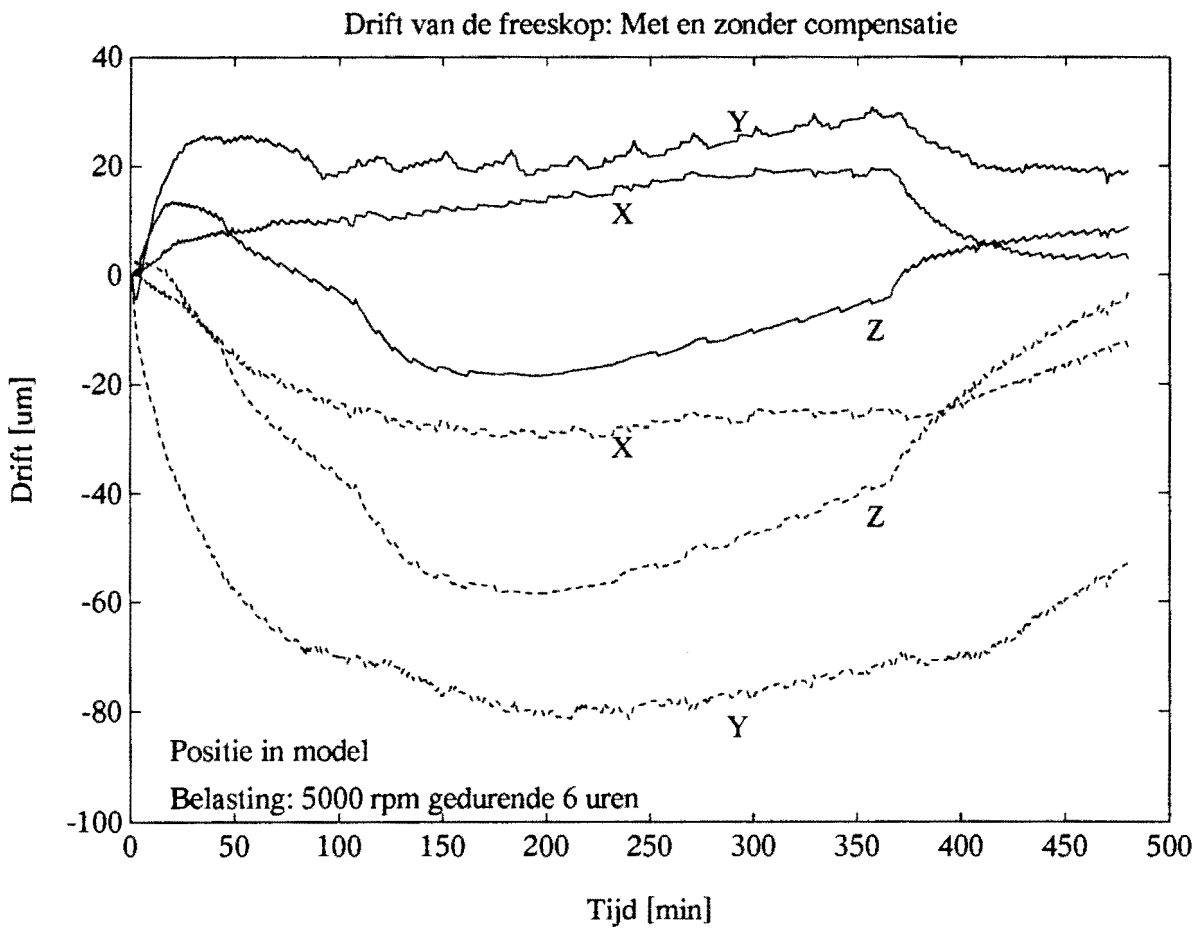
Laboratorium versie

- Uitlezen 16 temperatuursensoren m.b.v. externe computer
- Evaluatie model door externe computer
- Versturen compensatie tabellen
- Real-time correctie in besturing

Cyclus wordt herhaald om de 60 seconden

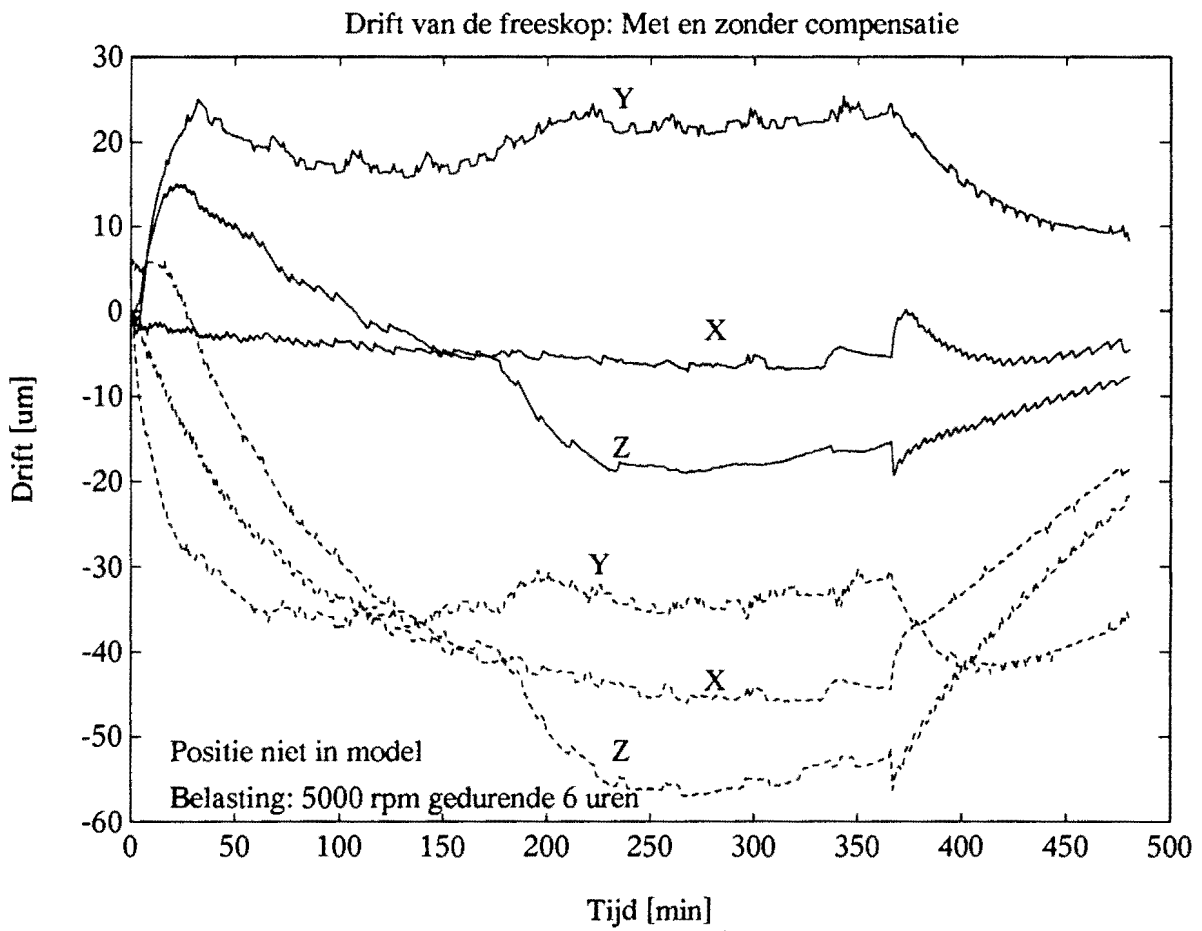
Compensatie afwijkingen

Verificatie thermische correctie



Compensatie afwijkingen

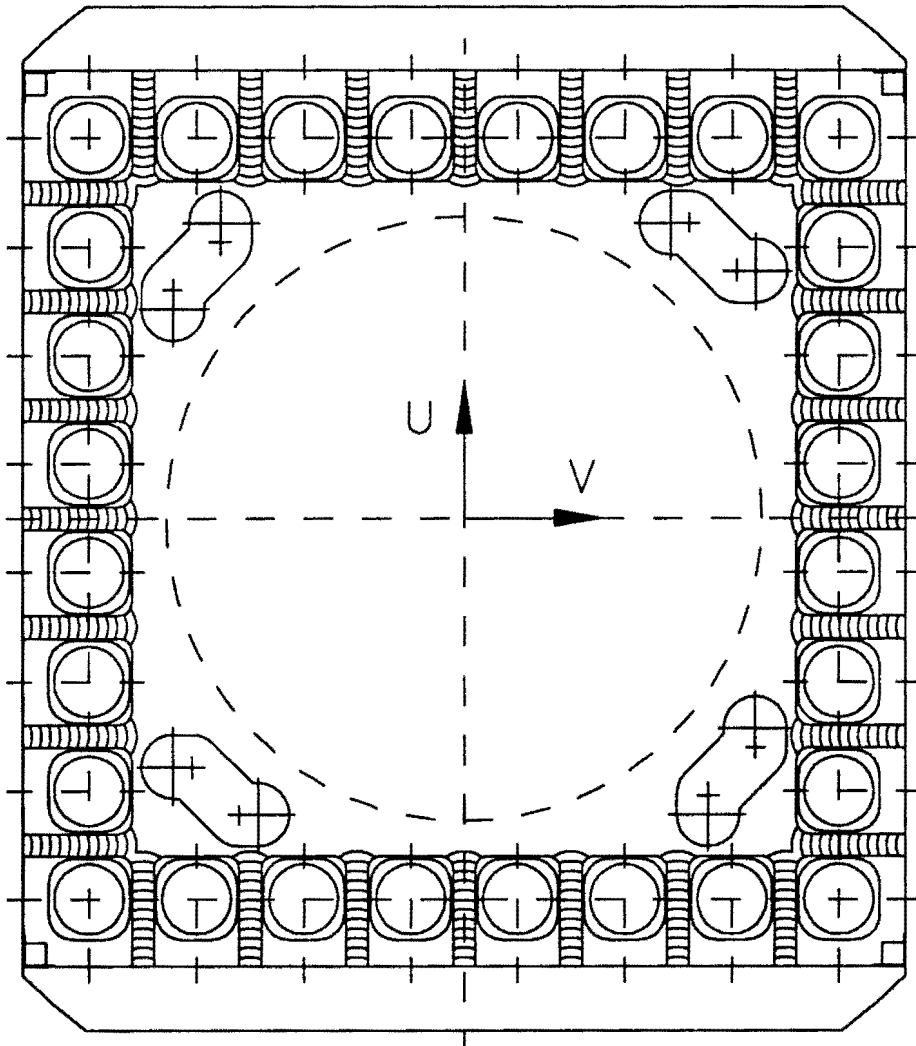
Verificatie thermische correctie



Proefwerkstukken

Huidige generatie proefwerkstukken voldoen niet

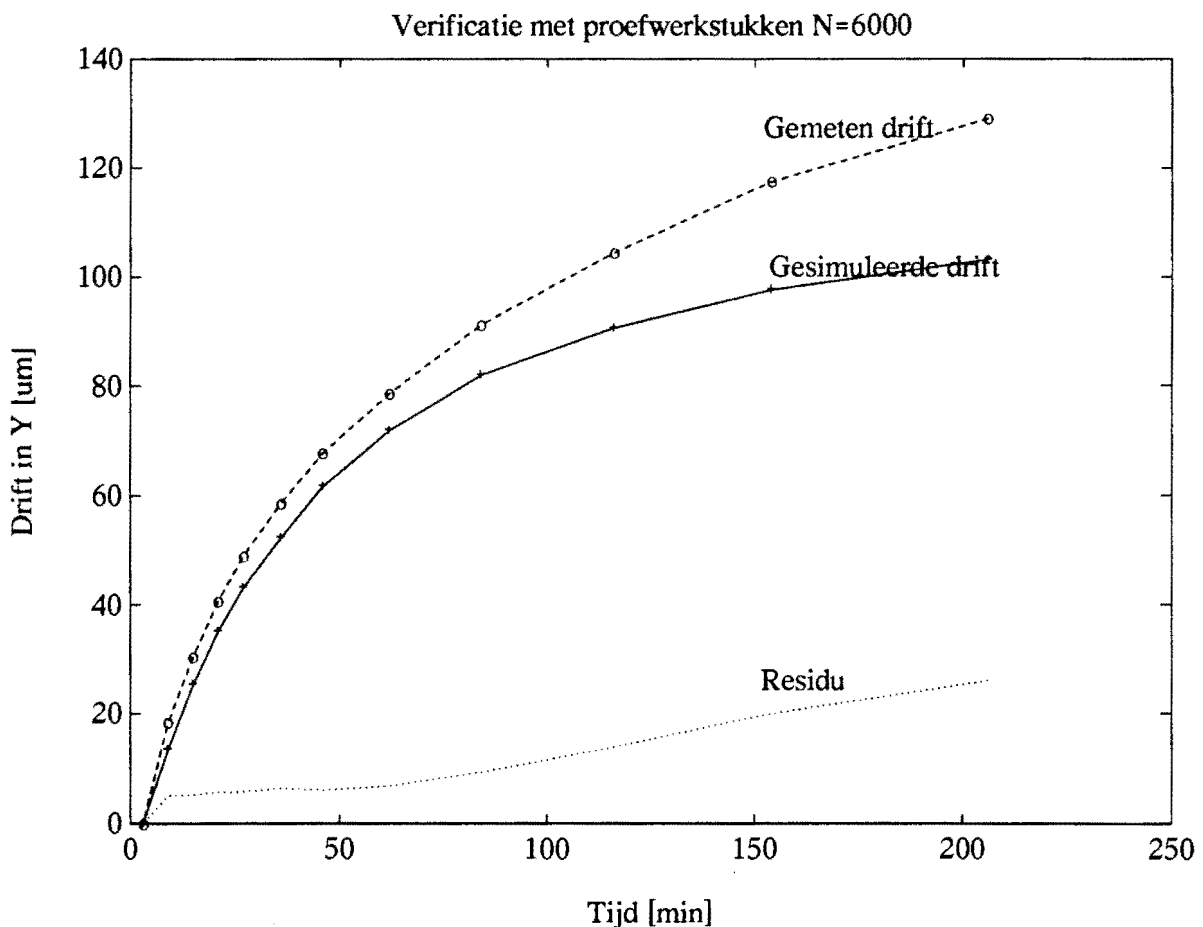
Nieuw type proefwerkstuk:



Proefwerkstukken

Verificatie thermisch model

- 1) Frezen proefwerkstuk + meten temperatuur
- 2) Bepalen drift uit proefwerkstuk
- 3) Voorspellen drift met gemeten temperatuur
- 4) Vergelijken

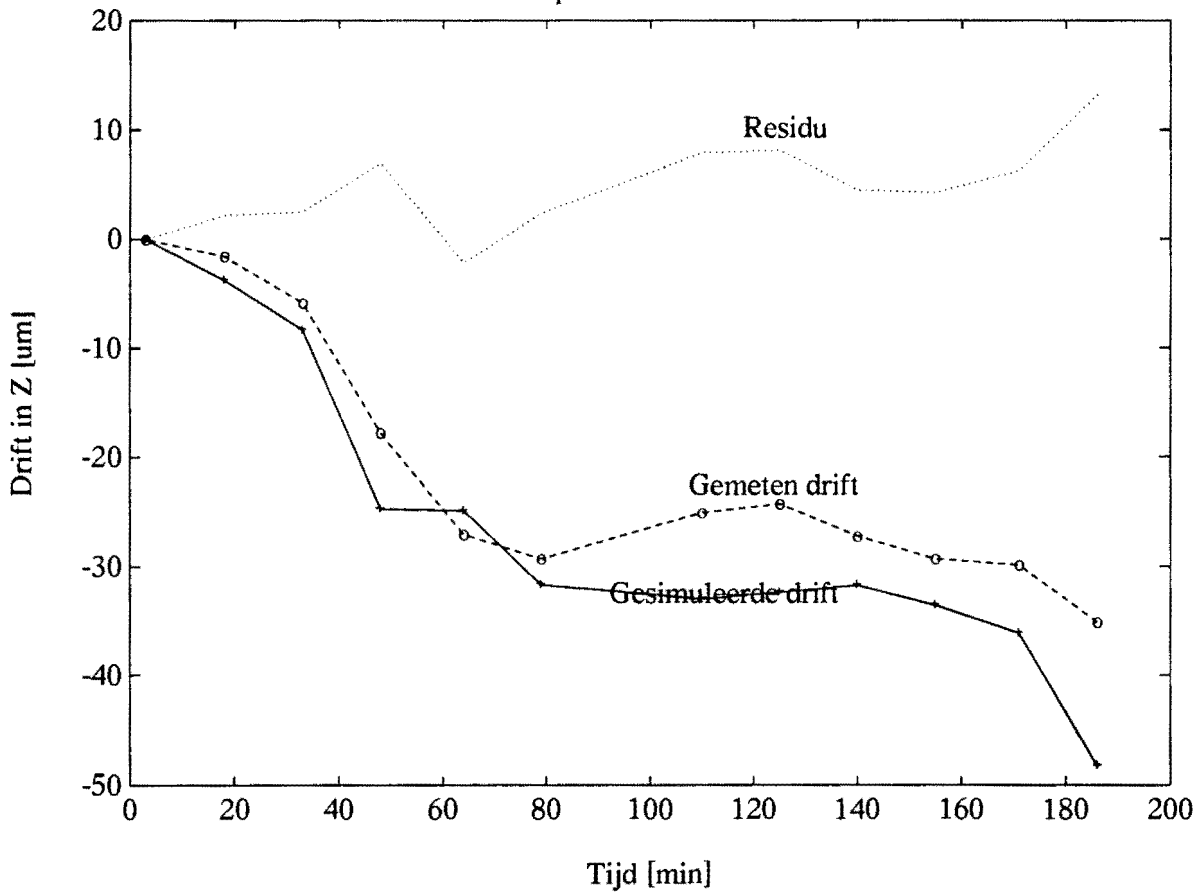


Ir. H.A.M. Spoon

Proefwerkstukken

Verificatie thermisch model

Verificatie met proefwerkstukken N=DIN8602



Aanpassen bewerkingsstrategie

Verbeteren produkt-nauwkeurigheid door aanpassen van bewerkingsstrategie

- **Thermisch gedrag:**
 - **Machine opwarmen**
 - **Op temperatuur brengen werkstuk**
 - **Goede opspanning**
 - **Gereedschap op temperatuur laten komen**
 - **Weinig wisselen**
 - **Nauwkeurige bewerkingen snel
achtereen uitvoeren**
 - **Koelmiddel gebruiken**
 - **Werkstuk**
 - **Gereedschap**