

Onderzoek naar een meettasterophanging

Citation for published version (APA):

Buskop, J. J. F. (1995). *Onderzoek naar een meettasterophanging*. (TU Eindhoven. Fac. Werktuigbouwkunde, Vakgroep WPA : rapporten). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1995

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.

BB 444279

rapportage onderzoeksopdracht

Onderzoek naar een meettasterophanging

Auteur: J.J.F. Buskop
rapport nr.: WPA-310026, 16 augustus 1995

Begeleider: ir. W.P. van Vliet.

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde
Vakgroep Productietechnologie en -automatisering
Sectie Precision Engineering

Voorwoord

Als eerste wil ik iedereen bedanken die voor diens medewerken aan mijn onderzoeksoopdracht en in het bijzonder mijn begeleider ir. W.P. van Vliet. Veder wil ik me vast verontschuldigen voor de taalfouten in deze rapportage, als gevolg van dyslexie is mijn Nederlands niet bijzonder sterk.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Modellering aantast proces	6
2.1	Doelstelling	6
2.2	Ontwerp gegevens	7
2.2.1	Het eisenpakket	7
2.3	Modellering	9
2.4	Conclusies	14
3	Contact en krachtmeting	15
3.1	Doelstelling	15
3.2	Metingen	16
3.2.1	Materialen	16
3.3	Krachtmetingen	18
3.4	Contactmeting	20
3.5	Uitvoering van de meting	22
3.5.1	Meetsnelheden	24
3.6	Meetresultaten	25
3.6.1	Krachtmeting	26
3.6.2	Contactmeting	27
3.7	Conclusies	33
4	Verplaatsings meting	34
4.1	Doelstelling	34
4.2	Meetmethode voor de verplaatsing	34
4.3	Opstelling	37
4.4	Calibratie	38
4.4.1	Afwijking in de meting	38
4.5	Meetresultaten	40
4.6	Conclusies	41
5	Conclusies een aanbevelingen ten aanzien van ontwerp meet- taster	42
A	Differentiaal vergelijking voor het eenvoudige model	43
B	Grafieken	47
C	Literatuur	56

1 Inleiding

De opdrachtsomschrijving van de onderzoeksopdracht geeft als doel het ontwerpen van een meettasterophanging, voor een 3D meetmachine.

De huidige generatie 3D meetmachines hebben in een aantal opzichten een grote verbeteringen ondergaan zoals, luchtlagering en software compensatie voor geometrische- en thermische afwijkingen. Bij de ontwikkeling van de nieuwe generaties meetmachines streeft men naar het aanmerkelijk verhogen van de meetsnelheid

(gewenste meetsnelheid $\approx 50 \text{ mm/s}$).

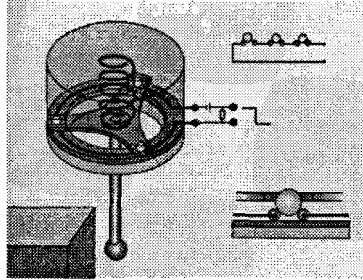
Binnen de vakgroepsectie *Precision Engineering* wordt ten behoeve van de ontwikkeling van deze nieuwe generatie meetmachines onderzoek gedaan. Voor het meten met hogere snelheden is een nieuw meetsysteem ontwikkeld. Het nieuwe meetsysteem kan niet geïntegreerd worden binnen de bestaande tasterophangingen.

De opdracht is nu het ontwerpen van een meettaster ophanging waarin het nieuwe meetsysteem geïntegreerd kan worden.

De kwaliteit van de meettasterophanging wordt bepaald door diens dynamisch gedrag. Geëist wordt dat het dynamisch gedrag van de te ontwerpen meettasterophanging ten minste gelijk is aan dat van de bestaande tasterophangingen bij de gewenste meetsnelheid (50 mm/s). Er dient echter gestreeft te worden naar een dynamisch gedrag bij aantastsnelheid van 50 mm/s dat gelijk is aan het dynamischgedrag van de bestaande meettaster ophangingen bij een meetsnelheid $< 10 \text{ mm/s}$.

De huidige meettasterophangingen zijn onder te verdelen in 2 systemen, te weten het metend tastsysteem van Zeiss en het schakelend tastsysteem van Renishaw. Het Zeiss systeem is opgebouwd uit 3 onderling loodrechte translatie systemen, gemaakt uit bladveren, zie ook figuur 1.2. Het huidige Zeiss systeem is vanwege de opzet van het translatiesysteem totaal ongeschikt bij hogere meetsnelheden vanwege de hoge stijfheid van de translatiesystemen, aantasting met de gewenste hoge snelheden zou dan tot beschadigingen van de tasterophanging leiden. De Renishaw ophanging bestaat in essentie uit een oplegging van de meettaster in 3 V groeven. De taster kan vrij roteren om 2 van de oplegpunten (groeven) en kan volledig uit zijn ophanging gelicht worden, zie ook figuur 1.1.

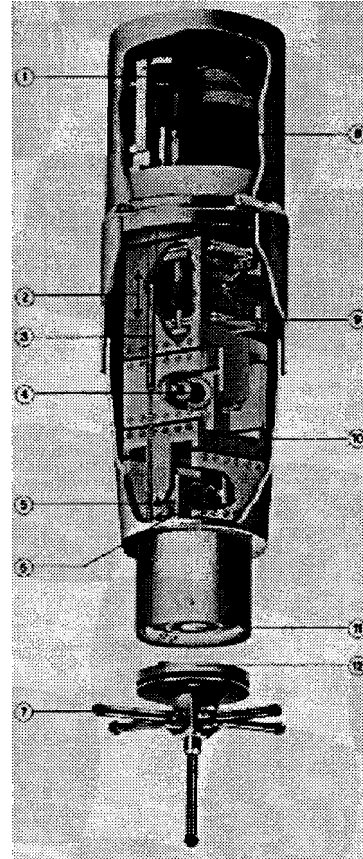
Figuur 1.1 Het Renishaw tastersysteem



Het Renishaw systeem gedraagt zich onder de gewenste condities veel beter en wordt daarom ook als referentie genomen bij het bepalen van het dynamisch gedrag van het tastersysteem.

De eis van integratie met het nieuw ontwikkelde meetsysteem, betekent dat een flexibele ophanging noodzakelijk is, hiermee zijn kunststoffen de belangrijkste materiaalgroep voor de meettasterophanging.

Figuur 1.2 Het Zeiss tastersysteem



Het verslag is gesplitst in drie delen:

1. De modellering van de dynamische verschijnselen.
2. Metingen ter beschrijving van de karakteristieke materiaal eigenschappen van de meettasterophanging.
3. Meting van de verplaatsing van de meettaster.

De modellering is nodig om de ontwerpvoorwaarden om te kunnen zetten in materiaal parameters.

Gebleden is dat een eenvoudige modellering niet volstaat in de beschrijving van de dynamische verschijnselen en een complexere modellering is niet mogelijk binnen het kader van de opdracht. Tevens zijn de beschikbare constitutieve relaties voor de beschrijving van het materiaalgedrag van kunststoffen niet geschikt voor de gewenste modellering.

In het deel over de metingen ter beschrijving van de karakteristieke materiaal eigenschappen voor de meettasterophanging wordt op basis van vergelijking van het gemeten dynamisch gedrag van verschillende kunststoffen getracht de materiaal eigenschappen te karakteriseren.

De resultaten van deze metingen staan echter niet toe conclusies te trekken ten aanzien van de karakteristieke materiaal eigenschappen.

De verplaatsing van de meettaster wordt gemeten omdat het op andere wijze niet mogelijk was gebleken het dynamisch gedrag van de meettaster te karakteriseren.

De resultaten doen vermoeden dat de werkelijke verplaatsingen aanmerkelijk kleiner zijn dan de schattingen uit de literatuur, echter zijn de resultaten van de metingen onvoldoende stabiel om hieraan harde conclusies te verbinden.

2 Modelling aantast proces

2.1 Doelstelling

Gegeven zijn slechts algemene beperkingen ten aanzien van het dynamisch gedrag van de taster. Deze algemene beperkingen dienen omgezet te worden in concrete materiaalparameters, bijvoorbeeld de stijfheid en de demping van het materiaal. Op basis van een zo eenvoudig mogelijk model van de tasterophanging wordt nu bepaald wat voor consequenties de eisen ten aanzien van het dynamisch gedrag hebben met betrekking tot de materiaalparameters.

2.2 Ontwerp gegevens

De beperkingen aan het dynamisch gedrag worden opgelegd vanuit het meetsysteem waarmee de taster verbonden wordt. Het meetsysteem is deel van reeds lopend onderzoek.

Het meetsysteem bestaat uit een optisch systeem dat voor het bepalen van een uiteindelijk meetpunt meerdere malen de posities van de meettaster moet bepalen.

De meetmachine verplaatst met meetsnelheid naar de meetpositie. Nadat de taster het eerste contact maakt wordt met enige vertraging het meten van de meettaster positie gestart. Nadat de meettaster positie een voldoende aantal malen is bepaald wordt de meetmachine gestopt.

Voor het bepalen van een meetpunt zal de positie van de meettaster tussen de 10 tot 50 maal moeten worden bepaald, de tijd nodig voor het bepalen van één meettaster positie ligt omtrent de 20 μ s.

Met betrekking tot de eisen aan het dynamisch gedrag moet onderscheid gemaakt worden tussen 2 situaties:

- Het dynamisch gedrag dat optreedt bij de aantasting van het meetobject, dit kan ook worden gezien als een botsing tussen de meettaster en het meetobject.
- Het dynamisch gedrag ten gevolge van het versnellen en vertragen van de machine.

Er zijn 2 plaatsen waar dit dynamischgedrag tot uiting komt:

- Het contact tussen de kogel van de taster en het meetobject.
- De ophanging van de stylus ter plaatse van het membraan.

Het eerste is uitsluitend van belang bij aantasting. Het tweede heeft verbandt met de eisen gesteld aan het dynamisch gedrag bij versnellen en vertragen. Het operationele meetbereik van het meetsysteem beperkt de maximale toegestane uitwijking bij versnellen en vertragen.

2.2.1 Het eisenpakket

De eisen zijn afkomstig uit het meetsysteem, het dynamisch gedrag van de meetmachine en algemene eisen uit de meettechniek. (Hierbij wordt uitgegaan van een taster van ongeveer 5 gram met een kogel met een diameter van ongeveer 5 mm met een stylus van ongeveer 40 mm.)

- Bij de aantasting van het meetobject, de botsing tussen de meettaster en het meetobject, zal de meettaster enige malen wegstuiteren van het meetobject. Hieruit volgt de eis dat de trillingen van de meettaster ten opzichte van het meetobject binnen ongeveer 5 ms moet zijn uitgedempt in verband met het beperkte bereik van het meetsysteem. Dit betekent dat na deze 5 ms het contact tussen het meetobject en de meettaster niet meer verbroken wordt gedurende het bepalen van de meettaster posities.

- De meettaster ophanging moet bij voorkeur bolsymmetrisch zijn ten opzicht van de optredende verplaatsingen en krachten, het dient echter ten minste rotatiesymmetrisch te zijn in de optredende krachten en verplaatsingen.
- De meettaster ophanging moet een translatie vrijheid hebben van ten minste 4 mm in alle richtingen. Tevens moet de meettaster ophanging een rotatie vrijheid hebben van ten minste 30° voor alle mogelijke rotatie richtingen.
Dit is noodzakelijk om de verplaatsing van de meetmachine gedurende het stoppen te kunnen opnemen zonder beschadiging van de meettaster ophanging.
- De meetkracht gedurende het bepalen van de positie van de meettaster moet liggen in de orde grootte van een $1/10 N$.
- De maximale kracht gedurende de aantasting mag niet groter zijn dan 5 N om beschadiging van het meetoppervlak te voorkomen.
- Een zo constant mogelijk aantast gedrag onafhankelijk van de meetsnelheid.

Deze eisen kunnen worden vertaald naar een aantal eisen ten aanzien van de ontwerp variabelen.

Uit de eisen ten aanzien van het benodigde aantal tasterposities, de meettijd per tasterpositie en een maximale meetkracht in de orde grootte van $1/10 N$. Betekent dit dat bij een meetsnelheid van 50 mm/s de maximale gereduceerde stijfheid van de meettaster kleiner moet zijn dan:

$$\text{Verplaatsing} = \text{Aantal tasterposities} \times \text{Meettijd per tasterpositie} \times \text{Meetsnelheid} \quad (2.1)$$

$$\text{Verplaatsing} = 50 \times 20 \cdot 10^{-6} \times 50 = \frac{5}{100} \text{ [mm]}$$

Aangenomen een maximale kracht toename van een $1/10 N$, dan geldt voor de stijfheid:

$$\text{Maximale gereduceerde stijfheid} = \frac{\text{Kracht toename}}{\text{Verplaatsing}} \quad (2.2)$$

$$\text{Maximale gereduceerde stijfheid} = \frac{1}{\frac{10}{5}} = 2 \text{ [N/mm]} \quad 2 \times 10^3 \text{ [N/m]}$$

Deze waarde voor de maximale gereduceerde stijfheid is een ruime schatting van de bovengrens. Het geschatte aantal benodigde tasterposities in de berekening was 50, in de uiteindelijke realisatie zou dit nog kunnen oplopen tot 100 tasterposities.

De invloed van de demping op de meetkracht mag uitsluitend bij hogere frequenties van significante grootte zijn, daar bij lage frequenties de snelheidsafhankelijkheid van de meetkracht anders te groot zou zijn.

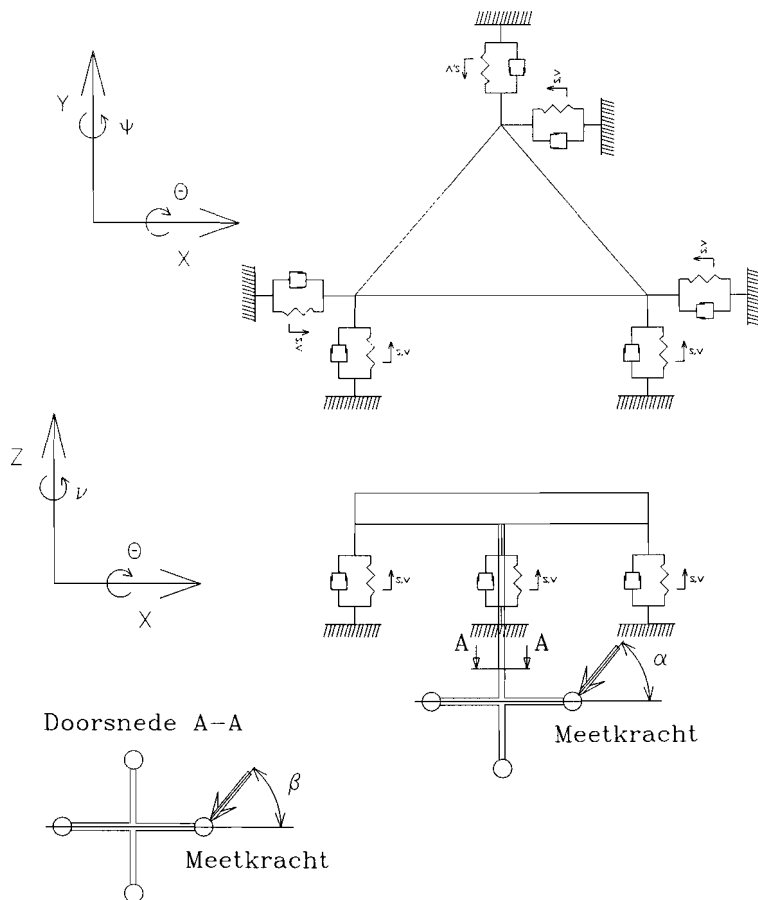
2.3 Modelling

Het model is noodzakelijk om het belang van de verschillende dynamische gedragingen te kunnen bepalen.

- Het aantastgedrag.
- Het versnellings / vertragsings gedrag.

Aan de hand van deze resultaten kan dan worden bepaald welke van de twee dynamische situaties bepalend is ten aanzien van de gestelde ontwerpeisen. Eveneens is het model nodig om vanuit de ontwerpeisen te komen tot materiaalparameters. Uit gegaan is van een zo eenvoudig mogelijk model. Het model is opgebouwd uit een starre taster welke star verbonden is met een driehoekig platform, zie figuur 2.1. In de drie hoekpunten zijn 3 graden van vrijheid vast gelegd met behulp van lineaire veren en dempers. Gekozen is voor een driehoekig platform om een zo eenvoudig mogelijke benadering te verkrijgen van een rotatie symmetrisch systeem. Dit model gaat er dus van uit, dat alle verplaatsingen worden opgenomen in de ophanging.

Figuur 2.1 Model 1



Om tot een verdere vereenvoudiging te komen wordt uitsluitend gekeken naar een verplaatsing in de Z richting, omdat men er voor de Z- richting van uit kan gaan dat de verplaatsing grotendeels zal worden opgenomen door translatie in de ophanging. Bij een verplaatsing in X- of Y- richting zal deze beweging om een complexere beschouwing vragen daar deze beweging wordt om gezet in een translatie en een rotatie in de ophanging. De verhouding tussen de translatie en de rotatie is afhankelijk van de rotatie- en de translatiestijfheid van de ophanging, waarbij de verhouding tussen de rotatie- en translatiestijfheid nogmaals afhankelijk is van de geometrische parameters.

Onder deze voorwaarde wordt de differentiaal vergelijking voor de Z- richting dan (voor de afleiding zie appendix A en figuur 2.1):

$$m \ddot{z} = -3 (kz + \dot{z}d) - \sin(\beta) F_{aantast} \quad (2.3)$$

Hierin is:

m = massa taster

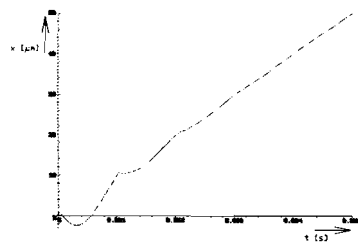
k = de stijfheid van de tasterophanging

d = de demping in de tasterophanging

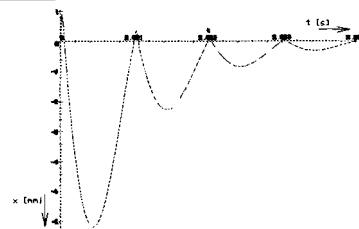
$\sin(\beta) F_{aantast}$ = de aantastkracht afhankelijk van de aantastrichting

Het model wordt nu geëxiteerd met een verwacht verplaatsingsgedrag van de tastkogel, zie figuur 2.2 en 2.3 de grafieken zijn slechts een verduidelijking en representeren niet de werkelijk toegepaste functies. De verplaatsing is opgebouwd uit een schuine lijn waarvan de richtingscoëfficiënt bepaald wordt door de meetsnelheid. Op deze lijn zijn 2 uitdempende sinussen gesuperponeerd. De uitdempende sinussen beschrijven het wegstuiteren van de tasterkogel van het meetobject en de indrukking van het meetobject.

Figuur 2.2 Beweging van de taster



Figuur 2.3 Uitdempende sinussen

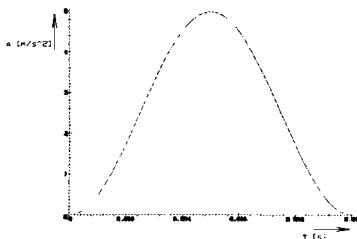


De aantastkracht $F_{aantast}$ wordt nu bepaald voor verschillende waarden voor de stijfheid k , de demping d en de massa m , ofwel de materiaalparameters in de differentiaalvergelijking. Hierbij kan rekening worden gehouden met het feit dat er reeds een maximum bepaald is voor de stijfheid.

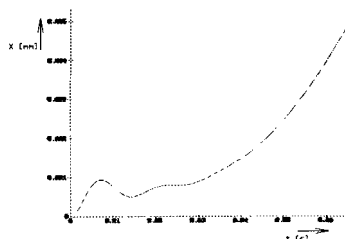
Om het belang van het trillingsgedrag bij versnelling en vertraging ten aanzien van de ontwerpparameters te kunnen bepalen, wordt het model nu geëxiteerd met een versnellingssignaal volgens figuur 2.4. Het signaal is een sinusvormige versnelling tot 50 m/s^2 met een maximale versnelling van 5 m/s^2 en een sinus vormige vertraging tot 0 m/s^2 .

Bij toepassing van de materiaalparameters zoals ook gebruikt bij het bepalen van het botsings effect kan geconcludeerd worden dat het systeem voldoende snel zal uitdempen, zie ook figuur 2.5.

Figuur 2.4 Versnelling van de meetmachine



Figuur 2.5 Uitwijking van de taster ten gevolge van het versnellen



Daar de trillingen ten gevolge van versnellen en vertragen voldoende snel uitdempen en de amplitude van de trillingen relatief klein blijven, zijn de effecten ten gevolge van de aantasting dus bepalend voor de ontwerp parameters.

Het model levert voor het aantastgedrag veel te hoge meetkrachten, dit wordt veroorzaakt doordat de verplaatsingen niet correct zijn ingeschat. Wel duidt het model op hoog frequenttrillings gedrag, zoals ook in latere instantie gemeten is.

Om tot een beter model te komen kunnen een aantal vereenvoudigingen niet gehandhaafd blijven. Aanpassingen zijn nodig voor:

- De taster (stylus) kan niet als zijnde star gemodelleerd worden bij aantasting in X- danwel Y- richting. Aantastkracht \perp taster.
- Rekening moet worden gehouden met de indrukking van zowel de tasterkogel en het meetobject.
- De stijfheid van het meetobject dient in rekening te worden gebracht.
- De stijfheid van de constructie met daarin de bevestiging van de ophanging moet in rekening worden gebracht.

Een model dat deze factoren in rekening wil brengen is behept met een aantal probelemen.

Er treedt een aanmerkelijke vergroting van het aantal vrijheidsgraden op. De tasterstaaf dient te worden beschreven als een continuüm.

Voor de beschrijving van het totale trillingsgedrag kan men afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid van het model niet meer volstaan met de contacttheorie van Hertz, de contact theorie van Hertz en andere contact beschrijvingen leveren slechts een goede beschrijving voor de eerste trilling.¹

¹An experimental surfacewave method for recording force-time curves in elastic impacts, Journal of Applied Mechanics, march 1959. Entwurf eines Messtaster zur mehrdimensionalen dynamischen Abtastung räumlicher Konturen, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Hannover, Diplm. -Ing. Hartmut Janochar. The investigations on selected dynamical phenomena in the heads of multi- coordinate meassuring devices, Annals of the CIRP volume 33/1/1984

In plaats daarvan moeten de golfverschijnselen in het contact oppervlak in rekening worden gebracht. Het aantal beschrijvingen voor deze verschijnselen in de literatuur is zeer beperkt. De theorieën zijn meestal opgesteld op basis van energiebeschouwingen met als doel het beschrijven van impact gedrag van projectielen. Daar de hoeveelheid toegevoerde energie in het geval van de aantasting vele malen kleiner is dan de energie toegevoerd bij de impact van een projectiel, kunnen deze theorieën niet zonder meer worden overgenomen.

Uitgaande van een geschatte verloop van de verplaatsing van de kogel kan nu weer van verschillende waarden voor m , k en d de meetkracht worden bepaald. Het hieruit volgende probleem is nu dat door de opsplitsing van het star systeem (-model) naar een discret systeem voor ieder afzonderlijk element de massa, stijfheid en demping moet worden bepaald. Tevens is de verificatie van het model bijzonder moeilijk daar het tot nu toe niet mogelijk is geweest de dynamischmeetkracht te meten.

Indien men nu echter het botsingsgedrag in de modellering ook meeneemt is het mogelijk op basis van de opgelegde verplaatsing aan de inklemming, zoals ook uitgevoerd door de meetmachine, de verplaatsing van de meettaster te bepalen.

Verificatie is dan ten dele mogelijk op basis van de resultaten uit de contactmetingen. (De contactmetingen worden in het volgende beschreven) Het probleem is nu echter dat het bijzonder moeilijk wordt om te bewijzen dat het systeem nog een één éénduidige deterministische oplossing heeft, mogelijk is dat de oplossing van het systeem gedeeltelijk chaotisch gedrag vertoont.

Ten aanzien van het botsingsprobleem zou de voorkeur uitgaan naar een analytische beschrijving die een relatie legt tussen de optredende botsingskrachten, de trillingstijd en de bekende materiaalparameters. In de literatuur² zijn er een beperkt aantal modellen die een dergelijke voorspelling kunnen doen, echter zijn deze modellen bedoeld voor trillingen die beschouwd kunnen worden als witte ruis. Er wordt dan op basis van een energie beschouwing een afname in de intensiteit van de trillingen voorspeld.

Tot nu toe is voor het materiaalgedrag nog steeds uitgegaan van lineair gedrag. Uit de ontwerpeisen volgt echter impliciet het gebruik van de niet lineaire eigenschappen van de kunststof voor de ophanging (snel uitdempen van de trillingen ten gevolge van de aantasting en een zo constant mogelijke meetkracht gedurende meting). De uit de literatuur verkrijgbare informatie ten aanzien van kunststoffen beperkt zich tot een algemene beschrijving van constitutieve relaties van rubbers en elastomeren op basis van een parallel- en serieschakeling van Maxwell modellen (bepaalde combinatie van veren en dempers), hieruit kan dan wel het dempingsgedrag bepaald worden. Het ontbreekt echter aan de specifieke parameters behorende bij een kunststof om op basis van constitutieve relaties uitspraken te kunnen doen over het niet lineaire gedrag van de kunststof.

²Random vibration of mechanical systems, K. Piszczek and J. Niziol, John Wiley & Sons limited, ISBN 0-85312-347-0

Tevens zijn de constitutieve relaties voor de beschrijving van de instationaire verschijnselen (de botsing van de taster in het contact), meer bedoeld om het gedrag van de kunststof te beschrijven op een andere tijdsbasis. De tijdsbasis ligt hier meer in termen van secondes i.p.v. de beschouwde micro- tot millisecondes zoals voorkomen bij de aantasting. Voor beschouwingen van hoog frequent materiaalgedrag van kunststoffen wordt uit gegaan van een stationaire situatie. Voor zover in de literatuur specifieke materiaalbeschrijvingen voor hoog frequente, instationaire verschijnselen beschikbaar zijn, zijn deze ten aanzien van een specifiek probleem waarvan de resultaten niet overdraagbaar zijn. Het gaat hier meestal om beschrijvingen bedoeld voor het bepalen van de effecten ten gevolge van impact van projectielen.

2.4 Conclusies

Het eenvoudige model is te eenvoudig om op basis hiervan uitspraken te kunnen doen met betrekking tot de gewenste materiaal parameters.

Complexere modellen zijn moeilijk theoretisch sluitend te krijgen (als gevolg van problemen bij het beschrijven van het contact verschijnsel, de botsing en de niet-lineariteiten in het materiaalgedrag). Tevens zal men over moeten gaan op het numeriek oplossen van de model vergelijkingen, waardoor het moeilijker wordt om inzicht te verkrijgen in de invloed van de verschillende parameters op het uiteindelijke dynamische gedrag.

Men kan dus concluderen dat het niet voldoende mogelijk is om op basis van de modellen te ontwerpen.

3 Contact en krachtmeting

3.1 Doelstelling

Daar het niet mogelijk is gebleken om op basis van theoretische modellering een beter inzicht te verkrijgen in de eisen ten aanzien van de materiaalparameters, is nu het doel om op basis van experimenten meer inzicht te verkrijgen in het materiaal specifieke gedrag van kunststoffen bij de aantasting van een meetobject.

Omdat men aan de hand van modellen het te verwachten dynamisch gedrag niet kan voorspellen worden de resultaten van de metingen aan de kunststoffen vergeleken met de metingen aan de Renishawtaster.

Vergelijking van de meetresultaten tussen de kunststof- en de Renishawop-hanging moeten bepalen welke van de optredende effecten binnen de meting van belang zijn voor de te kiezen materiaalparameters.

Door in de meting een groot aantal kunststoffen te betrekken kan men door onderlinge vergelijking van de resultaten van de kunststoffen meer concreet bepalen welke specifieke eigenschappen van de kunststoffen van belang zijn en in hoeverre deze specifieke eigenschappen voldoen aan de gestelde eisen.

3.2 Metingen

Om inzicht te verkrijgen in het specifieke materiaal gedrag van kunststoffen, bij gebruik als tasterophanging, zijn twee soorten metingen verricht.

- *Een krachtmeting waarbij de kracht gedurende de aantasting gemeten wordt.*
- *Een contactmeting waarbij gemeten wordt gedurende welke tijd in de aantasting de meettaster in contact is met het meetobject.*

Deze metingen zijn uitgevoerd aan de meetmachine om een zo getrouw mogelijke simulatie te verkrijgen van het gedrag wat in een uiteindelijke meetmachine zal optreden. Het verschil is nu dat de aantastingen met ijsnelheid plaats vinden en de machine gestopt wordt door een noodstop, terwijl in de uiteindelijke meetmachine dit de normale werkcondities zijn.

3.2.1 Materialen

Uit het eerste model bleek dat vooral gezocht moest worden naar demping bij frequenties tussen de 1 en 20 *kHz*. Daar selectie van materiaal op basis van frequentie karakteristiek bijna niet mogelijk is is er gekeken bij welke andere toepassingen dit frequentie gebied ook dominant is.

Vergelijkingen kunnen onder meer worden getrokken met geluidsisolatie. Daar schuimrubbers in de geluidsisolatie hun dienst hebben bewezen is er voor gekozen om als eerste schuimrubbers te testen.

Ten behoeven van het verkrijgen van een referentiebasis is er voor gekozen om ook aan enige volrubbers te meten. Voor *para* is gekozen daar het een van de zachtste volrubbers is en daarmee het dynamisch gedrag van de schuimrubbers het dichtst zal benaderen. *Siliconenrubber* en *butyleenrubber* zijn gekozen op basis van hun bijzondere eigenschappen, *siliconenrubber* en *butyleenrubber* vertonen volgens de literatuur ondermeer een relatief hoge demping. Verschillende *gels* zijn gekozen vanwege het sterk visceuse gedrag wat deze *gels* vertonen.

Daar bij de metingen de verschillende materialen, geheel tegen de eerste verwachtingen in relatief gelijkwaardige resultaten opleverde, is gekozen om ook *sbr* met een dikte van 1 *mm* te testen om een verbreding van de referentie basis te krijgen. Daar één laag van het *sbr* niet voldoende rotatie stijf is, is om de rotatiestijfheid te verhogen het materiaal gestapeld. De resultaten met het gestapelde *sbr* waren relatief gunstig, niet herleidbaar was of dit het gevolg was van de stapeling van het materiaal danwel door de bolvorm van het membraan. De bolvorm van het membraan was een gevolg van de aandrukkracht welke nodig was voor het op elkaar klemmen van de verschillende lagen. Om dit te controleren is ook aan standaard *sbr* dikte 5 *mm* gemeten.

De dikte van de verschillende materialen ligt tussen de 4 en 6 *mm*. Daar in eerste instantie niet bekend was wat de invloed van de belasting op het materiaal zouden kunnen zijn, is er voor gekozen om voldoende dik materiaal te testen zodat er geen invloeden zouden kunnen optreden ten gevolge van overbelasting van het materiaal.

Enige materialen zijn later in gestapelde configuratie gemeten om toch enigszins inzicht te kunnen krijgen op de invloed van de dikte van het materiaal. Hieruit blijkt dat vergroting van de dikte vooral leidt tot verhoging van de stijfheid met als gevolg een ongewenst hoge meetkracht. Ook op basis van de benodigde tijd voor het meten van de invloed van dikte varianties is besloten niet verder te kijken naar invloeden ten gevolge van dikte variaties.

Materiaal beschrijving

Gemeten is aan de volgende materialen.

- **Schuimrubbers**
 - Mos
 - NR 42
 - Epdm
 - Alveo
- **Volrubbers**
 - Para
 - Siliconenrubber
 - Sbr
 - Butyleenrubber
- **Gels**
 - Gel 1 Siliconengel lage viscositeit
 - Gel 2 Siliconengel hoge viscositeit
 - Gel 3 Siliconengel gevuld met polystyreen korrels

3.3 Krachtmetingen

De krachtmeting is bedoeld om de krachten te meten bij de aantasting. De kracht wordt gemeten tussen het meetobject en de kogel van de meettaster. Ten behoeve van de krachtmeting kan gebruik worden gemaakt van een aantal sensor principes. De overeenkomst tussen de sensoren is dat in alle gevallen een verplaatsing cq indrukking gerelateerd wordt aan een kracht. Tevens geldt voor de sensor dat deze een schaal bereik moet hebben in de orde grote van $O(1000)$, de kracht moet gemeten kunnen worden met een nauwkeurigheid van $O(1/100)$ in een meetbereik van $0 - 30 N$, bij een frequentie bereik van $0 Hz$ tot $30 kHz$. De volgende soorten sensor principes zouden hiervoor gebruikt kunnen worden:

Stijfheid De metingen gepasseerd op dit principe kennen alle één groot nadeel. Om de hoog frequente trillingen te kunnen volgen is een hoge stijfheid van de sensorconstructie noodzakelijk, om hierbij toch nog de gewenste kleine kracht verschillen te kunnen bepalen moet de sensor bijzonder gevoelig zijn. Een ander probleem is dat ten gevolge van het feit dat de sensoren niet dynamisch gecalibreerd kunnen worden er een fout in de bepaalde kracht kan ontstaan ten gevolge van de effecten van materiaaldemping in de constructie van de sensor. De effecten van materiaaldemping kunnen niet verwaarloosd worden ten opzichte van de gewenste gevoeligheid en frequentiegedrag. Tevens is een hoge lineariteit van de stijfheid vereist om tot een eenvoudige statische calibratie van de sensor te komen. Daar indien de stijfheid niet voldoende lineair is de calibratie van deze stijfheid, bij de gestelde nauwkeurigheid ten aanzien van de meting van de kracht, te veel tijd zou kosten.

Inwendige stijfheid De stijfheid wordt bepaald door het materiaal van de sensor.

- Piëzo-elektrische krachtopnemer; de indrukking van het piëzo kristal levert een spanning die gerelateerd wordt aan een kracht. Om problemen ten gevolge van threshold verschijnselen omtrend een kracht van $0 N$ te voorkomen dient het kristal voorgespannen te zijn. Het probleem bij de piëzo-elektrische kracht opnemer is de hoge meetversterking die vereist is, orde grote $O(10^3)$ tot $O(10^4)$.

Uitwendige stijfheid De stijfheid wordt bepaald door een los te construeren onderdeel van de sensor.

- Rekstrookmeting; hierbij wordt de rek van de uitwendige stijfheid gemeten. Problemen hierbij zijn het gewenste schaalbereik en de benodigde meetversterking noodzakelijk voor het gewenste meetbereik.
- Een elektrische verplaatsingssensor op basis van inductieve of capacitieve werking. Aan de hand van de verplaatsing van de uitwendige stijfheid kan de kracht worden bepaald.

Het probleem bij deze sensoren is dat de ruis veroorzaakt door de elektrische effecten in het meet circuit niet zonder meer te verwaarlozen zijn van wege het feit dat er gemeten moet worden bij relatief hoge frequenties en de gemeten signalen vrij zwak zijn.

- Een optische verplaatsingssensor. Waarbij de kracht weer bepaald kan worden door de meting van de verplaatsing van een stijfheid. Het gaat hierbij om een bestaande sensor waarvan echter de referentie stijfheid te laag is.

Versnelling van massa Door het meten van de versnelling van een bekende massa kan de kracht bepaald worden uit $F = m a$.

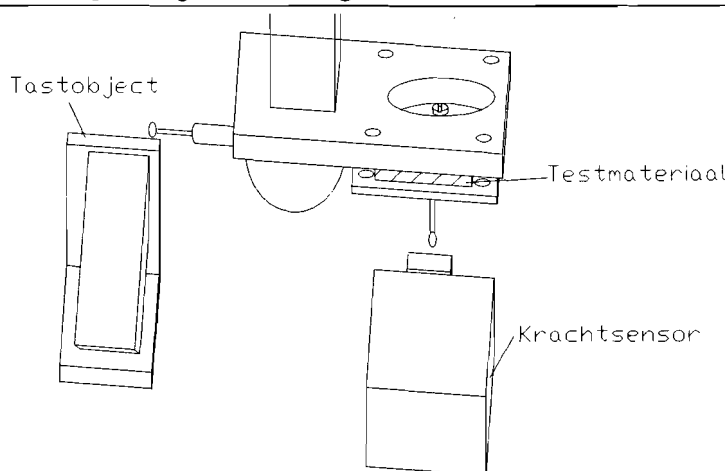
- Versnellings opnemer; het probleem is nu echter dat de massa met een onbekende stijfheid verbonden moet worden met de vaste wereld, daar anders het gewenste frequentiebereik niet gehaald kan worden. Deze stijfheid veroorzaakt hierdoor een onbekende stoorkracht. Tevens zijn versnellingsopnemers niet in staat laag frequentie signalen te meten.

Gekozen is voor het gebruik van de piëzo-elektrische sensor. Daar deze sensor de kleinste afwijking geeft tussen de dynamisch en de statische calibratie. Nadelig is de hoge benodigde meetversterking en dat de eigenfrequentie van de toegepaste sensor omtrent de 10 kHz ligt.

Een ander probleem bij de toegepaste sensor werd veroorzaakt door de relatief grote massa van het voorspan element.

Een verbetering is mogelijk door aan de voorspan massa van de piëzoelektrische sensor een versnellingsopnemer te bevestigen. Hiermee zouden dan de kracht ten gevolge van de eigentrilling van de voorspanmassa bepaald kunnen worden. Voor de opstelling zie figuur 3.1

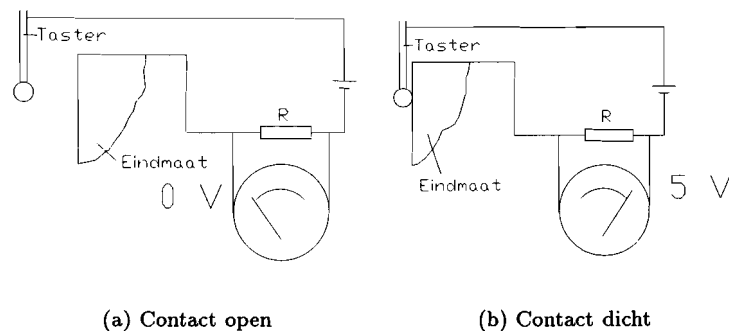
Figuur 3.1 Opstelling krachtmeting



3.4 Contactmeting

Met behulp van een contactmeting kan bepaald worden op welke momenten de meettaster zich tegen het meetobject bevindt. Dit wordt bereikt door het meten van de spanning van de stroomkring, zie figuur 3.2. De stroomkring wordt gesloten indien de meettaster zich tegen het meetobject bevindt, zie figuur 3.2. De stroomkring wordt verbroken indien het contact tussen de meettaster en het meetobject verbroken wordt.

Figuur 3.2 Contact meting



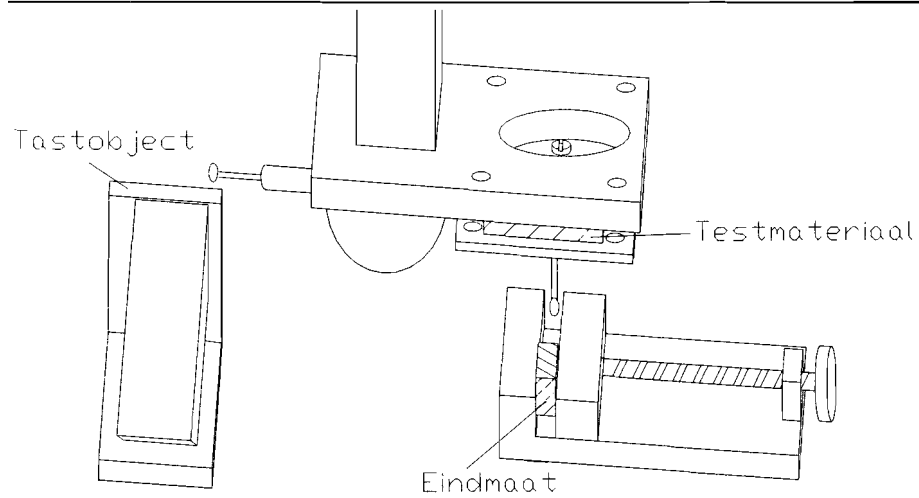
Voor de meting wordt de spanning over een weerstand bepaald. Als de stroomkring gesloten is gaat er een stroom door de weerstand en meet men een spanning.

Met behulp van de contactmeting wordt getracht een beter inzicht te verkrijgen in het dynamischgedrag van de meettaster door het vergelijken van de resultaten van de metingen aan verschillende kunststoffen.

Door de spanning over de stroomkring voldoende laag te houden, ongeveer 5 V, wordt voorkomen dat er zich tussen de meettaster en meetobject een elektrisch veld ontwikkelt wat het aantastgedrag zou verstoren. Tevens wordt hiermee bereikt dat geen spanningsboog getrokken wordt tussen de meettaster en het meetobject. De afstand waarover de stroomkring tussen de meettaster en het meetobject gesloten wordt ligt dan ook in de orde grootte van enkele nanometers.

Als meetobject wordt gebruik gemaakt van een eindmaat welke wordt ingeklemd in een precisieklem. Er wordt gebruik gemaakt van een eindmaat omdat de eindmaat oppervlakte een lage ruwheid hebben. Voor de opstelling zie figuur 3.3

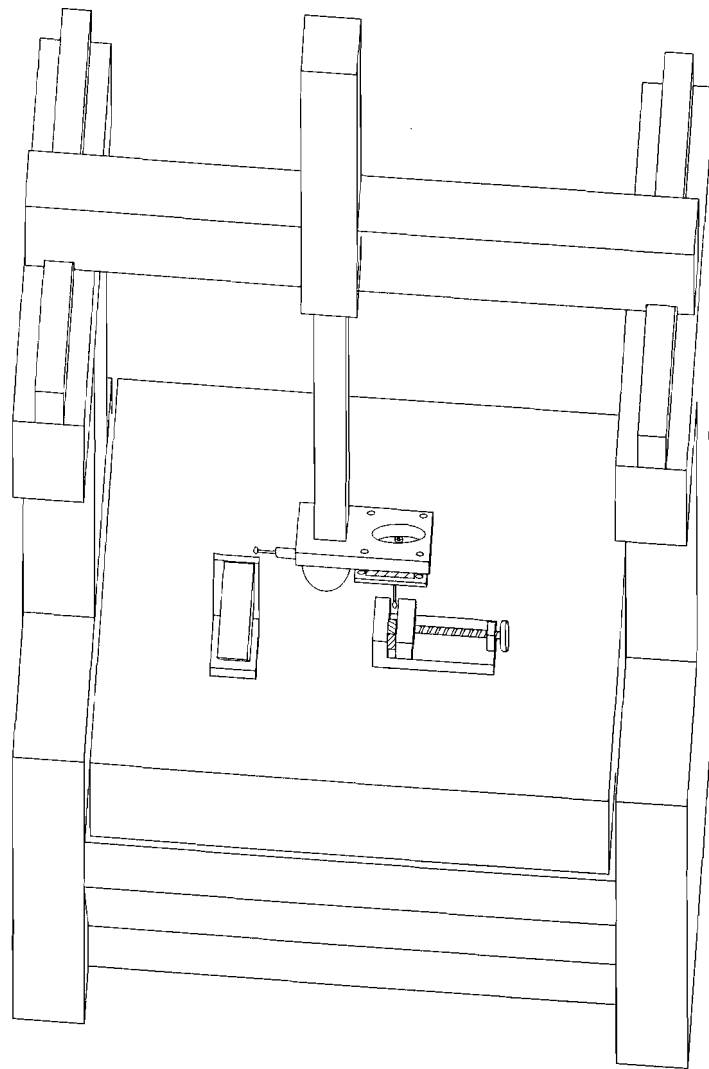
Figuur 3.3 Opstelling contactmeting



3.5 Uitvoering van de meting

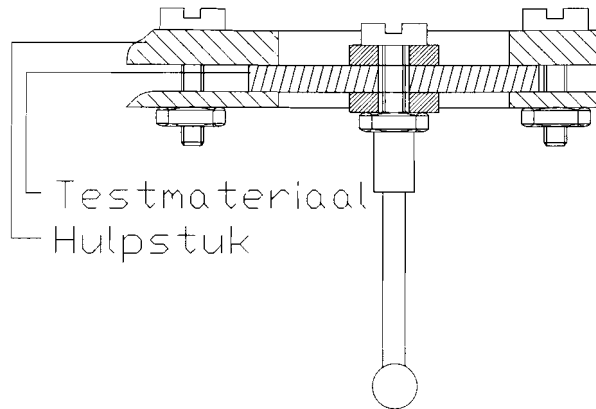
De metingen zijn uitgevoerd op een Mitutoyo meetmachine type FN 905. De sensoren (kracht en contact sensor) worden op de meettafel bevestigd, zodanig dat het aantast oppervlak van de sensor zich op ongeveer 100 mm boven het meettafel oppervlak bevinden, voor de opstelling zie figuur 3.4.

Figuur 3.4 Opstelling van de kracht- en contactmeting op de meetmachine



Voor het inklemmen van de te testen kunststoffen wordt een extra hulpstuk aan de pinole van de meetmachine bevestigd, zie figuur 3.5. Vanwege het feit dat voor de contactmeting de meettaster elektrisch geleidend moet zijn, wordt er gebruik gemaakt van een speciale meettaster.

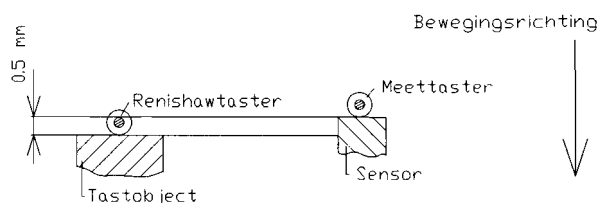
Figuur 3.5 Inklemming testmateriaal



De meettaster heeft een lengte van ongeveer 50 mm en de kogel heeft een diameter van 5 mm, de kogel is een standaard lagerkogel. Het nadeel van deze speciale meettaster is dat deze relatief zwaar is ten opzichte van de standaard gebruikte meettasters.

Voor het bepalen van de aantastverschijnselen laat men nu de meettaster, welke bevestigd is aan de kunststoffen, botsen met de sensor. Voor het stoppen van de meetmachine wordt gebruik gemaakt van de Renishawtaster. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de automatische noodstop. De automatische noodstop reageert wanneer de Renishawtaster een aantasting registreert gedurende verplaatsing met verplaatsingssnelheid (ijlsnelheid). Hiervoor wordt een extra object opgesteld in de bewegingsrichting van de meettasters, waarbij het aantastpunt van de Renishawtaster ongeveer 0.5 mm verder in de bewegingsrichting ligt als het aantastpunt van andere meettaster, zie figuur 3.6. De 0.5 mm is nodig daar het nieuwe meetsysteem de machine pas stopt indien voldoende posities van de meettaster zijn bepaald. Deze 0.5 mm hoeft niet bijzonder nauwkeurig ingesteld te worden (tolerantie uitsluitend positief, 0.5 mm of groter), daar de meetmachine een relatief lage vertraging heeft gedurende de totale meettijd.

Figuur 3.6 Aantastpositie meettaster en Renishawtaster



De meting verloopt nu als volgt:

1. De extra meettaster wordt 100 mm van het aantastoppervlak verwijderd, deze verplaatsing dient te geschieden in de richting van een van de machine-assen van de meetmachine. Dit om zoveel mogelijk de invloed van inschakelverschijnselen te voorkomen. Voor de horizontale metingen was dit de verplaatsing langs de Y- as van de meetmachine en voor de verticale metingen was dit de verplaatsing langs de Z- as van de meetmachine.
2. De gewenste verplaatsingssnelheid wordt ingesteld.
3. Men laat de tasters verplaatsen in de richting van de sensor zodanig dat deze met de verplaatsingssnelheid botst met de sensor.
4. Dit wordt herhaald om te controleren of de metingen reproduceren.
5. Deze procedure wordt herhaald voor verplaatsingssnelheden van:
 - 10 mm/s
 - 20 mm/s
 - 30 mm/s
 - 40 mm/s
 - 50 mm/s
 - 60 mm/s
 - 70 mm/sDe noodzaak van het grote aantal metingen zal nog nader worden toegelicht.
6. Dit wordt weer herhaald voor de verschillende te meten materialen:

3.5.1 Meetsnelheden

Het testen van het relatief grote aantal materialen werd noodzakelijk geacht daar in de literatuur geen aanknopingspunten te vinden zijn voor het specifieke materiaalgedrag dat optreedt bij dit soort exitaties. Met name de grootte van de belasting ten opzichte van het relatief korte tijdsinterval zorgt voor problemen. Door aan meerdere materialen te meten kan mogelijk enigszins inzicht verkregen worden in specifiek materiaalgedrag onder de optredende omstandigheden.

Het meten bij het relatief grote aantal aantastssnelheden is noodzakelijk daar het materiaal zich niet lineair gedraagt tussen 10 en 70 mm/s . Ten eerste is het dynamisch gedrag bij de verschillende materialen bij een snelheid van 10 en eventueel 20 en 30 mm/s afwijkend van het dynamisch gedrag bij hogere snelheden. Ook treedt er, afhankelijk van het beschouwde materiaal, een minimum op in de trillingstijd bij een aantastssnelheid van 30 tot 60 mm/s , afwijking ongeveer 10%. Als laatste treden er bij bepaalde materialen bij bepaalde snelheden bijzondere resonanties op in het systeem.

3.6 Meetresultaten

De metingen hebben weinig resultaat opgeleverd in termen van de doelstelling, het bepalen van materiaal karakteristieken. De metingen leveren wel de bevestiging ten aanzien van de modelleringsproblemen zoals beschreven in deel 1.

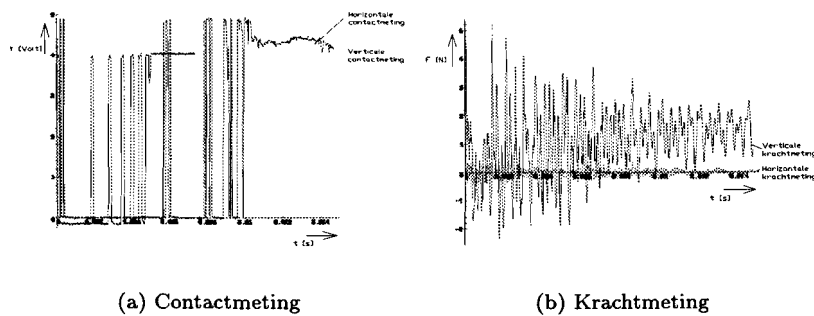
Bij de beschouwing van de contactmeting valt op hoe weinig de resultaten verschillen. Er is wel een verschil tussen de schuimrubbers, de volrubbers en de gels, maar er is maar weinig verschil tussen de verschillende schuimrubbers, volrubbers en gels onderling. Het trillingspatroon is bij alle materialen gelijkvormig. De trillingstijd varieert van $\pm 13 \text{ ms}$ bij schuimrubbers, $\pm 8 \text{ ms}$ bij volrubbers tot $\pm 5 \text{ ms}$ bij de gels. Het meest opvallende zijn de resultaten van de gels en het butyleen rubber. De resultaten van deze metingen voldoen het best aan de gestelde ontwerpisen voor de meettaster ophanging.

De krachtmetingen hebben weinig bruikbaar resultaat opgeleverd daar de meetresultaten volledig overschaduwd worden door ruis. De resultaten zijn alleen bruikbaar in termen van relatieve vergelijking tussen de verschillende metingen.

Bij de meetresultaten moet onderscheid gemaakt worden tussen de horizontale en de verticale aantasting. Dit was ook te verwachten daar de testconstructie slechts rotatie symmetrisch was in het $(X - Y)_{vlak}$. De meettasterophanging is in $Z_{richting}$ (verticale aantasting) aanmerkelijk stijver, het geen in de meetresultaten ook duidelijk te herkennen is, zie grafiek 3.7.

Dit manco in de constructie wordt voorlopig geaccepteerd daar ook het Renis-

Figuur 3.7 Vergelijking horizontale- en verticale aantasting



haw en Zeis aantaststelsysteem aanmerkelijk slechter dynamisch gedrag vertonen bij aantasting in de verticale richting. De relatie tussen de horizontale en de verticale stijfheid is als volgt: Aantasting in verticale richting levert een trillingstijd die 1 à 2 maal kleiner is dan bij de verticale richting. De kracht die optreedt bij de verticale aantasting is een factor 3 à 5 maal groter dan de kracht bij horizontale aantasting.

Erg opvallend is het verschil in kracht en trillingstijd bij verschillende meetsnelheden. Daar de contactmeting een kleine variatie geeft in de trillingstijd bij verschillende snelheden. Terwijl in de krachtmeting een duidelijk onderscheid te herkennen is in de gemeten krachten bij de verschillende snelheden.

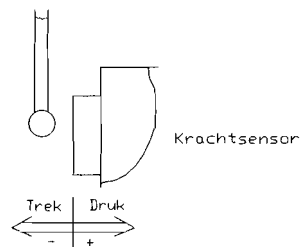
Om zo goed mogelijk uit te sluiten dat het gemeten dynamisch gedrag veroorzaakt wordt door de aantasting en niet door het dynamisch gedrag van de meetmachine, worden op het hulpstuk ter bevestiging van het testmateriaal en aan de pinole de versnellingen gemeten. Hieruit valt af te leiden dat het dynamisch gedrag van de meetmachine geen invloed heeft op de aantasting. De trillingen in de meetmachine zijn pas merkbaar nadat de meettaster is uitgetrild en dus tegen het meetobject staat.

3.6.1 Krachtmeting

De slechte resultaten van de krachtmeting worden in hoofdzaak veroorzaakt door 2 stoortermen.

Eigentrilling sensor Ten gevolge van de aantasting wordt de krachtsensor in trilling gebracht, in de meting overheersen na de eerste aantasting van de meettaster de effecten ten gevolgen van de eigentrilling van de sensor. Ten gevolge van de eerste aantasting wordt een relatief grote hoeveelheid energieovergedragen aan de krachtsensor waardoor deze gaat trillen, daar nu de energie inhouden van de op één volgende trillingen aanmerkelijk kleiner zijn. Zijn de effecten hiervan ook na genoeg niet te herkennen in de meetresultaten. Men kan dit zien alsof men met een zware hamer tegen een gong slaat en gelijk daarna met een miniatuur hamertje tegen de nog in trilling zijnde gong slaat. De effecten ten gevolgen van het aanslaan van de gong met het miniatuur hammertje zijn niet waarneembaar ten opzichte van de trillingseffecten ten gevolge van de aanslag met de zware hamer. Men meet dus als ware het impulsgedrag van de krachtsensor. Dit wordt ook bevestigd door de meetresultaten, in de metingen worden negatieve krachten gemeten terwijl de aantasting uitsluitend een positieve kracht kan veroorzaken. De meettaster kan uitsluitend een drukkracht op de sensor uitoefenen, zie figuur 3.8. De trillingen van de sensor worden vooral veroorzaakt door de voorspanelementen van het piëzo-elektrisch kristal.

Figuur 3.8 Richting kracht op de kracht sensor



Netspanning Het blijkt dat de netspanning ter plaatse van de meetmachine dermate vervuuld is dat de ruis ten gevolge van de netspanning de meting gedeeltelijk overschaduwde. De problemen zijn mede zo groot door dat vrij grote signaal versterking noodzakelijk is $O(10^3)$ tot $O(10^4)$.

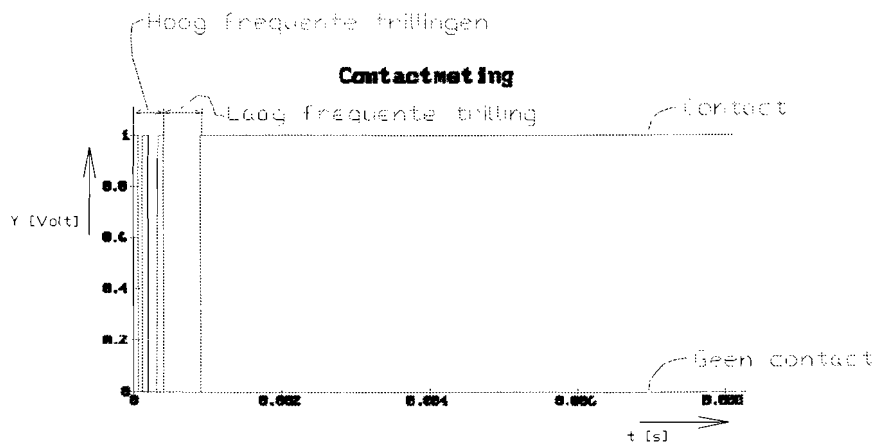
De krachtmetingen zijn nog op een aantal punten bruikbaar. De eerste positieve hoge piek in de kracht is een maximum voor de aantastkracht. De kracht na uittrilling van de krachtsensor is een indicatie voor de meetkracht. En tevens zijn de metingen nog onderling vergelijkbaar zodat men trends kan bepalen. Uit de krachtmeting volgt dat de meetkracht, onafhankelijk van het materiaal, na uitrillen afhankelijk is van de meetsnelheid. Hetgeen vanuit de ontwerpeisen gezien ongewenst is.

3.6.2 Contactmeting

In termen van de oorspronkelijke doelstelling kan ook de contactmeting weinig bijdragen. Een kwantificering van de materiaalparameters is aan de hand van de contactmeting niet mogelijk. De contactmeting levert echter wel een goed inzicht in het belang van de stijfheid en de demping ten aanzien van de ontwerpeisen. Tevens komen uit de contactmetingen ook de problemen uit de modelleringen naar voren.

Invloed van de tasterstaaf en het contactoppervlak In de contact meting zijn duidelijk twee trillingsvormen te onderscheiden een hoog frequente en een laag frequente trilling, zie grafiek 3.9. De hoog frequente trillingen zijn waarschijnlijk trillingen in het contact en trillingen van de meettasterstaaf. De laagfrequente trilling is meest waarschijnlijk een trilling van de kunststof ophanging.

Figuur 3.9 Hoog en laag frequente trillingen in de horizontale contactmeting



Gedurende de eerste hoog frequente trillingen wordt met de versnellingsmeting nog niets waargenomen. Pas bij de eerste laag frequente trillingen worden de trillingen ook waargenomen met de versnellingsmeter.

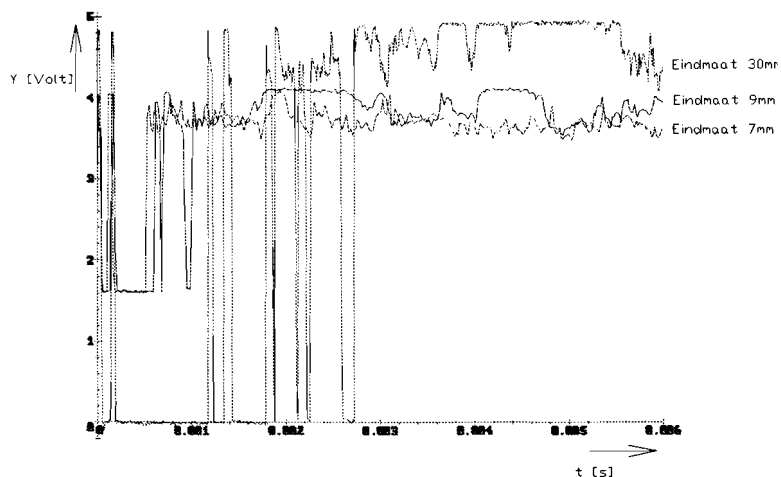
Hieruit zou men voorzichtig kunnen concluderen dat de kunststof ophanging pas in trilling komt bij de laag frequente trillingen. Het geen betekent dat de hoog frequente trillingen niet afkomstig zijn van de kunststof ophanging.

De maximum meetkracht treedt op bij de eerste hoog frequente trillingen. Dit betekent dat de tasterstaaf en het contact de maximum kracht bepalen bij een gegeven snelheid. De maximum kracht is dus nagenoeg onafhankelijk van de tasterophanging. Daar soortgelijk verloop van het trillingsgedrag is waar te nemen bij zowel de meettaster, de Renishawtaster en de Zeisstaster kan aangenomen worden dat de meetkracht bepaald wordt door deze eerste trilling. Hetgeen betekent dat de tasterstaaf en het contact dus de maximum kracht bepalen.

Stijfheid meetobject De contactmetingen zijn gedaan tegen een eindmaat van 30 mm, een eindmaat van 9 mm en tegen een eindmaat van 7 mm. Duidelijk is het verschil in trillingstijd te herkennen in grafiek 3.10. Daar geen andere parameters gevarieerd zijn, duidt dit op de invloed van de stijfheid van het meetobject.

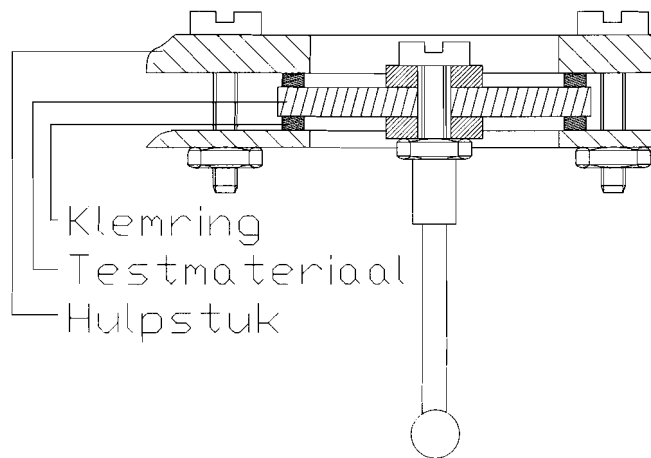
Het kan echter ook een verduidelijking van de invloed van de stijfheid van het contact zijn. Als gevolg van de aantasting gaan elastische golven lopen in de eindmaat waarvan het gedrag beïnvloed wordt door de afmetingen van de eindmaat.

Figuur 3.10 Invloed van de stijfheid op de contactmeting



Tevens kan aan de hand van de contactmeting geverifieerd worden of de methode van inklemming van het kunststof geen invloed heeft op het dynamisch gedrag van de meettaster. Hiertoe is het kunststof ingeklemd tussen twee extra ringen zodat er een gedefinieerde inklemming ontstaat, zie ook figuur 3.11.

Figuur 3.11 Inklemming met extra ringen



Tussen de twee situaties wordt geen verschil in trillingsgedrag gemeten, zodat men er vanuit kan gaan dat de inklemming van de kunststof membranen geen invloed heeft op het dynamisch gedrag.

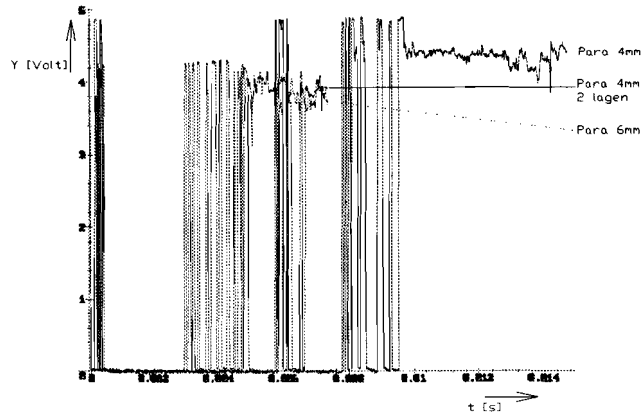
Op basis van de contactmeting zijn nog een aantal algemene dingen te zeggen ten aanzien van het materiaalgedrag. Zo blijkt dat afhankelijk van het materiaal er bij snelheden van 10 tot 30 mm/s trillingsgedrag optreedt, dat afwijkend is van het trillingsgedrag bij hogere snelheden. Het aantal hoog-frequente trillingen direct na de aantasting is hoger, terwijl dit eerste hoog-frequente gedrag slechter reproduceert. Men ziet een variatie in het aantal hoog-frequente trillingen. Ook varieert de tijd tussen de hoog-frequente trillingen meer. Afhankelijk van het materiaal treedt bij een snelheid tussen 30 en 50 mm/s een minimale trillingstijd op.

Door stapeling van een aantal lagen kunststof is onderzocht wat de invloed is van de dikte van het materiaal op het dynamischegedrag. Door vergroting van de dikte wordt de stijfheid van de meetasterophanging verhoogd. De verandering van de trillingstijd is echter niet evenredig met de verandering van de kracht zoals men zou verwachten uit de vergelijking van de horizontale en verticale aantasting. De kracht neemt aanmerkelijk meer toe dan dat de trillingstijd afneemt.

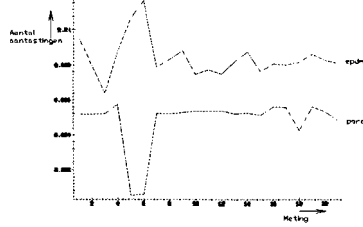
De bedoeling van stapeling was tevens het testen van de invloed van de wrijving tussen de gestapelde lagen kunststof op het dempingsgedrag van de ophanging. Daar de trillingstijd juist niet onevenredig afneemt, zijn de dempingseffecten ten gevolge van de wrijving tussen de gestapelde lagen kunststof, van verwaarloosbare invloed, zie ook grafiek 3.12.

Aan de hand van een aantal grafieken wordt verduidelijkt wat de invloed is van de variatie van het materiaal en de aantastsnelheid op het dynamisch gedrag van de meetasterophanging.

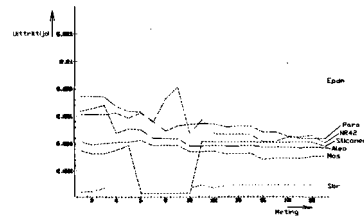
Figuur 3.12 Invloed van de dikte van het testmateriaal op het aantast gedrag



Figuur 3.13 Uittriltijd bij horizontale aantasting

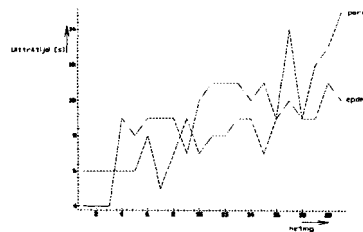


Figuur 3.14 Uittriltijd bij verticale aantasting

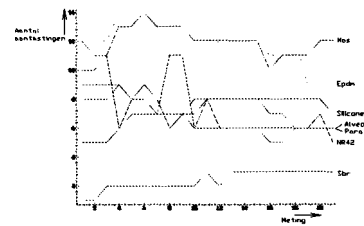


In grafiek 3.13 is aan gegeven wat de uittriltijden zijn van een aantal testmaterialen bij aantasting in de horizontale richting. Voor de verticale aantasting is dit weergegeven in grafiek 3.14. Op de horizontale as van de grafieken zijn de metingen bij de snelheden van 10 tot 70 mm/s uitgezet. (Per snelheid 3 metingen, meting 1 is 10 mm/s . Meting 10 is meting 1 bij 40 mm/s .) Voor de horizontale meting zijn uitgezet de resultaten van *para* en *epdm*. Voor de verticale metingen zijn de resultaten van *para*, *siliconen rubber*, *sbr*, *alveo*, *epdm* en *mos*.

Figuur 3.15 Aantal aantastingen bij horizontale aantasting

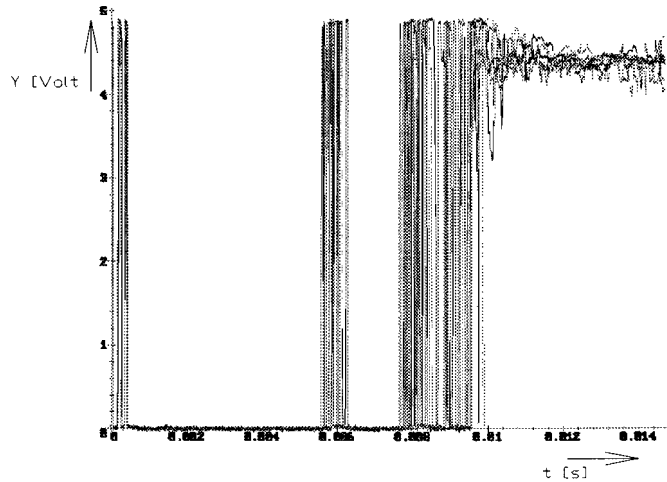


Figuur 3.16 Aantal aantastingen bij verticale aantasting

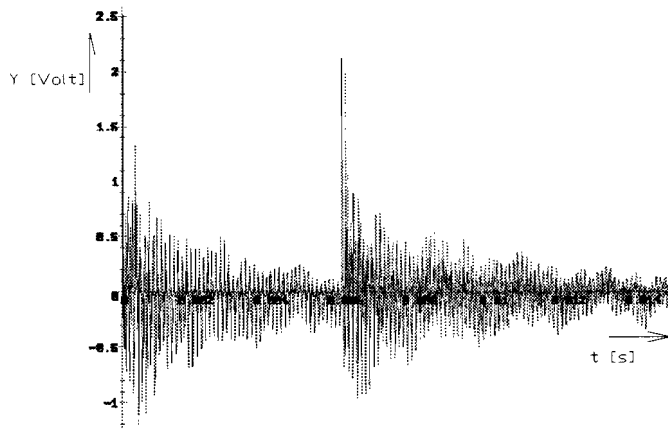


In de grafieken 3.15 en 3.16 is uitgezet hoeveel keer de taster stuitert voordat deze uitgetrild is. De grafieken 3.17 en 3.18 geven de resultaten van de krachtmetingen en de contactmeting voor *para* bij aantastnelheden van 10 tot 70 mm/s .

Figuur 3.17 Horizontale contactmetingen voor *para*



Figuur 3.18 Horizontale krachtmetingen voor *para*



Op basis van de meetresultaten kan het volgende worden gezegd over de materialen.

De schuimrubbers vertonen onderling weinig verschil in dynamisch gedrag met uitzondering van het *mos* rubber. De trillingstijd varieert omtrent de 13 ms met een afwijking omtrent de 20 %. Dit is aanmerkelijk minder dan men zou verwachten op de stijfheid en structuur van de verschillende schuimrubbers.

Een ander belangrijk probleem van de schuimrubbers is het relaxatie gedrag dat deze vertonen. De problemen liggen niet in het dynamisch gedrag zoals gemeten, maar meer in het feit dat men de effecten van relaxatiegedrag op langere termijn moeilijk kan voorspellen. Het relaxatie gedrag leidt er toe dat de meet-taster na een aantal aantastingen scheef staat ten opzichte van de beginstand, hetgeen uit esthetisch oogpunt toch tot ongewenst kan worden verklaard. De krachten bij de schuimrubbers gemeten zijn, zijn het laagst.

Het afwijkende dynamisch gedrag van *mos* rubber kan verklaard worden uit het feit dat alleen dit schuimrubber een gesloten huid heeft. Hierdoor heeft het *mos* rubber een dynamisch gedrag dat meer lijkt op het dynamisch gedrag van de volrubbers.

De volrubbers tonen ook onderling weinig afwijkend dynamisch gedrag, met uitzondering van het *butyleen* rubber. De trillingstijden van de volrubbers liggen omtrent de 8 ms met een afwijking omtrent de 15 %. Het stuggere *SBR* vertoont het te verwachten korte trillingsgedrag met de daarbij behorende hogere meetkrachten. Het *butyleen* rubber vertoont een aanmerkelijk korte trillingstijd zonder een verhoging van de meetkrachten. Dit komt overeen met het verwachtte sterkere dempingsgedrag van *butyleen* rubber. Het *butyleen* rubber voldoet dan ook als beste volrubber aan de ontwerpeisen ten aanzien van de ophanging. Een nadeel van het *butyleen* rubber is echter het kleefgedrag. Indien het *butyleen* rubber gedurende langere tijd met een ander oppervlak in contact is, lijkt het bij het loshalen van het *butyleen* rubber van de oppervlakken alsof het geheel aan elkaar is gelijmd. Dit hoeft echter geen belangrijke belemmering te zijn in een goed ontwerp.

Een ander belangrijk probleem van *butyleen* rubber en *para* rubber is dat het onder belasting kristallisatie vertoont, waarna het bij ontlasten weer de amorfe toestand inneemt. De mate waarin het rubber weer in zijn amorfe toestand terugkeert, is afhankelijk van de belastingscycli en de belastingshistorie. Als gevolg hiervan kan het materiaalgedrag met de loop van de tijd gaan veranderen. Op het moment is nog geen inzicht in hoeverre de materiaal eigenschappen kunnen gaan veranderen.

De gels vertonen in termen van de ontwerpeisen het gunstigste dynamische gedrag, met uitzondering van *gel 3*. De kracht en de trillingstijd zijn van de gewenste orde van grote. Dit is vooral te danken aan het sterkere dempingsgedrag van de gels. Het afwijkende gedrag van *gel 3* wordt veroorzaakt door het feit dat deze gel gevuld is met polystyreenbolletjes, hetgeen het vloeien van de gel bemoeilijkt. Een belangrijk probleem van de gels is dat het niet vormvast is, zodat voor iedere meting de meettasterophanging in een nul positie moet worden gebracht ten opzichte van de gel, daar anders geen goede verdeling van de gel ten opzichte van de meettaster ophanging wordt verkregen. Hierdoor zou dan het dynamisch gedrag weer worden beïnvloed. Een ander belangrijk probleem is het uitdrogen van de gel. Een goede afdichting zou deze problemen echter kunnen voorkomen.

3.7 Conclusies

Uit de metingen kunnen weinig conclusies getrokken worden ten aanzien van de materiaalparameters. Terwijl de materialen grote onderlinge verschillen vertonen bij vergelijking van het materiaalgedrag, zoals stijfheid, weerstand tegen indrukking, de relaxtie van het materiaal en het trilgedrag bij aanmerkelijk grote uitwijking dan in de meting, gedraagt het materiaal zich in de metingen relatief gelijk. Een beperkt verschil is te herkennen tussen de schuimrubbers, de volrubbers en de gels, maar in termen van afwijking van de ontwerpeisen zijn deze verschillen klein. Indien men dan de verschillende materialen bij schuimrubbers (volrubbers en gels) onderling beschouwt, zijn de verschillen nog kleiner. Op basis van vergelijking van de meetresultaten van de verschillende materialen kan alleen gezegd worden dat er een bepaalde verhouding moet zijn tussen de stijfheid en de demping. Indien de stijfheid te hoog is, is de trillingstijd wel korter maar zijn ook de optredende krachten groter. Door het verhogen van de demping bij gelijk blijvende stijfheid, treedt ook een kleinere trillingstijd op bij een veel geringere toename van de meetkracht. Het probleem is nu echter dat de gewenste demping tot nu toe uitsluitend gerealiseerd kan worden met gels of vloeistoffen.

Op basis van onderlinge vergelijking van het dynamisch gedrag van de verschillende materialen kan men met volgende zeggen.

Bij de schuimrubbers kan de stijfheid nog iets toenemen zonder dat de meetkrachten te groot zullen worden. In vergelijking met de volrubbers ontbreekt het meer aan voldoende demping.

Voor de volrubbers geldt dat bij horizontale aantasting de krachten omtrent de gestelde maxima zijn, echter de trillingstijd is nog te lang. Een relatieve verhoging van de demping zou ook hier tot beter trillingsgedrag leiden. Dit blijkt ook uit de resultaten met *butyleen* rubber. *Butyleen* rubber heeft voor volrubbers een relatief hoge demping. Hetgeen, zoals ook blijkt uit de metingen, leidt tot een korte trillingstijd bij gelijk blijvende meetkrachten.

De gels vertonen het beste dynamische gedrag. Het probleem van de gels is echter dat deze niet voldoende vormvast zijn.

Enige belangrijke problemen van de materialen zijn:

Relaxtie De relaxtie is vooral duidelijk te zien bij de schuimrubbers. Bij de volrubbers merkt men bij de metingen nagenoeg niets van relaxtievverschijnselen. Men zou er in een uiteindelijk ontwerp wel rekening mee moeten houden.

Kristallisatie De kristallisatie treedt vooral op bij *para* en *butyleen* rubber en kan een belangrijke verandering van het materiaalgedrag in de loop van de tijd veroorzaken. Het is nog niet duidelijk in hoeverre hier bij de gels ook rekening mee moet worden gehouden.

Kleefgedrag Het kleefgedrag treedt vooral duidelijk op bij *butyleen* rubber, maar kan ook optreden bij andere soorten rubbers. Met dit kleefgedrag dient rekening te worden gehouden in een uiteindelijk ontwerp.

4 Verplaatsings meting

4.1 Doelstelling

Het meten van de verplaatsing heeft als doel meer inzicht te krijgen in het trillingsgedrag van de meettaster. Het meest belangrijke hierbij is de maximale uitwijking die optreedt, daar dit tot eventuele extra beperkingen vanuit het meetsysteem leidt. Ook biedt de gemeten verplaatsing een mogelijkheid om op basis hiervan modelberekening te doen. Op basis van de verplaatsing kan aan de hand van het model de kracht worden bepaald, zodat het model verifieerbaar wordt.

4.2 Meetmethode voor de verplaatsing

Daar vanuit de literatuur geen methode bekend is waarmee de verplaatsingen gevisualiseerd kunnen worden, is eerst onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om de verplaatsing te visualiseren. Aan de visualisatie worden de volgende eisen gesteld:

- Een meetbereik van 0 tot $6/10 \text{ mm}^1$.
- Een oplossend vermogen van $1 \mu\text{m}$.
- Een meettijd van ongeveer 10 ms .
- Een samplefrequentie van ten minste 50 kHz .

Voor de metingen zijn een aantal methoden voorgesteld. Men dient er echter rekening mee te houden dat men op de grens van het technisch mogelijke bezig is.

High speed camera deze zijn onder te verdelen in twee systemen:

- Annaloge techniek Deze techniek kent twee belangrijke problemen. De beeldfrequentie die nodig is voor het bepalen van een resolutie van $1 \mu\text{m}$, bij een meetsnelheid van 50 mm/s ligt boven de 1 Mhz . Voor zover bekend is in Nederland niet zo een camera beschikbaar. Tevens is de vereiste meettijd niet haalbaar.

¹Simulation dynamisch messender mehrkoordinatentaster, Fakultät für Maschinenwesen der Universität Hannover, Dipl. -Ing. Michael Gelles

- Digitale techniek Hierbij wordt het beeld gedigitaliseerd en opgeslagen. De camera's halen samplefrequenties tot 12 MHz. De opslagcapaciteit is meestal echter beperkt tot een tiental beelden. Direct datatransport naar een computer is niet eenvoudig te realiseren. Een ander belangrijk probleem is de hoeveelheid data die worden verkregen bij een meting (± 650 Mbyte), hetgeen zou leiden tot een onverwerkbaar hoeveelheid data.

Line scan camera Voor een line scan camera ligt de gewenste resolutie op de grens van het mogelijke bij het gewenste meetbereik.

Foto's Hierbij wordt slechts een gedeelte van de trilling per aantasting beschouwd of wordt de foto meerdere malen belicht. Een beeld samenstelling op basis van meerdere foto's is slechts mogelijk wanneer de meting voldoende repeatable is.

- Stroboscopische belichting Hierbij wordt de foto meerdere malen belicht. Hierbij is het van belang dat men de verschillende belichtingstijdstippen in de foto kan herkennen. De afzonderlijk belichte beelden mogen elkaar niet te veel overlappen. Daar een standaard stroboscoop niet snel genoeg achter elkaar kan belichten, dient er nu te worden gekeken naar een ander belichtingssysteem.
 - LED stroboscoop Standaard power LED's halen de gewenste flitsfrequentie. Het is echter een probleem om met LED's een convergente lichtbundel te produceren van voldoende intensiteit. Bij het parallel schakelen van een aantal LED's, voor het verhogen van de intensiteit van de lichtbundel, zal de lichtbundel te veel gaan divergeren.
 - Xenon flitser Uitsluitend een xenon-lamp is geschikt om de gewenste flitsfrequenties te halen. Het probleem met andere lampen is dat boog ontlading niet voldoende snel uitdempt danwel op te starten is. Het probleem van de xenon lamp is dat deze vrij grote vermogens vraagt. Het schakelen van dergelijke hoge vermogens is niet mogelijk met de huidige electronica en als men gebruik maakt van hoog vermogens electronica zijn de schakelsnelheden veel te laag.²
 - High speed chutter In plaats van de lichtbron te pulseren kan men ook het licht gepulserd doorlaten. Dit is mogelijk met een roterend diafragma. Echter het synchroniseren van het diafragma met het aantast proces is bijzonder moeilijk. Een andere mogelijkheid is het gebruik maken van een LCD welke met de gewenste puls-greunentie doorlatend en ondoorlatend geschakeld worden. Het probleem is echter dat LCD's met voldoende hoge schakelsnelheden nog in prototyp fase zijn. Het gaat hierbij dan om Fery LCD's.

²Dergelijke opstellingen zijn echter reeds eerder gerealiseerd voor onderzoek naar de lichtflits effecten van atoombommen.

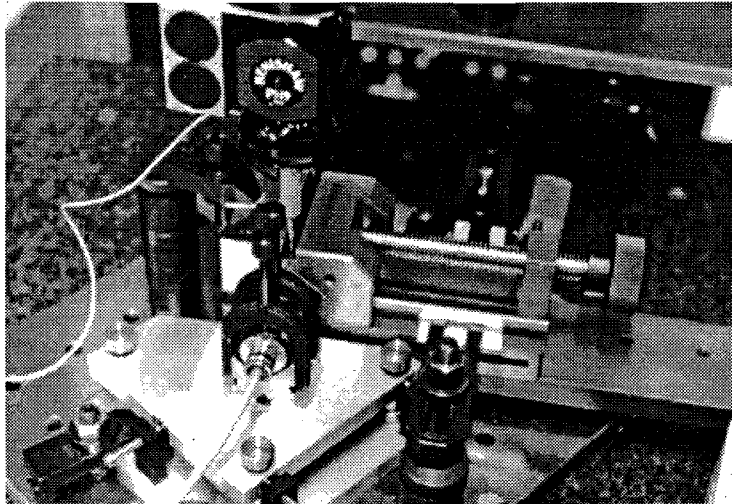
LDGU sensor Dit is een sensor welke aan de hand van het gereflecteerde licht kan bepalen hoever het reflecterend oppervlakte van de sensor verwijderd is. Een nadeel van deze sensor is het beperkte meetbereik, lineair in de orde van grote van $< 1/10 \text{ mm}$. Het totale meetbereik inclusief het niet lineaire gedeelte ligt omtrent de $3/10 \text{ mm}$. Een ander probleem bij de sensor is dat normaal gemeten wordt tegen een vlak reflecterend oppervlak. In het geval van de opstelling moet gemeten worden tegen het bol oppervlak van de tasterkogel. Een ander probleem is dat de sensor ook gevoelig is voor hoekverdraaiingen, hetgeen leidt tot afwijkingen in de verplaatsings meting.

Vanwege de beschikbaarheid van de sensor is gekozen om gebruik te maken van de LDGU sensor.

4.3 Opstelling

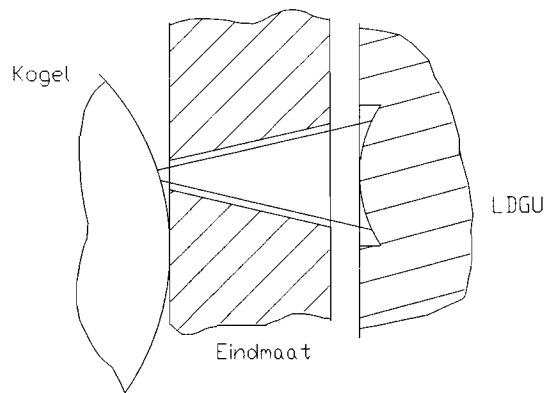
De sensor wordt opgesteld tegen de eindmaat waar tegen wordt aangetast. Om de sensor zicht te geven op de tasterkogel wordt in de eindmaat een zo klein mogelijk gat gemaakt. Het gat moet zo klein mogelijk zijn om de stijfheid van het aantastoppervlak zo hoog mogelijk te houden. Om het gat zo klein mogelijk te houden krijgt het gat de vorm van de lichtkegel van de sensor. Om de sensor uit te kunnen richten ten opzichte van kogel, wordt de sensor opgesteld op een verplaatsingstafel, zie figuur 4.1. Als gevolg van de gevoeligheid van de sensor

Figuur 4.1 Foto opstelling LDGU sensor



en het beperkte meetbereik dient veel zorg te worden besteed aan de stabiliteit en het uitrichten (uitrichten van de sensor op de kogel) van de opstelling, zie ook figuur 4.2.

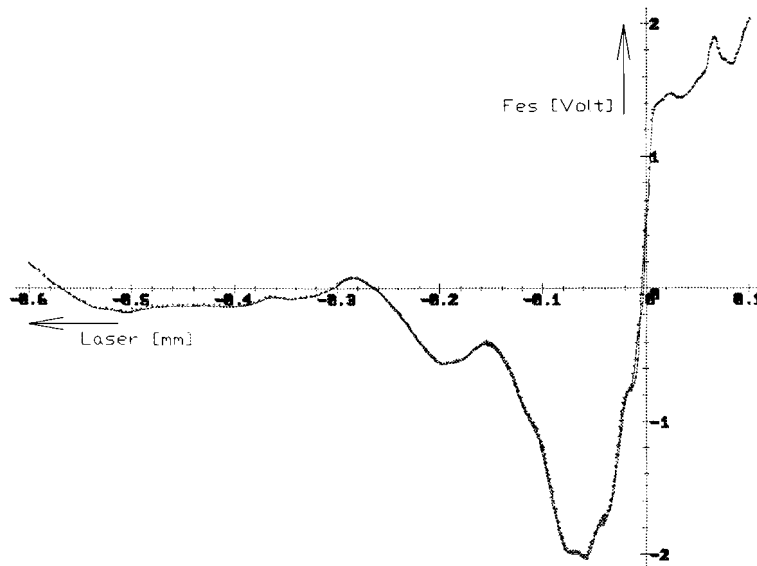
Figuur 4.2 Opstelling LDGU sensor



4.4 Calibratie

De sensor wordt gecalibreerd in de opstelling, hiervoor is gebruik gemaakt van een laser opstelling voor lengtemeting. Dit is gedaan om de omstandigheden tijdens de calibratie meting zoveel mogelijk gelijk te houden aan de omstandigheden voor de uiteindelijke verplaatsingsmeting. De meetwaarden van de

Figuur 4.3 Calibratie curve van de LDGU bepaald met de laser opstelling



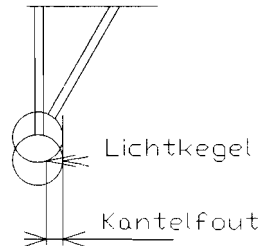
sensor worden gecorreleerd aan de gemeten verplaatsing met de laser, zie ook grafiek 4.3. Om gebruik te kunnen maken van het niet lineaire gedeelte van de calibratiecurve, wordt de calibratiecurve gefit met een aantal splines. Hierbij is de waarde gemeten met de sensor de ingangswaarde voor de relatie en de verplaatsing de uitkomst. Om gebruik te kunnen maken van het niet lineaire gedeelte van de calibratie curve zal tevens bij gehouden moeten worden hoeveel maxima gepasseerd zijn. De samplefrequentie van de sensor en de sensor uitlezing zijn voldoende hoog om geen maxima tijdens de metingen te hoeven missen.

4.4.1 Afwijking in de meting

Bij de calibratie kan de spanning van de sensor gemeten worden met een nauwkeurigheid van $\approx 1/100 V$. De positie kan met de laser gemeten worden met een nauwkeurigheid van $1/10 \mu m$. De uitgangsspanning van de sensor kan, bij de uiteindelijke meting, met een nauwkeurigheid van $1/10 V$. Hiermee varieert de resolutie van de meting afhankelijk van de positie (positie in de calibratie curve), tussen de nm tot een $1/100 mm$.

Ten gevolge van de verplaatsing tijdens de aantasting verplaatst de positie van de spot van de sensor op de tastkogel. Indien ten gevolge van de aantasting de verplaatsing alleen in de bewegingsrichting is, blijft deze afwijking beneden de nm , zie ook figuur 4.4.

Figuur 4.4 Fout ten gevolge van het verplaatsen van de spot over de kogel



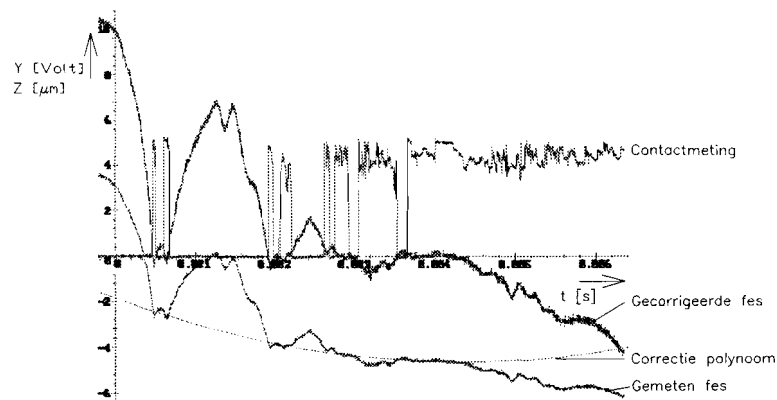
Door de niet perfecte ruwheid van de tasterkogel kunnen aanmerkelijke afwijkingen ontstaan in de meting. De afwijkingen zijn afhankelijk van het ruwheidsprofiel. Vooral de hellingen van de groeven waaruit het ruwheidsprofiel is opgebouwd, veroorzaken afwijkingen in de meetresultaten, daar de sensor ook gevoelig is voor hoekafwijkingen van het oppervlak.

De sensor mag niet te veel drift vertonen, daar de calibratiemeting en de uiteindelijke aantastmetingen al gauw enige tijd gaan kosten.

4.5 Meetresultaten

De verkregen meetresultaten zijn vrij onbetrouwbaar. Tussen de verschillende metingen bij een gelijke aantastsnelheid treden duidelijke verschillen op in de contactmeting die niet te herkennen zijn in de verplaatsingsmeting. Tevens blijkt uit de afstandmeting een toenadering van de tasterkogel alsof deze tot $\pm 4 \mu m$ in de eindmaat wordt gedrukt. Deze grote indrukking treedt op bij de laatste trillingen, terwijl dan de kracht nog slechts in de orde grootte van $1/10 N$ is. Dit terwijl de krachten aan het begin van de aantasting groter zijn en de indrukking bij de laatste trillingen dus kleiner zouden moeten zijn. Indien men er van uitgaat dat de indrukking niet toe, danwel afneemt gedurende de trillingen, is een 2^{de} orde lijn gefit als nulwaarde van de meting, zie ook figuur 4.5. Op basis van deze resultaten kan men voorzichtig zeggen dat de maximale uitwijking omtrent de $10 \mu m$ ligt. Men kan zien dat er enige indrukking van het meetobject optreedt, in de orde grootte van enige $1/10 \mu m$. Nogmaals moet herhaald worden dat de metingen erg onbetrouwbaar zijn, kleine afwijkingen in de positie van de spot op de tasterkogel leveren groter dan verwachte afwijkingen in de meetresultaten.

Figuur 4.5 Meetresultaten LDGU sensor met geschatte compensatie voor de nullijn, bij een meetsnelheid van 70 mm/s



4.6 Conclusies

Als gevolg van de onbetrouwbaarheid van de meting kunnen geen conclusies worden verbonden aan de meetresultaten. Het is nog onduidelijk waardoor deze afwijkingen worden veroorzaakt.

5 Conclusies een aanbevelingen ten aanzien van ontwerp meettaster

Om aan de hand van een model de ontwerpeisen te vertalen in materiaal parameters is bijzonder moeilijk. De problemen treden op bij het modeleren van het aantastgedrag van de meettaster.

De vele gelijkheden in de contact metingen doen vermoeden dat het materiaalgedrag toch enigszins generalistisch zou moeten kunnen worden beschreven.

In het onderzoek is weinig aandacht besteed aan de invloed van de geometrie van de constructie op het dynamisch gedrag. Daar de uiteindelijke constructie compacter moet zijn dan de testconstructies, dient bij de verschaling rekening te worden gehouden met afwijkingen in het dynamisch gedrag, ten opzichte van het dynamisch gedrag gemeten in de test constructie.

Voor de kunststoffen is nog geen inzicht op de invloed van veroudering van de kunststof op het dynamisch gedrag.

De *gel 1* vertoont het gunstigste dynamische gedrag. De problemen met het toepassen van deze *gel* in een constructie zijn echter bijzonder moeilijk. Het beste dynamische gedrag wordt dan vertoont door *butyleen* rubber. Echter blijft er nog een grootte discrepantie tussen de ontwerpeisen en de resultaten bereikt met *butyleen* rubber.

De onderzoeksopdracht heeft uiteindelijk grotendeels bestaan uit het meten van dynamische verschijnselen op relatief korte tijdsbasis en bij relatief kleine krachten over een vrij groot frequentiegebied.

Op dit gebied zijn nog maar weinig kennis en meetmethoden beschikbaar.

Concrete aanbevelingen ten aanzien van het ontwerp van de meettaster zijn bijzonder moeilijk te geven daar er nog te veel open vragen zijn.

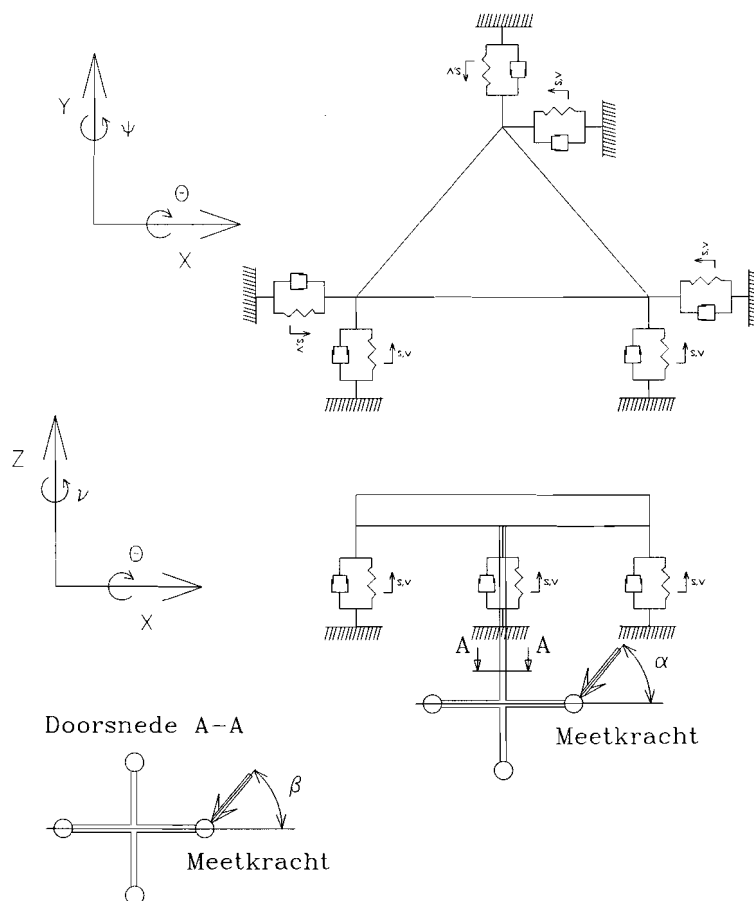
Ten aanzien van de modellering is er nog te weinig kennis omtrent de contactverschijnselen, de beschrijving van het materiaalgedrag van de kunststoffen.

Voor het meten van de verplaatsing van de meettaster en het meten van de dynamische meetkracht zullen nieuwe experimenten moeten worden gedaan. Hiervoor zal moeten worden gekeken naar nieuwe meettechnieken om de gewenste nauwkeurigheid te kunnen bereiken.

A Differentiaal vergelijking voor het eenvoudige model

In het eerste model is aangenomen dat het meetplatform zal roteren om zijn middelpunt. Deze aanname is acceptabel indien de ondersteuning ringvormig is. Dit volgt ook al uit de eis dat de ophanging rotatie symmetrisch moet zijn in de optredende meetkrachten.

Figuur A.1 Model 1



Onder de aanname dat de verplaatsingen gelijk zijn aan een hoek \times een afstand αr en de rotaties geen verplaatsingen van betekenis veroorzaken in andere richtingen, worden de bewegingsvergelijkingen:

Voor de rotaties

$$\begin{aligned} J_\theta \ddot{\theta} &= R \left(-\theta Rk - \dot{\theta} Rd \right) - R \left[(\theta + \pi) Rk + \dot{\theta} Rd \right] \\ &+ F_{aantast} \cos(\alpha) \cos(\beta) Taster_{offset} \\ &+ F_{aantast} \cos(\alpha) \sin(\beta) Taster_{lengte} \end{aligned} \quad (A.1)$$

$$\begin{aligned} J_\psi \ddot{\psi} &= {}^2/3 R \left(-\psi^2/3 Rk - \dot{\psi}^2/3 Rd \right) \\ &- 2^1/3 R \left[{}^1/3 (\psi + \pi) Rk - {}^1/3 \dot{\psi} Rd \right] \\ &+ \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} Taster_{offset} \end{aligned} \quad (A.2)$$

$$\begin{aligned} J_\nu \ddot{\nu} &= -R(\nu Rk + \dot{\nu} Rd) - {}^2/3 R \left[{}^2/3 (\nu + {}^1/2 \pi) Rk + {}^2/3 \dot{\nu} Rd \right] \\ &+ R \left[-(\nu + \pi) Rk - \dot{\nu} Rd \right] \\ &+ {}^1/3 R \left[-{}^1/3 (\nu + {}^1/2 \pi) Rk - {}^1/3 \dot{\nu} Rd \right] \\ &- {}^1/3 R \left[{}^1/3 (\nu + {}^1/2 \pi) Rk + {}^1/3 \dot{\nu} Rd \right] \\ &- \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} Taster_{lengte} \end{aligned}$$

Voor de translaties

$$m \ddot{z} = -3(kz + \dot{z}d) - \sin(\beta) F_{aantast} \quad (A.4)$$

$$m \ddot{y} = -2(ky + \dot{y}d) + (-ky - \dot{y}d) - \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} \quad (A.5)$$

$$m \ddot{x} = 2(-kx - \dot{x}d) - (kx + \dot{x}d) - \cos(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} \quad (A.6)$$

Uit de differentiaalvergelijkingen blijkt dat indien men uitgaat van kleine rotaties de differentiaalvergelijkingen voor translatie en rotatie ongekoppeld zijn en dus translatie en rotatie afzonderlijk kunnen worden beschouwd. Aangezien er relatief grote translaties en rotaties kunnen optreden bij het stoppen van de meetmachine, zijn de bewegingsvergelijkingen nogmaals opgezet waarbij de centrifugaalkrachten en coroliversnellingen verwaarloosd zijn.

De impulsmomentvergelijkingen $J\dot{\omega} = \frac{d}{dt} (m\omega R \star R)$

$$\begin{aligned} J_\theta \ddot{\theta} &= -{}^1/2 \sqrt{3} R \cos(\theta) \left({}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) k + {}^1/2 \sqrt{3} \cos(\theta) \dot{\theta} d \right) \\ &+ {}^1/2 \sqrt{3} R \cos(\theta) \left(-{}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) k - {}^1/2 \sqrt{3} \cos(\theta) \dot{\theta} d \right) \\ &- {}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \left(-{}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \tan(\theta) Rk - {}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \dot{\theta} Rd \right) \\ &+ {}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \left({}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \tan(\theta) Rk + {}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) \dot{\theta} Rd \right) \\ &+ F_{aantast} \cos(\alpha) \cos(\beta) Taster_{offset} + F_{aantast} \cos(\alpha) \sin(\beta) Taster_{lengte} \end{aligned} \quad (A.7)$$

$$\begin{aligned}
 J_\psi \ddot{\psi} = & -\frac{1}{3} R \cos(\psi) 2 \left(\frac{1}{3} \sin(\psi) R k + \frac{1}{3} \cos(\psi) \dot{\psi} R d \right) & (A.8) \\
 & + \frac{2}{3} R \cos(\psi) \left(-\frac{2}{3} \sin(\psi) R k - \frac{2}{3} \cos(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\
 & - \frac{1}{3} R \sin(\psi) 2 \left(\frac{1}{3} \sin(\psi) \tan(\psi) R k + \frac{1}{3} \sin(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\
 & - \frac{2}{3} R \sin(\psi) \left(\frac{2}{3} \sin(\psi) \tan(\psi) R k + \frac{2}{3} \sin(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\
 & + \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} T_{asteroffset}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_\nu \ddot{\nu} = & -\frac{1}{2} \sqrt{3} R \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \sin(\nu) R k + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cos(\nu) \dot{\nu} R d \right) & (A.9) \\
 & + \frac{1}{3} \cos(\nu) R \left(-\frac{1}{3} \sin(\nu) \tan(\nu) R k - \frac{1}{3} \sin(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - \frac{2}{3} \cos(\nu) R \left(-\frac{2}{3} \sin(\nu) R k - \frac{2}{3} \cos(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - \frac{1}{3} \cos(\nu) R \left(\frac{1}{3} \sin(\nu) \tan(\nu) R k + \frac{1}{3} \sin(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & + \frac{1}{2} \sqrt{3} R \left(-\frac{1}{2} \sqrt{3} \sin(\nu) R k - \frac{1}{2} \sqrt{3} \cos(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - \frac{2}{3} \sin(\nu) R \left(\frac{2}{3} \sin(\nu) \tan(\nu) R k + \frac{2}{3} \sin(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast} T_{asterlengte}
 \end{aligned}$$

De impulsvergelijkingen $m \dot{v} = \frac{d}{dt} (m v)$

$$\begin{aligned}
 m \ddot{x} = & -2 (-x k - \dot{x} d) & (A.10) \\
 & - \left(-\frac{2}{3} \sin(\nu) R k - \frac{2}{3} \cos(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - 2 \left(-\frac{1}{3} \sin(\nu) \tan(\nu) R k - \frac{1}{3} \sin(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & + 2 \left(\frac{1}{3} \sin(\psi) \tan(\psi) R k + \frac{1}{3} \sin(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\
 & - \left(-\frac{2}{3} \sin(\psi) \tan(\psi) R k - \frac{2}{3} \sin(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\
 & - \cos(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast}
 \end{aligned}$$

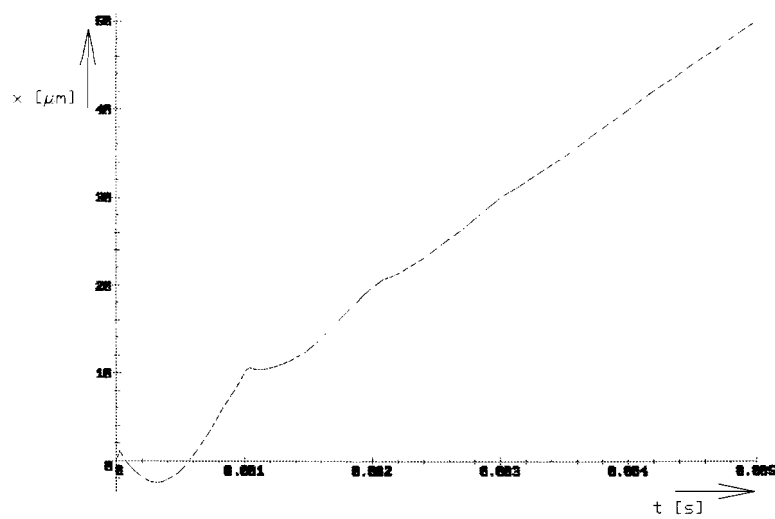
$$\begin{aligned}
 m \ddot{y} = & -2 (y k + \dot{y} d) & (A.11) \\
 & + (-y k - \dot{y} d) \\
 & - 2 \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \sin(\nu) R k + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cos(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - \left(\frac{2}{3} \sin(\nu) \tan(\nu) R k + \frac{2}{3} \sin(\nu) \dot{\nu} R d \right) \\
 & - 2 \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \sin(\theta) \tan(\theta) R k + \frac{1}{2} \sqrt{3} \sin(\theta) \dot{\theta} R d \right) \\
 & - \sin(\alpha) \cos(\beta) F_{aantast}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \ddot{z} = & -3 (z k + \dot{z} d) & (A.12) \\ & -2 \left({}^1/2 \sqrt{3} \sin(\theta) R k + {}^1/2 \sqrt{3} \cos(\theta) \dot{\theta} R d \right) \\ & - \left({}^2/3 \sin(\psi) R k + {}^2/3 \cos(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\ & -2 \left({}^1/3 \sin(\psi) R k + {}^1/3 \cos(\psi) \dot{\psi} R d \right) \\ & - \sin(\beta) F_{aantast} \end{aligned}$$

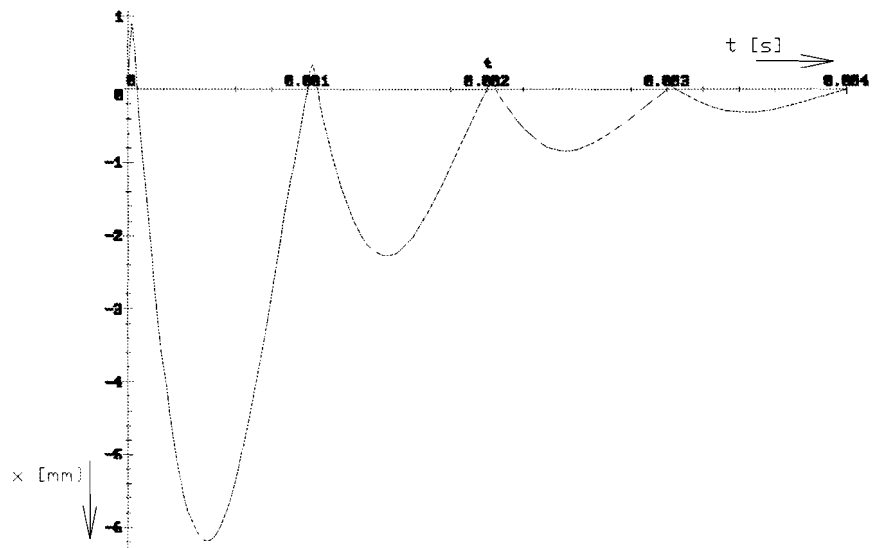
B Grafieken

Ten behoeve van de duidelijkheid zijn in dit hoofdstuk nogmaals alle grafieken afgedrukt.

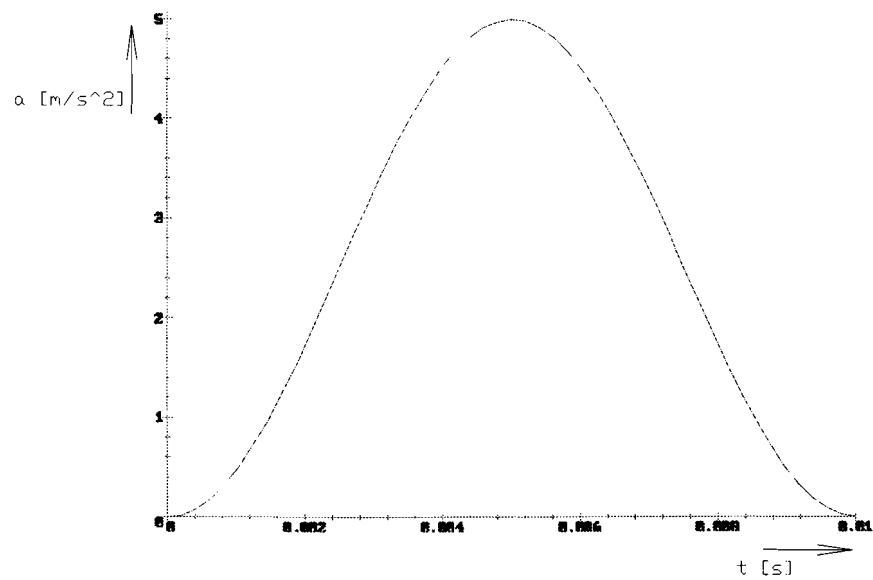
Figuur B.1 Beweging van de taster



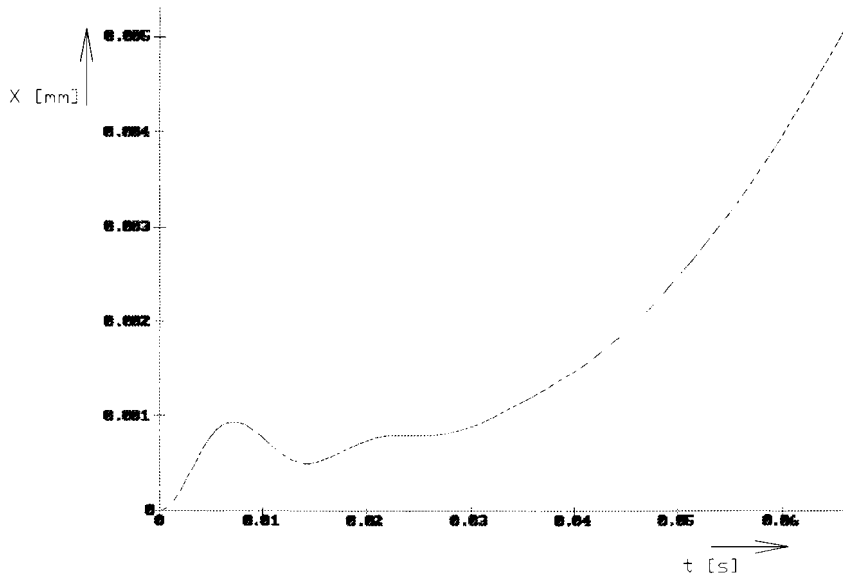
Figuur B.2 Uitdempende sinussen



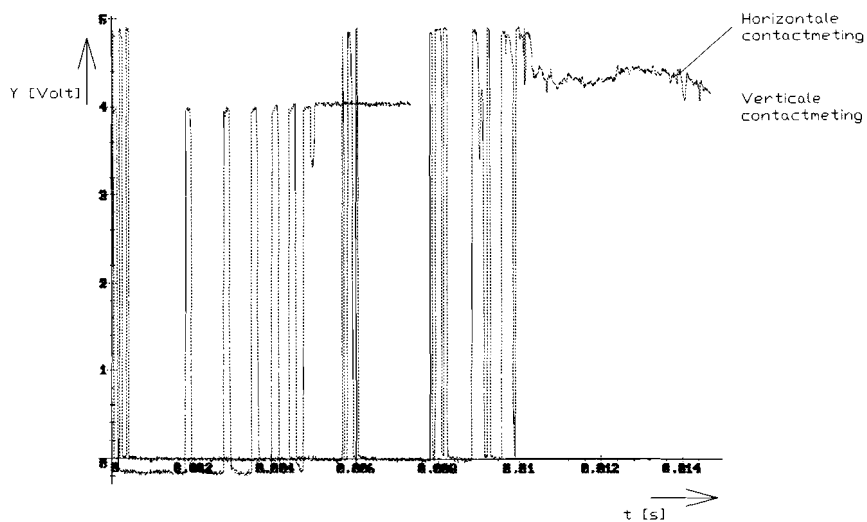
Figuur B.3 Versnelling van de meetmachine



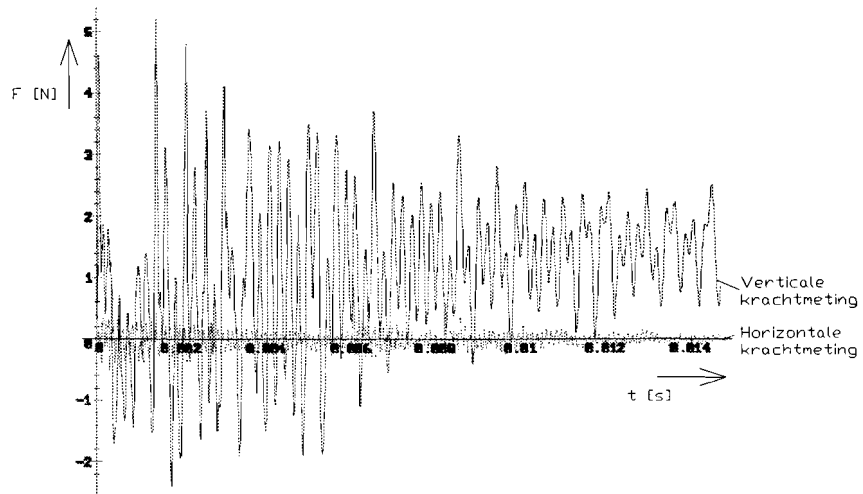
Figuur B.4 Uitwijking van de taster ten gevolge van het versnellen



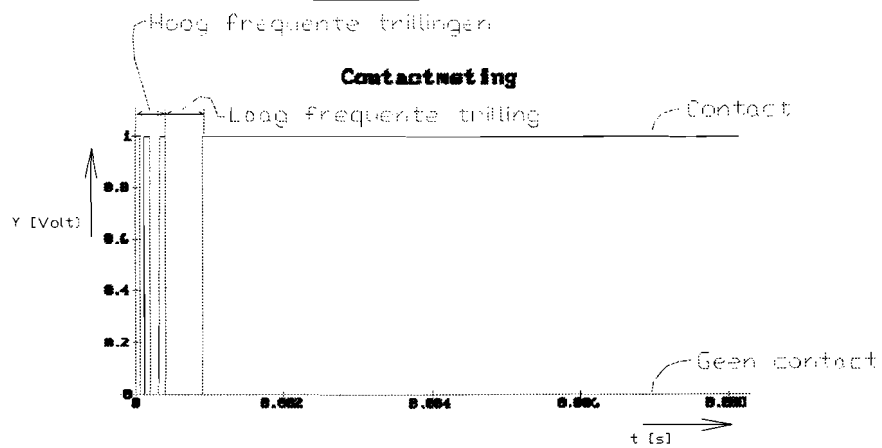
Figuur B.5 Contactmeting



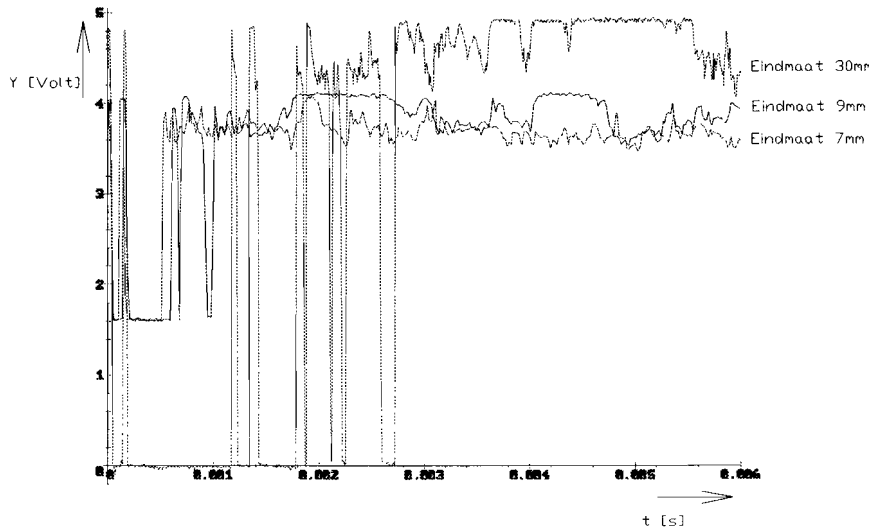
Figuur B.6 Krachtmeting



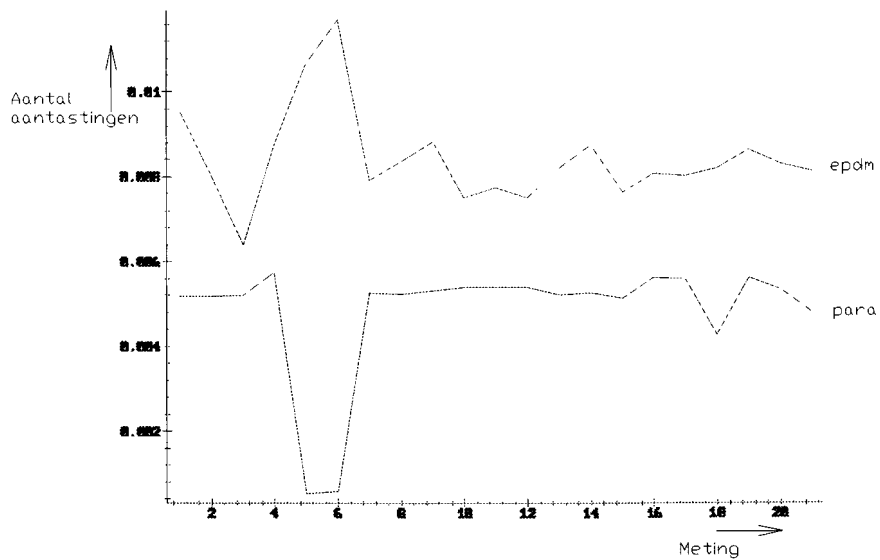
Figuur B.7 Hoog en laag frequente trillingen in de horizontale contactmeting



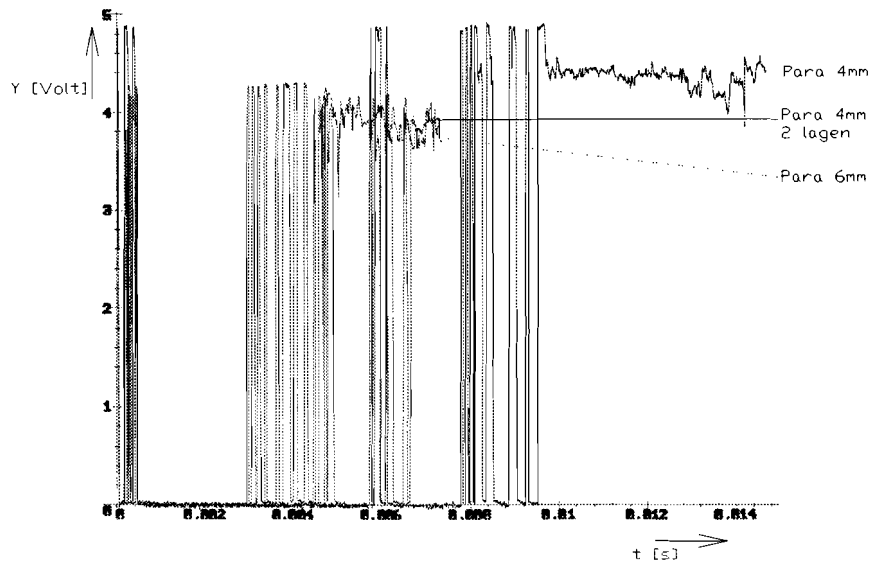
Figuur B.8 Invloed van de stijfheid op de contactmeting



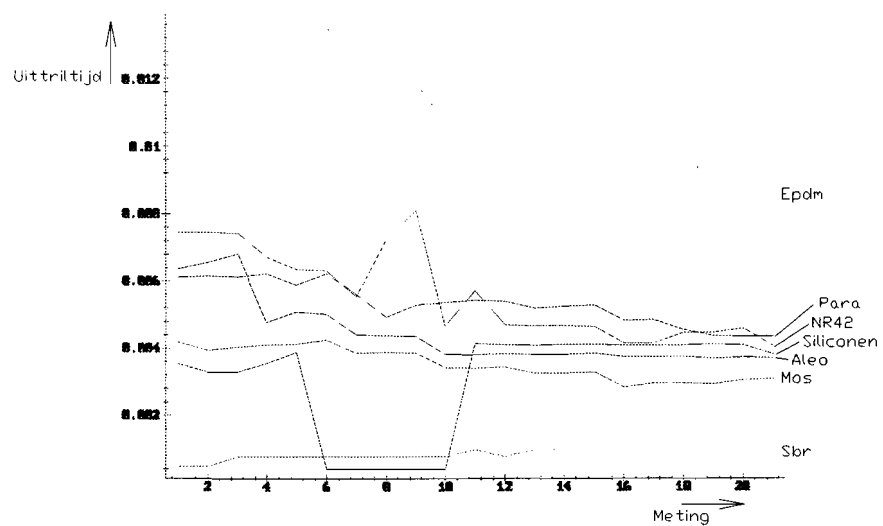
Figuur B.10 Uittriltijd bij horizontale aantasting



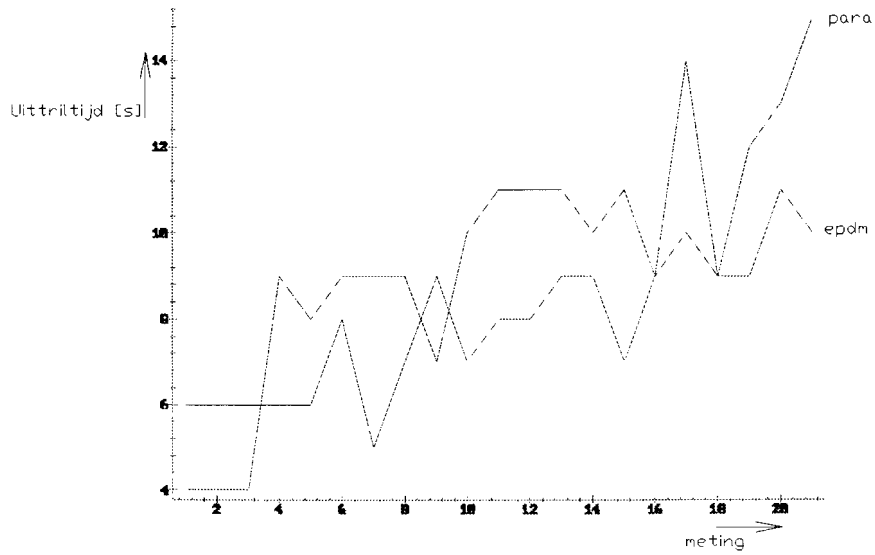
Figuur B.9 Invloed van de dikte van het testmateriaal op het aantast gedrag



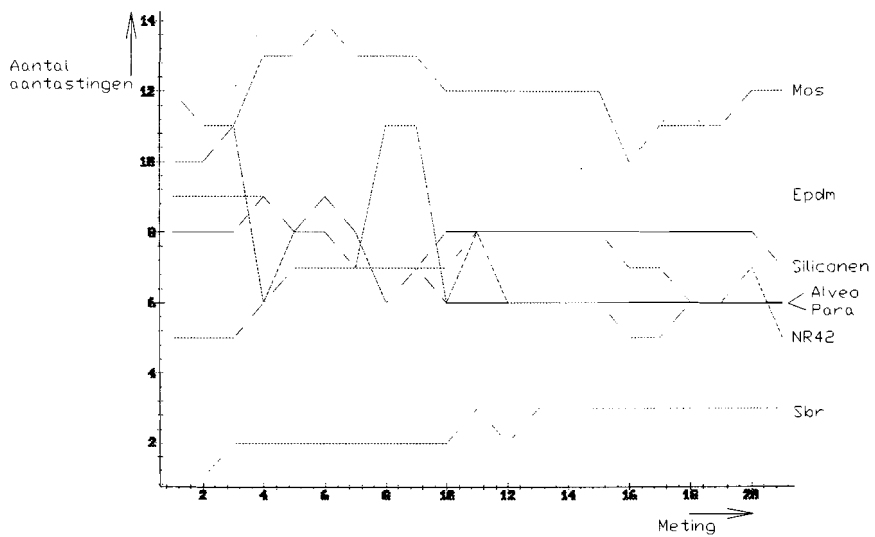
Figuur B.11 Uittriltijd bij verticale aantasting



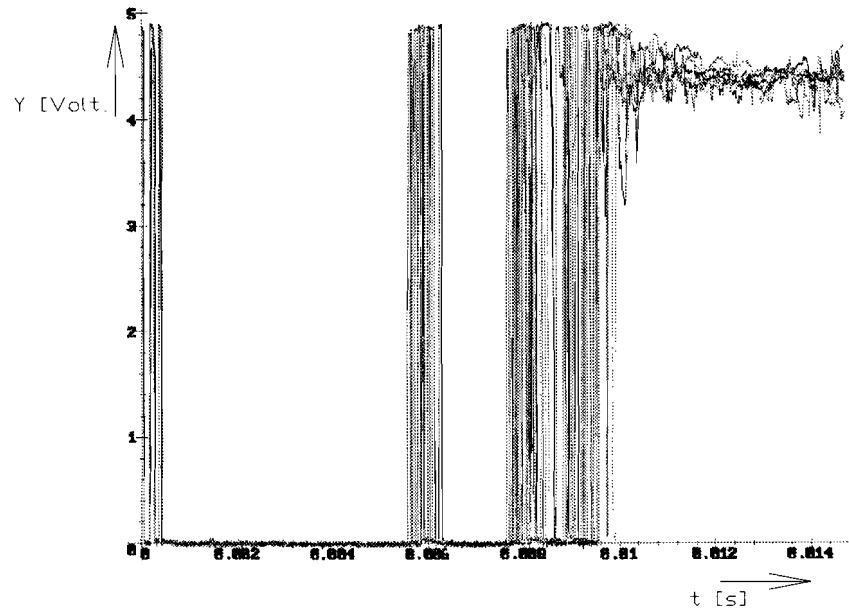
Figuur B.12 Aantal aantastingen bij horizontale aantasting



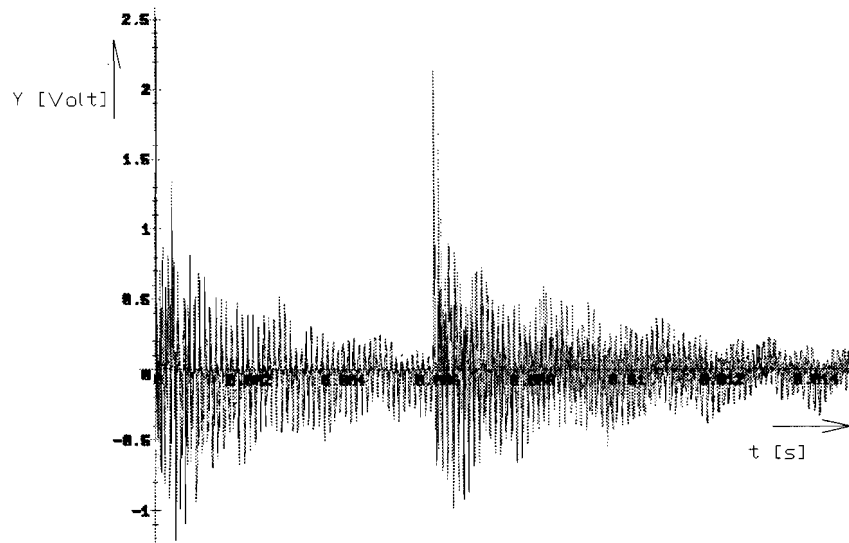
Figuur B.13 Aantal aantastingen bij verticale aantasting



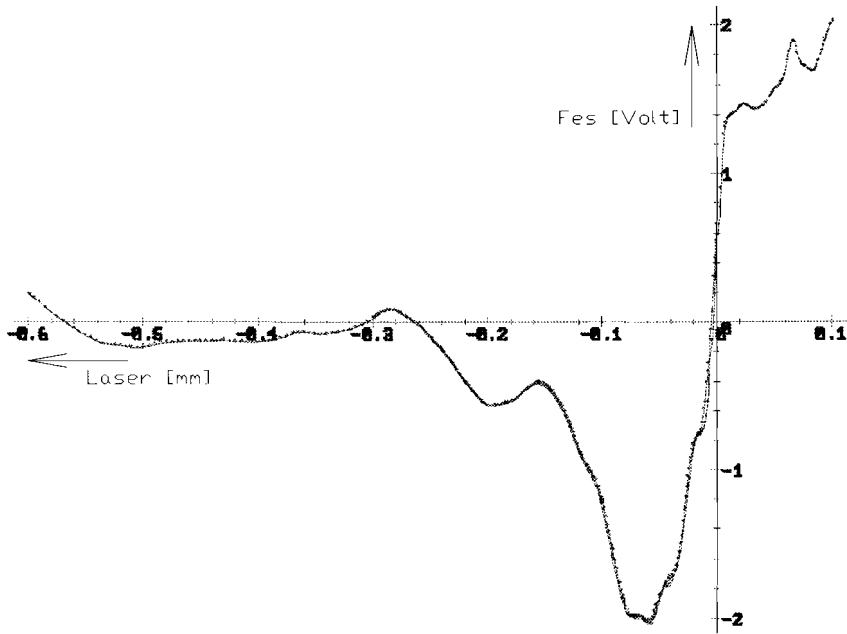
Figuur B.14 Horizontale contactmetingen voor *para*



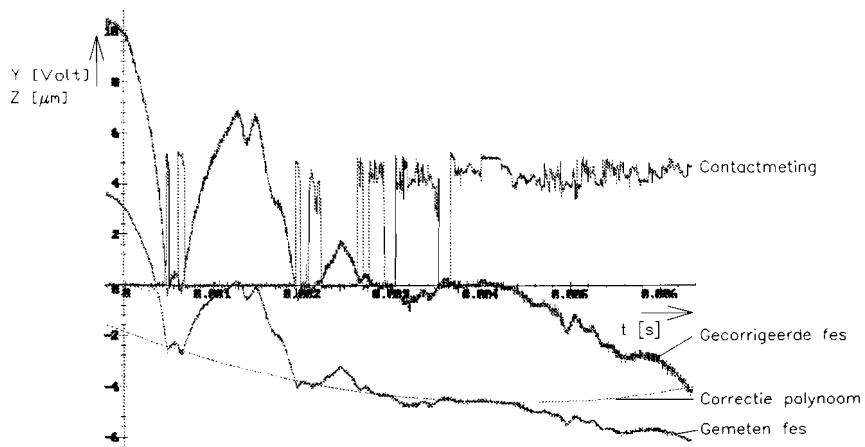
Figuur B.15 Horizontale krachtmetingen voor *para*



Figuur B.16 Calibratie curve van de LDGU bepaald met de laser opstelling



Figuur B.17 Meetresultaten LDGU sensor met geschatte compensatie voor de nullijn, bij een meetsnelheid van 70 mm/s



C Literatur

An experimental surfacewave method for recording force-time curves in elastic impacts
Journal of Applied Mechanics, march 1959

Entwurf eines Messtaster zur mehrdimensionalen dynamischen Abtastung
räumlicher Konturen
Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Hannover
Diplm. -Ing. Hartmut Janochar

The investigations on selected dynamical phenomena in the heads of multi-coordinate measuring devices
Annals of the CIRP volume 33/1/1984

Random vibration of mechanical systems
K. Piszczek and J. Nizioł
John Wiley & Sons limited
ISBN 0-85312-347-0

Simulation dynamisch messender mehrkoordinatentaster
Fakultät für Maschinenwesen der Universität Hannover
Dipl. -Ing. Michael Gelles