

Impactbescherming van een kalibratiesample

Citation for published version (APA):

Hu, B. (2007). *Impactbescherming van een kalibratiesample*. (DCT rapporten; Vol. 2007.075). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2007

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.

**Impactbescherming van een
kalibratiesample**

B. Hu

DCT 2007.075

Individual Masters Project Report

Coaches: dr. ir. P.C.J.N. Rosielle
ir. C. Werner

TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY

Eindhoven, May 2007

Inhoudsopgave

Inleiding	1
1. Probleemstelling	2
2. Modelvorming	3
3. Numerieke simulatie	6
Matlab lsim	6
Gravitatie	6
Contactstijfheid	6
Botskracht	8
Simulatie	8
Resultaten	9
4. Concepten	11
Beschermdoos	11
Beschermkapje	12
Grijpmechanisme	14
Conclusie	15
Bijlagen	16
Bibliografie	22

Inleiding

Nauwkeurige meetmachines voor de micro en zelfs nano schaal zijn als hulpmiddelen ontstaan door de opkomst van de productietechnieken van deze kleine dimensies. Om bruikbare resultaten te krijgen van de metingen, is het belangrijk dat de meetmachines goed zijn gekalibreerd. Een manier om ze te kalibreren is door ze met een uitermate nauwkeurig bepaalde referentie te vergelijken en zodoende bij te stellen.

Eén van de gebruikte toepassingen om meetmachines te kalibreren is door gebruik te maken van een silicium plaatje (verder ook aangeduid als silicium sample). Deze is met het lithografie principe geëetst, waardoor groefstructuren aan het oppervlak is aangebracht. Door met een geijkte meetmachine de oppervlakte op te meten, krijgt men een hoogtekaart van het silicium plaatje. Dit kan dan als de referentie gebruikt worden voor andere meetmachines. Het opmeten van het silicium plaatje is van lange adem. De meetmachine waarmee dit gebeurt, meet met behulp van het Abbe principe. Deze meetmachine heeft slechts een beperkt meetbereik met de gewenste nauwkeurigheid. Voor het maken van de hoogtekaart moet het silicium plaatje daardoor regelmatig verplaatst worden zodat het altijd in het nauwkeurigste meetpunt van de meetmachine staat.

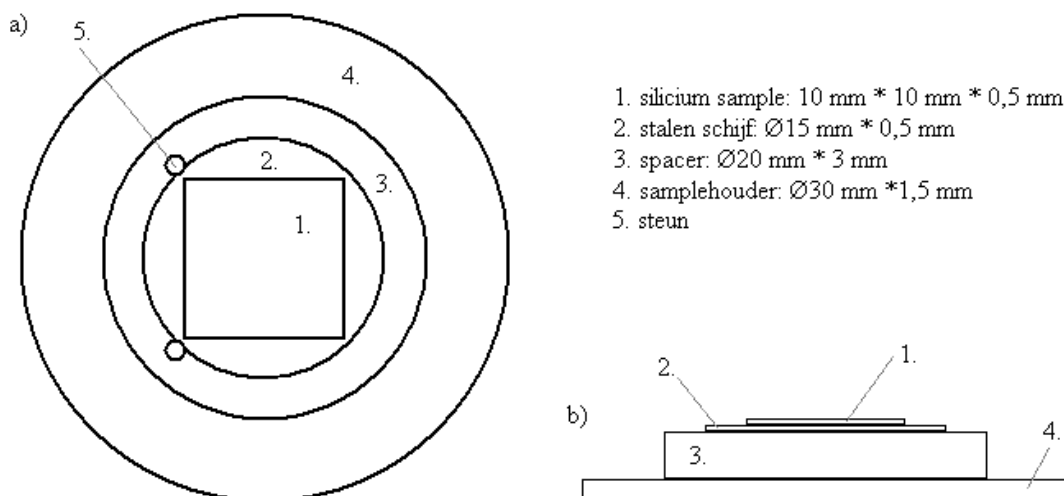
In dit rapport wordt er gekeken naar de praktische aspecten van het werken met het silicium plaatje. Het moet handzaam zijn en ook bestand zijn tegen een eventuele val en ermee gepaarde botskracht. De probleemstelling zal uitgebreid besproken worden. Daarna wordt een model gepresenteerd voor de val die via numerieke simulaties opgelost wordt. Verder worden er concepten aangehaald om de doelstellingen te verwezenlijken. Afsluitend met een conclusie.

1. Probleemstelling

In dit verslag draait het allemaal om het silicium plaatje. Dit is gelijmd op een stalen schijfje voor de nodige stijfheid. De silicium sample wordt gebruikt als referentie om meetmachines te kalibreren. Eerst moet het plaatje zelf heel nauwkeurig worden opgemeten. Met een atomic force microscoop (AFM) wordt de geëtste structuur op het silicium plaatje gemeten. Een fijne naaldtaster van 10 μm lang op een 100 μm buigbalkje beweegt over de oppervlakte van het plaatje. Door het reliëf van het plaatje gaat het buigbalkje doorbuigen. Door middel van een laser-interferometer wordt de doorbuiging gemeten en kan men de hoogte bepalen. Het meten geschied volgens het Abbe principe, om maximale nauwkeurigheid te behouden, wordt slechts 1 mm^2 gebruikt. Omdat het plaatje een groter oppervlak heeft, moet het regelmatig worden verschoven op de juiste plek in het bereik te positioneren. Dit gebeurt handmatig met manipulators onder een optische microscoop. De verschuiving is alleen voor de horizontale vlak. Omdat de absolute hoogte, uitgezonderd het reliëf zelf, niet verschilt, kan deze op de juiste hoogte gehouden door een cilindrische spacer. Omdat het niet gewenst is om de sample met schijf op de spacer te lijmen, is deze met behulp van voorspanning opgehangen. Twee paddestoelvormige steunen zijn in de spacer geslagen. Deze vormen een hoek van 90° gezien van het middelpunt van de bovencirkel van de spacer. Deze bepalen de positie, en een veer de opspankracht van de schijf met sample. Verder is de spacer gelijmd aan de samplehouder die voor de uitlijning van de sample in de AFM zorgt.

Zoals vermeld moet het geheel met sample regelmatig verplaatst worden van de ene naar de andere microscoop. Het herpositioneren van de sample gebeurt door een serie van handelingen. De lijmverbinding van spacer en samplehouder wordt verbroken. Na het verzetten wordt het weer met een paar druppel lijm terug aangehecht. Het is belangrijk op te merken dat de relatieve positie van de sample tot de spacer altijd hetzelfde blijft. Dit is om ieder plek terug te vinden op de sample. De voorspanning van de sample is voldoende, zodanig dat het niet op zichzelf gaat verplaatsen. De voorspanning zou ook bestand moeten zijn tegen de normale handelingen tijdens het overplaatsen tussen de twee microscopen. Door versnellingen kunnen krachten op de veer werken zodat de sample loskomt van de steunen en terug in de steunen schiet en hierbij een andere oriëntatie aanneemt in de steunen. Dit zou betekenen dat de metingen weer opnieuw moeten gedaan worden. Maar erger is dat het uit de voorspanning schiet en daardoor ook stuk gaat.

Als opdracht is gegeven om een bescherming voor het geheel te vervaardigen zodat bij normaal gebruik geen complicaties kunnen optreden. Als bijbehorende doel is om het ook voor een val van tafelhoogte veilig te stellen.



figuur 1.1: Schematische weergave van de sample en bijbehorende onderdelen; a) bovenaanzicht; b) zijaanzicht

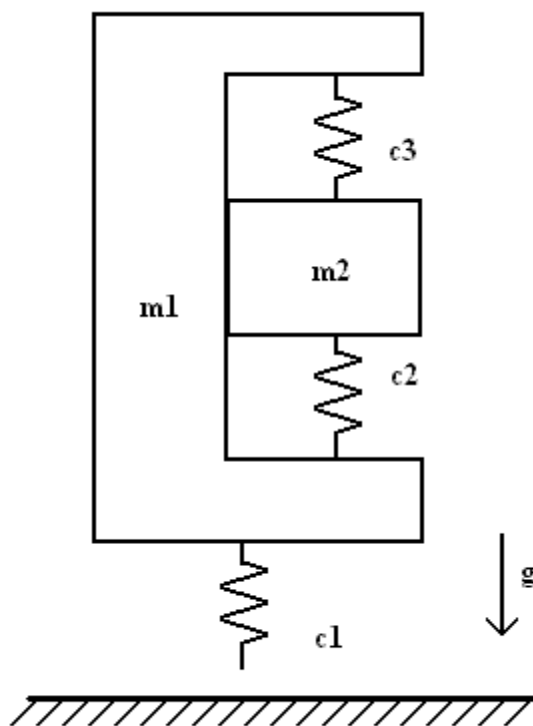
2. Modelvorming

Voor de impact door een val wordt een dynamisch model gemaakt om het valgedrag te voorspellen. In het model (zie figuur 2.1) zijn de massa's van silicium sample met stalen schijf (m_2) en van de spacer met samplehouder (m_1) verdisconteerd. Ook worden essentiële stijfheden gemodelleerd. Deze zijn de beschermingsstijfheid (c_1), de voorspanstijfheid (c_2) en ten slotte de contactstijfheid (c_3) tussen massa 1 en 2. Het model wordt opgesplitst als free-body diagrammen. De sample en schijfje zullen samen als één star lichaam vereenvoudigd worden en de spacer met houder als een tweede star lichaam.

Extra opmerking is wel dat de botsing in alle mogelijke kanten zijn inwerking kan hebben. Het is duidelijk dat dus met alle mogelijke valhoeken rekening moet worden gehouden. In het x-y vlak is de sample met de stalen schijf symmetrisch ten opzichte van het middellijn door de voorspanveer. Men veronderstelt eerst dat alle krachten nul zijn en dus ook volledig in evenwicht. Wrijvingskrachten worden niet meegenomen vanwege het feit dat slechts de verhoudingsfactor van de krachten van belang is en dat de wrijvingskracht bij alle mogelijkheden toch gelijk zijn. Door dan de resulterende botskracht F_b , aangrijpend bij het massamiddelpunt, te vergroten kan men berekenen hoeveel de reactiekrachten van veer F_v en steunen F_s moeten zijn. In figuur 2.2a heeft de botskracht een hoek van nul graden of tegengesteld tot de voorspanveer. Omdat de steunen alleen een drukkracht kunnen ondersteunen zal de veer alleen de botskracht opvangen.

In deze situatie is dus F_b gelijk zijn aan F_v . Als de botskracht loodrecht ten opzichte van F_v staat (figuur 2.2b), dan zal het vanwege een draaimoment bij een van de steunpunten een kracht op de veer rusten. Na enig rekenwerk blijkt dat F_v gelijk is aan $\sqrt{3} F_b$. Deze is dus kritieker dan de vorige. Maar situatie 2.2c is het ergst. Hier is F_v gelijk aan $2 F_b$. Voor een botskracht met de hoogterichting is figuur 2.2d de meest kritische. F_v blijft in alle gevallen onder of gelijk aan één maal F_b . Samenvattend geeft situatie c waarbij de botskracht een hoek van 45° maakt de meest kritische en bereikt hier een dubbele uitwerking, die zich vertaalt in een hogere uitwijking bij gelijke botskrachten. Tevens blijkt dat de voorspanverhouding van de veer zelf tegen val optimaal zou zijn, als de voorspankracht in de x-richting een factor $2\sqrt{2}$ meer is dan in de z-richting.

Met de wetenschap van de meest kritieke richting, kunnen de bewegingsvergelijkingen opgesteld worden. Voor de uitwerking zijn de situaties waarbij de hoek van de botskracht 0° en 45° genomen. Met behoud van betekenis kan het systeem voorgeschreven worden als een ééndimensionaal probleem. Verder wordt er geen demping in beschouwing genomen. De beide situaties kunnen met eendezelfde systeem beschreven worden. Echter zullen de factoren verschillen. Vanuit de wet van Newton:



figuur 2.1: dynamisch model voor valgedrag

$$\Sigma F = ma \quad (2.1)$$

volgt na enig formulemanipulatie (zie figuur 2.3)

$$\ddot{x}_1 = \frac{-c_1 - c_2 - c_3}{m_1} x_1 + \frac{c_2 + c_3}{m_1} x_2 \quad (2.2)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{c_2 + c_3}{m_2} x_1 + \frac{-c_2 - c_3}{m_2} x_2 \quad (2.3)$$

Waarbij

$x_{1,2}$ = verplaatsing van massa 1 of desbetreffend massa 2 [m]

$\ddot{x}_{1,2}$ = versnelling van massa 1 of desbetreffend massa 2 [m/s^2]

$c_{1,2,3}$ = veerstijfheid van veer 1 of desbetreffend 2, contactstijfheid 3 van steunen [N/m]

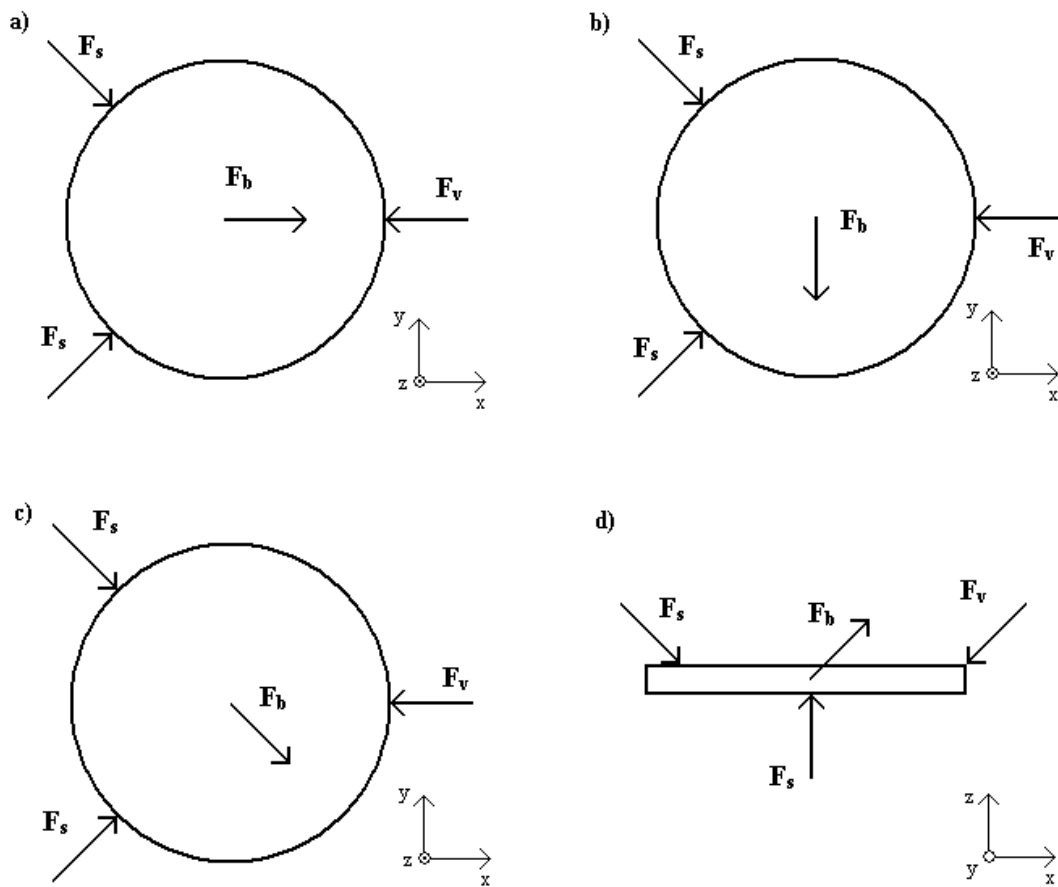
$m_{1,2}$ = massa 1 of desbetreffend massa 2 [kg]

Als de 2^{de} orde differentiaalvergelijkingen omgeschreven worden tot twee 1^{ste} orde en omgezet worden in matrixvorm als $\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}\underline{u}$, bekomt men de volgende vergelijkingen

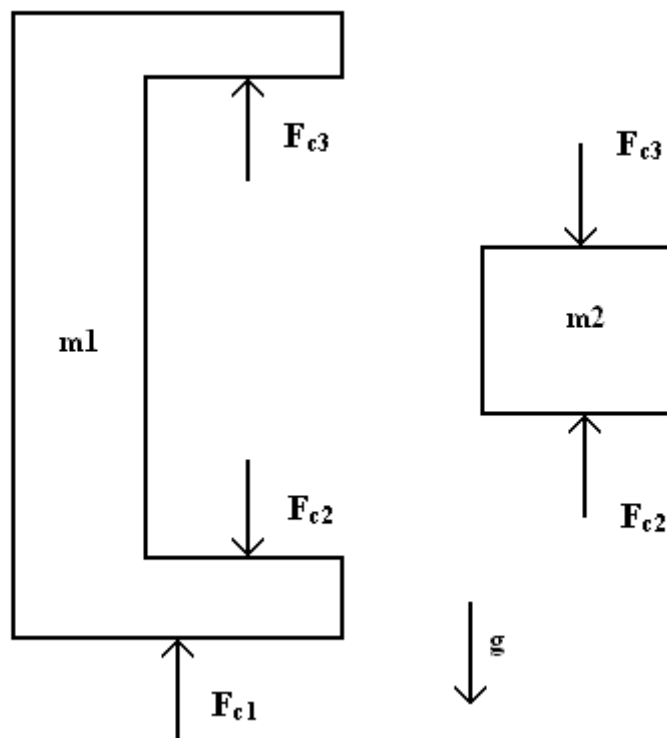
$$\underline{x} = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_2]^T \quad (2.4)$$

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \frac{-c_1 - c_2 - c_3}{m_1} x_1 + \frac{c_2 + c_3}{m_1} x_2 \\ \dot{x}_2 \\ \frac{c_2 + c_3}{m_2} x_1 + \frac{-c_2 - c_3}{m_2} x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-c_1 - c_2 - c_3}{m_1} & 0 & \frac{c_2 + c_3}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_2 + c_3}{m_2} & 0 & \frac{-c_2 - c_3}{m_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}\underline{x} \quad (2.5)$$

Uit de afleiding kan men eenvoudig zien dat \mathbf{B} hier gelijk is aan de nulmatrix. Voor \mathbf{B} kunnen de externe krachten beschreven worden, die in deze afleiding nog niet zijn meegenomen. In het volgende hoofdstuk worden de waarde van alle factoren nader besproken. Deze zijn veelal verschillend in de beide situaties van de impacthoek, maar ook tijdens een enkele situatie kunnen ze variëren.



figuur 2.2: Effect van de hoek van de botsing; a) 0° om z -as; b) 90° om z -as; c) 45° om z -as; d) 45° om y -as



figuur 2.3: Free-body diagram

3 Numerieke simulatie

3.1 Matlab

De simulatie van de impact door een val wordt berekend met het pakket Matlab. In dit pakket zijn twee bruikbare commando's die een impact kan simuleren: *impuls* en *lsim*. Echter bij *lsim* kan men meer variabelen invoeren terwijl *impuls* veel werkt met vaste standaarden. Kortom is het handiger om met *lsim* te werken voor de betere flexibiliteit. Omdat de commando's intern geïntegreerd in Matlab zijn, is het niet mogelijk om de code te zien of te herschrijven. Dit had gevolgen dat tijdens de berekeningen telkens opnieuw het commando moet aangeroepen worden iedere keer dat er een parameter moest worden veranderd. Dit is op zich niet zo erg ware het niet dat het de rekentijd drastisch langer maakte.

3.2 Gravitatie

Er zijn twee manieren om de val zelf te modelleren. Enerzijds kan men de val simuleren en anderzijds kan men ook de begincondities van het moment dat het net de grond raakt uitrekenen en aanbieden aan de simulatie. Natuurlijk geven beiden manieren dezelfde uitkomsten. Voor de valsimulatie verandert de formule $\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}\underline{u}$ tot:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-c_2 - c_3}{m_1} & 0 & \frac{c_2 + c_3}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_2 + c_3}{m_2} & 0 & \frac{-c_2 - c_3}{m_2} & 0 \end{bmatrix} \underline{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \underline{u} \quad (3.1)$$

Waarin g de gravitatieversnelling is. Voor de val kunnen de factoren van de tweede en vierde rij van matrix \mathbf{A} gelijk aan nul gekozen worden. Tijdens de val vallen beide massa's even snel en zullen de onderlinge afstanden ook gelijk blijven. Hierdoor zullen er toch geen krachten werken tussen de twee massa's. Voor het weer terugveren en los komen van de grond zullen er wel onderlinge krachten kunnen zijn, dan is het wel vereist om de factoren te behouden.

De andere manier maakt gebruik van de volgende formules:

$$v_b = \sqrt{2gh} \quad (3.2)$$

$$t_v = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (3.3)$$

Waarbij

v_b = botssnelheid [m/s]

t_v = valtijd [s]

h = valhoogte [m]

Zowel x_1 als x_2 krijgen de valversnelling toegewezen als beginconditie.

3.3 Contactstijfheid

In de simulatie is c_3 de contactstijfheid tussen de metalen schijf met de paddestoelvormige steunen. Deze waarde wordt met behulp van de Hertze contacttheorie berekend. Omdat er geen bolcontact noch lijncontact is, moet er met het algemenere elliptische puntcontact formules gerekend worden. Dit vereist de kennis van de kromtestralen van het contact

oppervlaktes. Een vlakke lijn heeft een kromtestraal van oneindig en een hoek zonder kromte is nul. Maar voor de praktijk kan er aangenomen worden dat deze hoek een kromtestraal heeft van 0,01 mm. Voor elk contactlichaam wordt een equivalente kromtestraal uitgerekend met de volgende vergelijking:

$$R_e = \sqrt{(R'R'')} \quad (3.4)$$

Waarbij

- R_e = equivalente radius van het contact van één lichaam [m]
- R' = grootste radius in contact [m]
- R'' = kleinste radius in contact [m]

Natuurlijk zijn de materiaaleigenschappen ook van belang. De equivalente E-modulus wordt afgeleid vanuit de onderstaande vergelijking:

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

Waarbij

- E^* = equivalente E-modulus van de twee materialen [Pa]
- $E_{1,2}$ = E-modulus van materiaal 1 desbetreffend 2 [Pa]
- ν = dwarscontractiecoëfficiënt [-]

De kracht die bij het contact hoort, kan vanuit de voorspanning berekend worden. Als men een maximale versnellingswaarde van 10 maal de gravitatieconstante wil toelaten als voorspanning dan komt dat overeen met ongeveer 0,1 N. Omdat er twee contacten op een hoek van 90° staan, zal er uiteindelijk op ieder contact een kracht van $0,5\sqrt{2}$ van de voorspankracht staan. Met al deze gegevens kan de empirische vergelijking voor de indrukking opgelost worden:

$$\delta = \left(\frac{9F_s^2}{16R_e E^{*2}} \right)^{(1/3)} f_2(R'/R'') \quad (3.6)$$

Waarbij

- δ = indrukking [m]
- F_s = contactkracht [N]
- $f_2(R'/R'')$ = correctiefactor afhankelijk van R'/R'' [-]

De relatie van δ met F is duidelijk niet-lineair. In de simulatie is hier rekening gehouden. De indrukking zal 'real-time' herberekend worden tijdens de simulatie. Tevens is ook de contactstijfheid variabel. Deze is gelijk aan:

$$c_3 = F_s / \delta(F_s) \quad (3.7)$$

Deze afleiding voor c_3 geldt alleen als de contactkracht en contactindrukking in dezelfde richting staat met de voorspankracht. Bij een dubbele steun op +45° en -45° zal er een richtingsfactor bijkomen. Deze is gelijk aan $2 \cos^2(45^\circ)$ voor de situatie waarbij de botshoek 0° is. De factor is door een weldoordachte plaatsing van de steunen ten slotte weer gelijk aan één.

3.4 Botskracht

Bij een botsing is er een overdracht van impuls tussen de botslichamen. Gedurende een zeer korte tijd wordt er een botskracht gegenereerd. Voor een sinusvormig impuls kan de volgende formule gebruikt worden:

$$F_b = v_b \sqrt{mc} \quad (3.8)$$

Waarbij

F_b = maximale botskracht [N]

Bij de simulatie zijn er twee botsingen te onderscheiden. De eerste is de botsing met de vaste wereld en de tweede is de botsing van de twee lichamen met elkaar. Ze zijn ongelijk aan elkaar omdat de gevoelde stijfheid en massa's niet gelijk zijn. Bovendien zijn de frequentie van de trilling ook ongelijk vanwege de zelfde redenen.

Bij een vaste veer-massa systeem kan men de kracht door de zwaartekracht op een lichaam doorstrepen door een nieuwe evenwichtspunt te kiezen, waarbij een deel van de veerindrukking de zwaartekracht opheft. Voor de beschreven situatie is dit echter niet mogelijk. Daardoor zal de botskracht ook met deze waarde stijgen.

Voor de simulatie van een botsing waarbij een vallend lichaam bots met een stilstaande vaste wereld, moet men de botsing modelleren als een sprong in de snelheid. Het ingangsignaal is een constante snelheid 0 m/s van de vaste wereld, die inwerkt op een bewegend lichaam die een beginsnelheid heeft op het moment van botsen.

Naast het behoud van impuls geldt voor de gehele duur van de botsing ook de behoudswet van energie. Tijdens de val wordt potentiële energie omgezet in kinetische energie en bij de botsing wordt de kinetische energie weer omgezet tot potentiële veerenergie. Bij een volledig elastische botsing wordt er geen energie gedissipeerd en zal de som van potentiële en kinetische energie altijd constant blijven.

3.5 Simulatie

Tijdens de botsing van de simulatie zal c_3 voor elke tijdstap herberekend moeten worden. De momentane kracht die drukt op het contact is hiervoor benodigd. Deze kan vanuit de volgende formule berekend worden:

$$F_{vm} = F_v - \Delta x \times (c_2 + c_3) \quad (3.9)$$

Waarbij

F_{vm} = momentane spankracht [N]

F_v = voerspankracht [N]

Δx = momentane en relatieve verplaatsing massa 1 t.o.v. massa 2 [m]

Echter de relatieve verplaatsing en c_3 zijn onbekend en die moeten bij de tijdstap zelf berekend worden. Om toch een resultaat te hebben is er gebruik gemaakt van de waarden van een tijdstap terug. Hierdoor is het resultaat minder nauwkeurig geworden, maar als de tijdstap klein genoeg is, zal het relatief weinig afwijking geven. Een ander effect is dat de eindige nauwkeurigheid van Matlab roet in het eten gooit. Door te kleine tijdstappen te nemen, moet Matlab met getallen rekenen die (bijna) exact hetzelfde zijn. Als gevolg komt voor de uitkomst niet de juiste kleine waarde, maar de machineprecisie van Matlab. Eenmaal als dit wordt het uitvergroet na iedere stap (zie bijlage 1 figuur b4).

Een manier om de juistheid van de simulatie te volgen, is door op elke moment de totale energietoestand te berekenen. Als deze (nagenoeg) constant blijft kan men ervan uitgaan dat de resultaten goed zijn (zie figuur b1 en b2). Tevens over de energietoestand kan men de veerindrukking door de potentiële veerenergie berekend worden en vergeleken worden.

$$x_{1,\min} = \sqrt{\frac{2E}{c_1}} \quad (3.10)$$

Waarbij

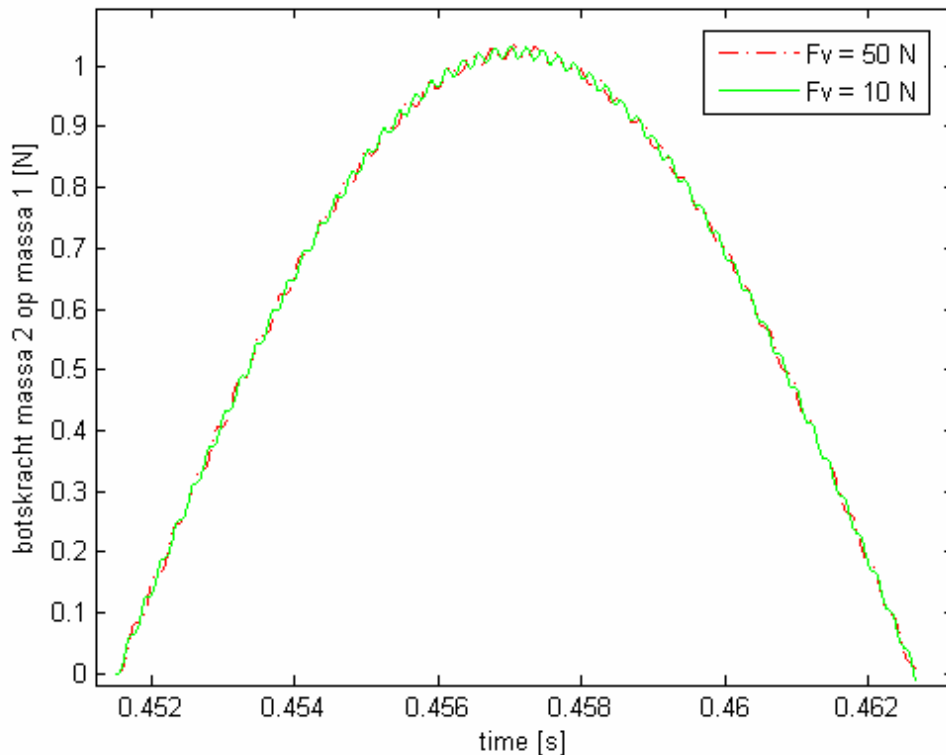
E = Totale energie van het systeem [J]

Als derde; bij het terug loskomen van de vaste wereld door het terugstuiteren, moet bij een volledig elastische botsing de massa's weer de beginhoogte bereiken (zie figuur b3). Echter kan er een rest trilling tussen de twee massa's zijn die een beetje energie bijhoudt en zo de beginhoogte vermindert. Dit effect is nihil, maar toch aanwezig.

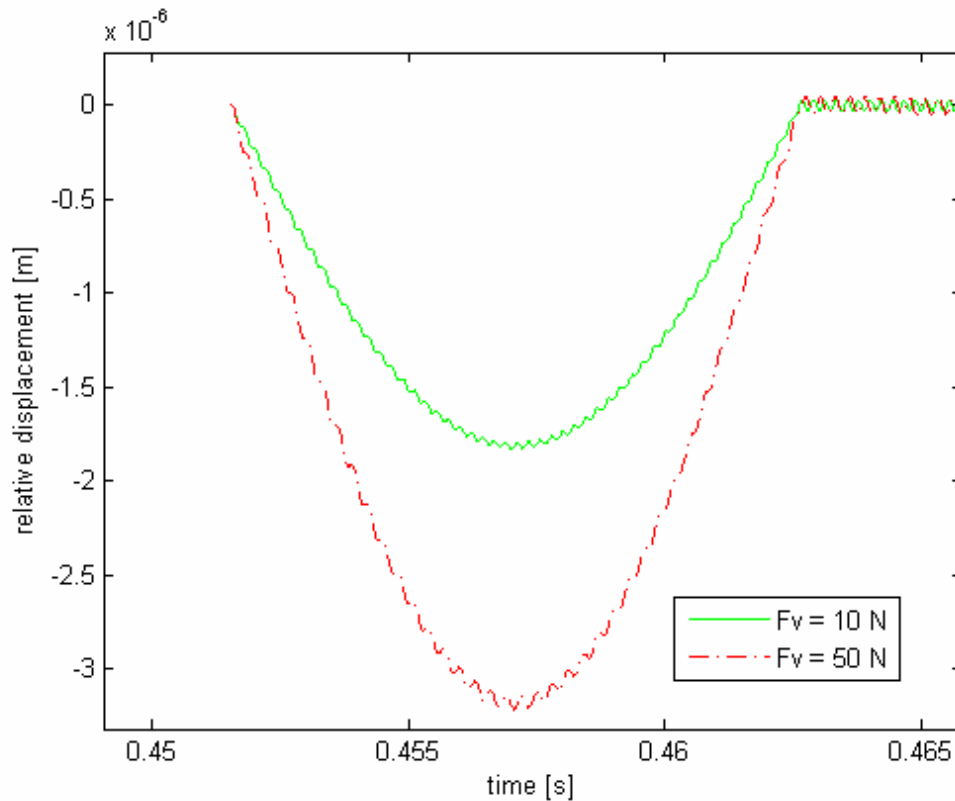
Een laatste test voor juistheid is de botskracht te vergelijken van de formule (3.8) en de simulatie deze zou ongeveer gelijk moeten zijn. Een klein verschil is dat de formule uit gaat van een enkel lichaam terwijl de simulatie een dubbele massa heeft.

3.6 Resultaten

Door veel te testen komt naar voren dat de grootte van de botskracht tussen de twee massa's hetzelfde is ongeacht de voorspanning (figuur 3.1). Natuurlijk is de relatieve verplaatsing tussen beide massa's dan wel verschillend vanwege het stijfheidsverschil (figuur 3.2). Het grootste voordeel is dat er niet gezocht moet worden bij welke stijfheid van c_1 voldoende voorspanning is op de metalen schijf. Want deze wordt gegeven door gewoon de optredende botskracht te gebruiken als voorspanning. Er mag niet vergeten worden dat er nog een veiligheidsfactor in begrip moet genomen bij het praktisch toepassen van de stijfheid. Gewoon een hoge voorspanning kiezen zodat men niet hoeft te vrezen dat de simulatie vroegtijdig stopt, door het lossen van het contact tussen de twee massa's. En dus opnieuw moet proberen met een hogere voorspanning. Dus met een hoge voorspanning de simulatie laten lopen en dan komt de vereiste voorspanning eruit rollen.



Figuur 3.1: Botskracht tussen de twee massa's bij verschillende voorspanningen.



Figuur 3.2: Relatieve verplaatsing bij verschillende voorspanningen.

Voor een rechte val op de voorspanveer is uit de simulatie gebleken dat met een voorspanning van 0,1 N niet eens een hoogte van 5 cm overbrugd kan worden, bij een zeer slappe c_1 van 100 N/m. Hier faalt de voorspanning al om de botskracht te overstijgen. Er is een 'stijfheid' van 4 N/m nodig om de vooropgestelde eis van 1 m te halen.

Bij een voorspanning van 1 N zijn de resultaten al wat meer realistisch, maar nog steeds ondermaats. Bij een stijfheid van 450 N/m is de val van 1 meter te halen.

Voor de val met een botshoek van 45° is er dankzij de positie van de steunen een gelijke stijfheid vanuit de steun(en). De gevoelde stijfheid van de voorspanveer is wel lager. De resultaten zijn nagenoeg hetzelfde als bij een rechte val. Behalve de uitwijking is groter en daardoor is ook de botskracht tussen beide massa's lager.

4 Concepten

Er zijn twee doelen voor ogen waaraan de werktuigen aan moeten voldoen. Ten eerste moet het de sample voldoende bescherming geven tegen een val van tafelhoogte indien mogelijk. Met werktuigbouwkundig perspectief zou men willen dat er een onderdeel met een lage stijfheid tussen de sample en de grond komt tijdens de val. Het is immers niet belangrijk wat de plaatsnauwkeurigheid is. Maar een te lage stijfheid vereist ook veel bewegingsruimte. Het nadelige effect is weer dat het resultaat erg groot zal gaan uitvallen. Om de sample op zijn plaats te houden kan ook gedacht worden om de voorspanning zo hoog mogelijk te maken zodat het in geen mogelijkheid los komt. In tegenstelling met de andere is de plaatsnauwkeurigheid wel van belang. Maar hier is ook een omgekeerde wens dat de sample best slap moet worden voorgespannen. De reden is dat bij het meten, de doorbuiging van de sample door een te hoge voorspanning parten kan gaan spelen.

Ten tweede moet het handzaam zijn om de sample van de ene microscoop naar de andere te loodsen. Hiervoor moet het uit de verzonken opspanning in het grondvlak van de AFM. Er is slechts spaarzaam plaats om met het werktuig ernaar te reiken. Men moet van bovenaf bij de sample komen. Enkele veiligheidsaspecten voor de sample zijn dat de silicium plaatje in geen geval aangestoten noch aangeraakt mag worden. Er mogen ook geen krachten naar het grondvlak van de microscoop doorgeleid worden. Dit is een voorzorg tegen een mogelijke verstoring van de uiterst precieze positionering van dit grondvlak.

Een belangrijke opmerking is de opzet van de sample en het opspanonderdeel in de AFM tijdens het verloop van dit project nog niet vaststaat. Er wordt nog aanpassingen en verbeteringen aangebracht. Men kan dus niet vastbijten op de huidige stand van zaken. Maar de grote voordeel hiervan is dat de sample ook aanpassingen kan aannemen ter bevordering van de hier gemaakte bevindingen.

Een mogelijkheid is de beide doelen in één werktuig te belichamen. Zo is de sample altijd veilig voor botsingen vanaf het moment dat het is opgepakt. Echter zal dit de realisatie van het werktuig zwaar compliceren. Het zou ook niet zo handzaam worden als men de benodigde grootte onder ogen ziet dat benodigd is voor valbescherming. Er is dus afgestapt van dit idee. Hier meer over in de volgende paragrafen.

4.1 beschermdoos

De simulatie was allemaal om achter te komen wat de stijfheid/soepelheid van het onderdeel moet zijn die de klap met de grond opvangt. Voor de uitgangspositie van een toegelaten versnelling van 10g ofwel een voorspanning van nog minder dan 0,1 N, is het niet mogelijk iets doeltreffends te bedenken. Vanuit de simulatie is gebleken dat er een onrealistische 4N/m nodig is. Bovendien zijn er bij die simulaties nog niet eens rekening gehouden met het gewicht van het ontwerp zelf. Als men de voorspanning zou opvoeren naar 1N beginnen er opties te ontstaan, maar het blijft een lastige klus.

Volgens formule (3.8) kan men de botskracht verminderen door de snelheid, de massa of de stijfheid te verminderen. Wilde ideeën waren airbags, uitklappende stootbalken en parachutes, het grootste probleem hierbij was de activatie ervan. Kortom niet bruikbaar.

Voor de botsing is vooral de maximale botskracht van belang en mindere mate de botstijd. Omdat de kinetische energie die omgezet moet worden bij een val toch gelijk blijft, zou het beter zijn als men de botstijd kan rekken zodat de piek lager ligt. Beter nog is de botskracht niet als een halve sinus te laten gebeuren, maar als een meer als een 'ramp-blok function'. Als de botstijd gelijk zou blijven kan op deze manier een lager maximale botskracht bereikt worden. Of anders een gelijke maximale botskracht en kortere botstijd. Om zo'n gedefinieerde botskracht te realiseren had J. Wolf een schokbreker bedacht(zie [1] p. 12-1). Echter werkt deze schokbreker slechts in één richting en zal dus voor elk richting een degelijk ding geplaatst worden. Ook is er een drempel voor de kracht waarbij het pas in werking zal treden. Een vraagteken rijst dan op wat het doet bij een zijdelingse belasting. Een situatie

waarbij wel de botskracht bereikt wordt, maar op een hoek en dan door twee schokbrekers verdeeld wordt en ieder schokbreker niet tot de drempelwaarde komt. Hier zouden de schokbrekers tot een star lichaam gedegradieerd worden.

Uiteindelijk is er gekomen om een omringend verenpakket te gebruiken. Niet de laagdempende spiraalveren, maar de veelgebruikte schuimvullingen. Er zijn onnoemelijk veel soorten schuimen. Er is de keuze tussen zacht, hard, open of gesloten cellen en ook nog verscheidene materialen. Voor bijna volledig plastische energieabsorptie bestaat zelfs zoiets als aluminiumschuim, maar de beste is een zachte soort polymeren schuim met open cellen.

Men kan de vorm uitsnijden zodat het perfect aansluit op de sample. Maar om de sample te plaatsen is het goed om de een soortgelijke opspanning te gebruiken als in de AFM voor de beschermdoos. Zo kan een zelfde procédé gebruikt worden voor het plaatsen in deze beschermdoos. Het is niet noodzakelijk dat de plaatsgegeven even nauwkeurig moet. Dus een lichtere polymeren versie voor de opspanning volstaat. Men kan ook meerdere type schuimen aan elkaar lijmen om de gewenste stijfheid te bereiken in alle richtingen. Een stijfheid van gebruikte schuimen moet bij de waarde van 1500 N/m gezocht worden bij een veerlengte van 20 mm. Deze stijfheid is bij een belast oppervlak van 25 cm², bij benadering ook het bodemoppervlak van het geheel.

Een nadeel met polymeren schuimen is dat het stof kan afgeven. Vanwege de metingen mag er geen onzuiverheden op het silicium plaatje komen. Hiervoor moet dus weer een metalen afdichtkap komen om het te isoleren. Een nadere bespreking over het kapje volgt.

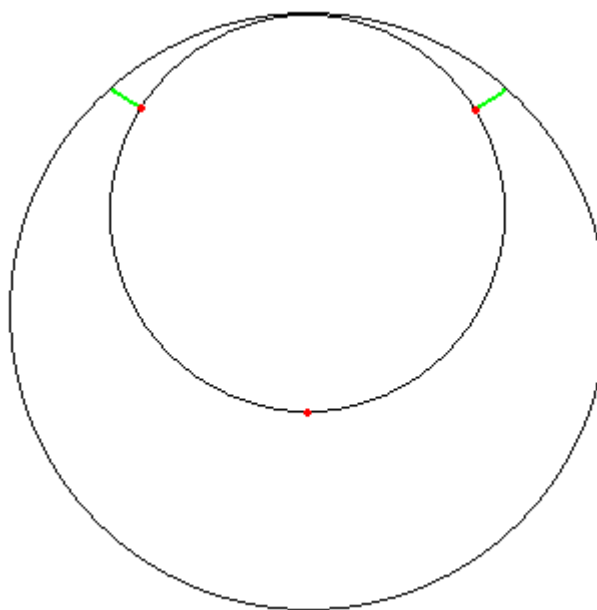
Alles bij elkaar gaat dit, in welk opzicht dan ook, massa toevoegen aan het geheel. De botsing zal harder aankomen dan voorheen berekend. Realisatie wordt desondanks alles onwaarschijnlijk.

4.2 beschermkapje

Het beschermkapje kan naast het stofvrij houden ook nog bescherming geven tegen stoten en aanrakingen die rechtstreeks tegen het plaatje zou komen. De grootste opgave hierbij is het aanbrengen aan de sample. Het moet een simpel mechanisme hebben om het vlot erop en eraf te plaatsen. De enige realistische bevestigingsplaatsen zijn het bovenoppervlak van de samplehouder en het zijoppervlak van de spacer want de andere zijn ofwel te klein of niet als bevestigingspunt te gebruiken.

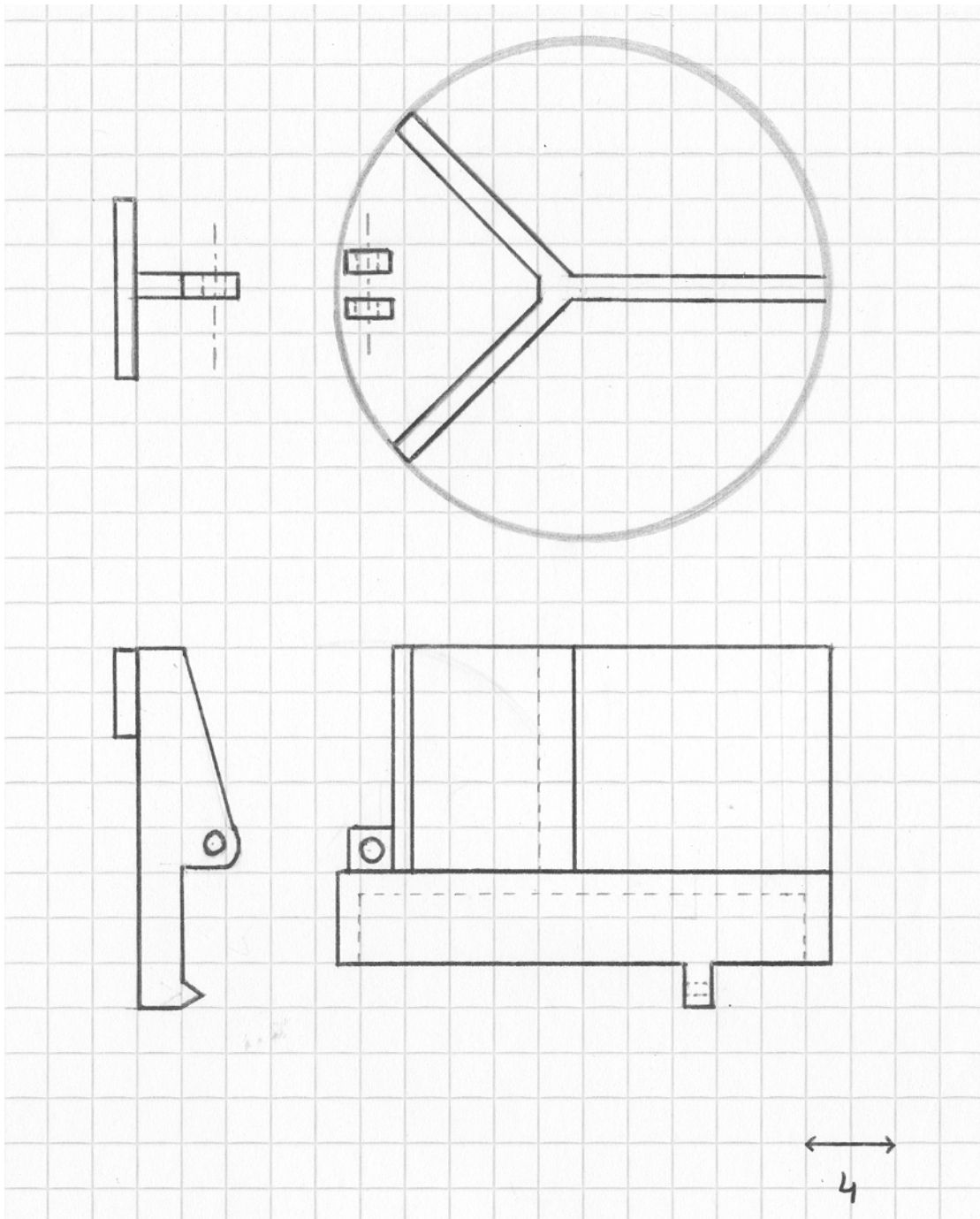
Een belangrijke beperking is dat de spacer ongeveer overal verplaatst kan worden op de samplehouder. Het kapje moet deze vrijheid open houden. Het oppervlak dat altijd vrij is van de samplehouder blijft amper iets over. Er blijft dus maar één optie staan.

Het is nu erg handig om beroep te doen op de mogelijkheid om aan het ontwerp van de sampleonderdelen te sleutelen. Zoals een v-groef indraaien in het zijoppervlak van de spacer om het kapje eraan te bevestigen. Een rond diepgedrukte staalplaat van één mm, met twee tanden die in de v-groef passen, zal de basis zijn voor het kapje (zie figuur 4.2). De binnen diameter van het kapje moet



Figuur 4.1: Schets van bovenaanzicht van de samplehouder (grote cirkel) en spacer (kleine cirkel) als het op een uiterste punt is geplaatst. Positie van de klemmingen op de spacer. (3 stippen) en de ruimte bij de twee vaste klemmingen (2 lijnstukken) is 1,5 mm.

gelijk zijn aan de diameter van de spacer. De twee vaste tanden ofwel klempoten staan op 60° t o v. het middelpunt van de cirkel. De derde die de cirkel sluit is een beweegbare poot. Die kan vanaf de bovenkant van het kapje worden bediend. Het is een hefboompje scharnierend op een gelijkmd draaipunt aan de rand van het bovenoppervlak van het kapje. Een veer geeft de nodige knijpkracht. Verder zijn er kammen in een vorm van een Y om houvast te hebben. De vaste poten kunnen altijd bij de v-groef ook al staat de spacer helemaal aan de rand op de samplehouder en bijna tegen de muur van de sampleopspanning (zie figuur 4.1).



Figuur 4.2: "Exploded-view" van beschermkapje. Bovenaanzicht en zijaanzicht.

4.3 Grijpmechanisme

In principe is er geen nood meer aan een grijpmechanisme. Het beschermkapje kan deze taak op zich nemen. Maar zou er geen beschermdoos gemaakt worden, dan moet er ook geen complementair beschermkapje zijn. Dan is slechts dit grijpmechanisme nodig om het uit de verzonken opspanning te vissen. Er is aan een reeks principes gedacht die de sample kan optillen. Door een aantal criteria op te stellen kan men nagaan welke het beste geschikt is.

Er worden vier principes vergeleken. De eerste is een soepele tang. Zoals gezegd, mag er (liefst) geen kracht door de AFM geleid worden. Dus met een soepele verbinding tussen heft en tangkop, zal bij verkeerd positioneren van de tang zo min mogelijk kracht op het systeem staan. Er kunnen speciale grijppunten worden aangebracht of men kan de spacer gebruiken om vast te knijpen. Een volgende mogelijkheid is een hef mechanisme te integreren in de opspanning of zelfs bij de sample. Zo is het grijpen geen probleem meer, het zit er gewoon al aan vast. Een derde alternatief is een (vacuüm)zuiger, waarmee het mogelijk is om geen krachten door te leiden via de AFM. Er is al een lift kracht zonder de sample aangeraakt te hebben. Er moet wel een werkende pomp zijn die voor de zuigkracht zorgt. Een geveerde 'check-valve' kan als beveiliging zorgen voor de pomp als het al vacuüm gezogen is. Dit ontlast ook de verbinding tussen zuigkop en sample. Het laatste principe dat vergeleken wordt, is dat van magnetische aantrekkingskracht. Met permanente magneten is men zeker dat de verbinding vast blijft. Echter het lossen vormt hier extra problemen. Een elektrische magneet biedt hier uitkomst. Als de samplehouder van staal wordt vervaardigd kan men hem op elk plek hierop vasthechten. Ofwel kunnen er stalen eilanden gezet worden als bevestigingsplaatsen.

	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Soepele tang</i>	-	+	++	++	+	-	-	-
<i>Geïntegreerd hefmechanisme</i>	-	+	++	++	++	+	++	+
<i>Zuiger</i>	-	-	-	+	++	++	+	++
<i>Magneet</i>	+	-	+	+	+	++	+	++

Tabel 4.1: Vergelijking van vier principes voor het grijpen van de sample uit de opspanning op:

- | | |
|---|--|
| 1. fabricage (tijd, onderdelen, proces) | 5. effectiviteit |
| 2. lage fabricagekosten | 6. gebruiksgemak |
| 3. lage bedrijfskosten | 7. laag vereiste nauwkeurigheid van plaatsen |
| 4. bedrijfszekerheid | 8. minimale krachtdoorleiding |

In tabel 4.1 is te zien dat ieder principe zijn sterktes en zwaktes heeft. Maar als men ook nog het feit meeneemt dat er in de laboratorium/werkplaats al perslucht voor handen is, dan komt de zuiger in een betere daglicht. Er moet geen pomp geïnstalleerd worden omdat de perslucht ook als zuiger dienst kan doen. Dit zal de kosten drukken in productie als tijdens bedrijf.

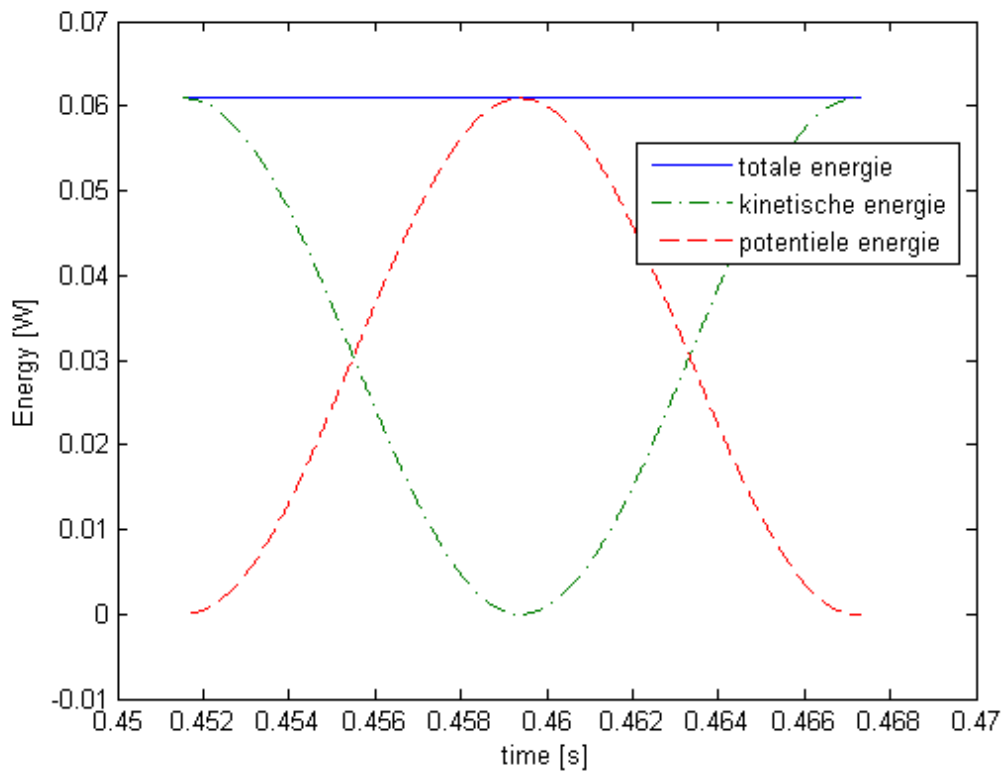
Hierdoor kan men de minnen van de zuigerprincipe omgezet worden naar (dubbele) plussen. Men kan dan concluderen, dat het zuigerprincipe door zijn hogere waardering voor de andere criteria 5 tot 8, het beste te gebruiken is.

Conclusie

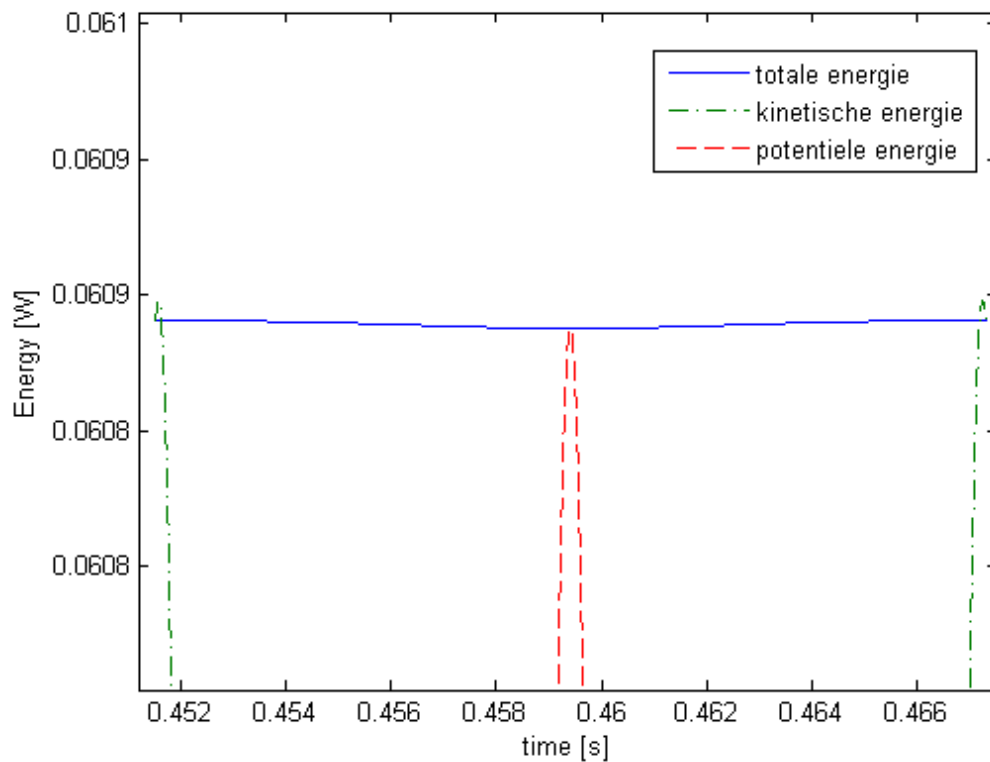
Voor veel apparaten is de uitkomst vaak fataal als het niet gemaakt is om te vallen. Voor de sample is het spijtig genoeg ook het geval. Uit het model en de simulatie komt bovendien dat de sample zelfs met een beschermdoos niet te redden valt. De impact is simpelweg te hard om door de voorspanning gehouden te worden. Dus de conclusie is hier om voorzichtig om te gaan met de sample en vooral niet te laten vallen.

De tweede doelstelling om de sample uit de opspanning te halen kan wel voldaan worden. Er zijn verscheidene principes onder de loep genomen en ieder principe op zich kan gebruikt worden. In de tijd van dit project is er echter nog geen uiteindelijke keuze gemaakt. Wel is er een opzet uitgedacht dat een volgend onderzoek kan voorthelven.

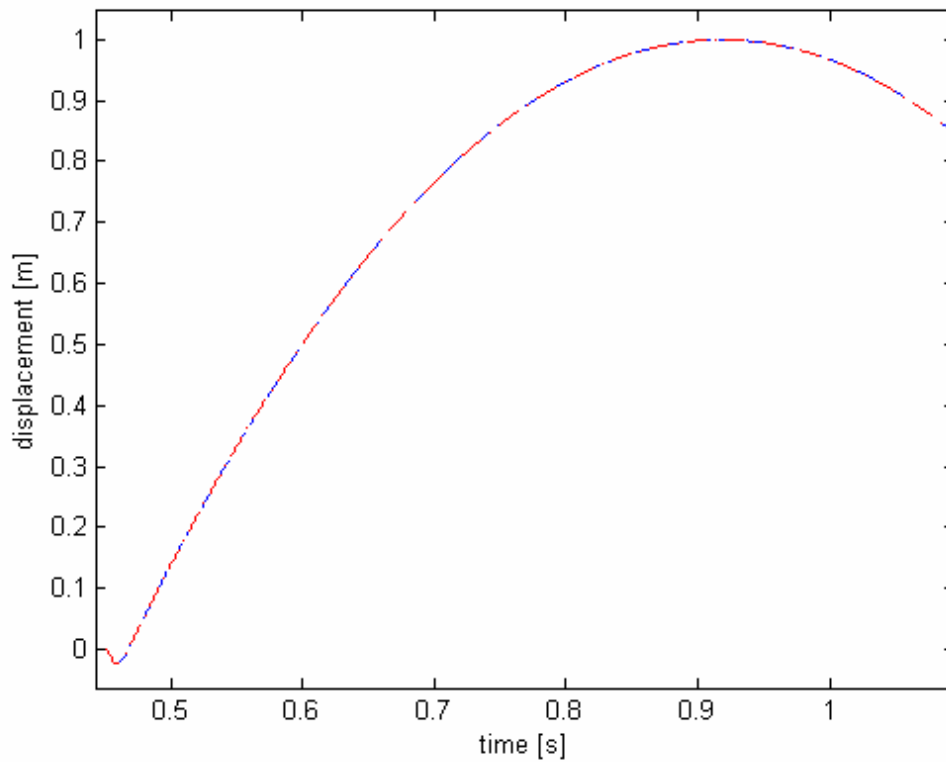
Bijlage 1 Grafieken



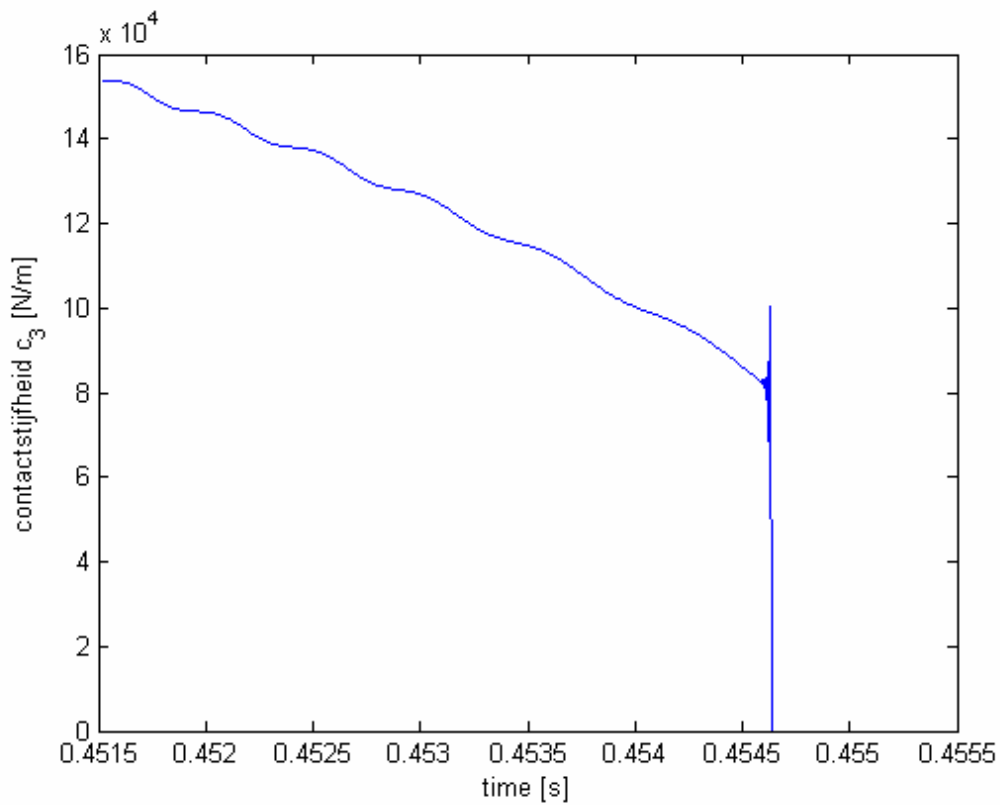
Figuur b1: Energie tijdens botsing bij $h=1,0$ m en $c_1=250$ N/m.



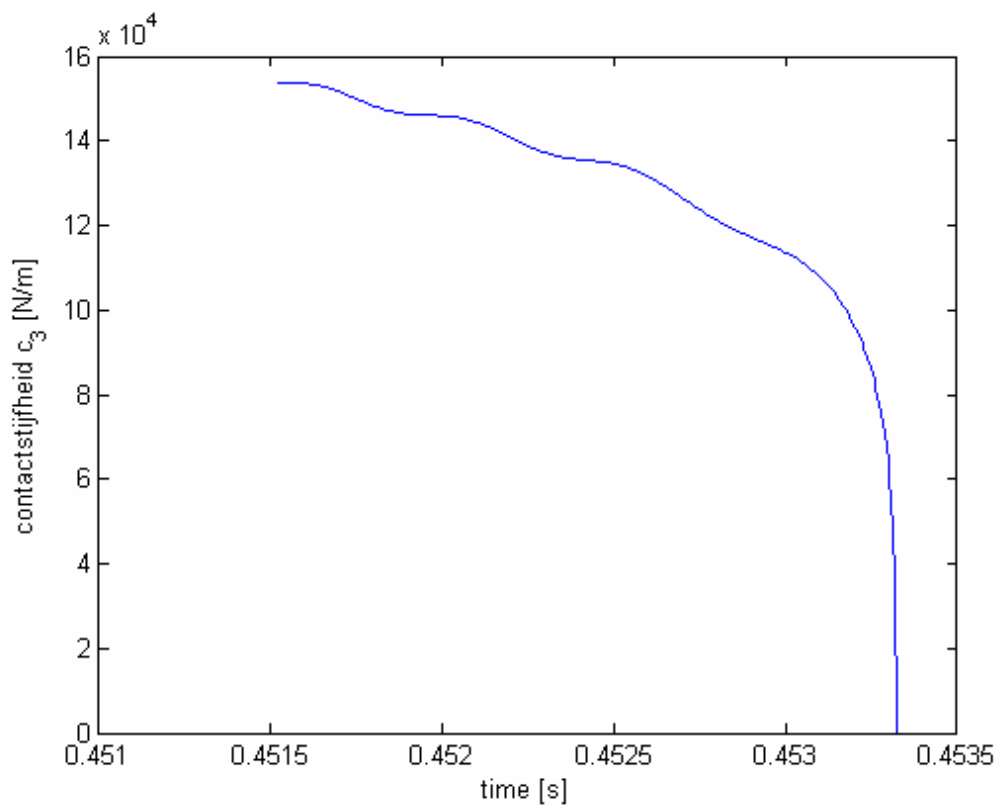
Figuur b2: Energie tijdens botsing bij $h=1,0$ m en $c_1=250$ N/m (uitvergroot).



Figuur b3: Verplaatsing door terugvering bij $h=1,0$ m en $c_1=250$ N/m (opmerking: de indrukking van de botsing is slechts 22 mm en net te onderscheiden in de figuur). De verplaatsing bereikt de beginhoogte.



Figuur b4: Contactstijfheid c_3 tijdens botsing, falen van Matlab door vereenvoudiging van het systeem



Figuur b5: Contactstijfheid c_3 stort in bij de botsing en het contact verbreekt. Deze is geen eigenlijke oplossing en dient slechts ter illustratie als er wel met een exacte momentane waarde voor c_3 berekend zou zijn.

Bijlage 2 Materiaaleigenschappen

	Staal (RVS)	Silicium	Aluminium	Zerodur®
Dichtheid [Mg/m ³]	7,85	2,33	2,70	2,53
E-modulus [GPa]	200	150	70	90,3
Poisson's ratio [-]	0.30-0.31	-	0,33	0,243
Lin. thermische expansie [μK ⁻¹]	11,7	4,2	23,3	0±0,05

Bijlage 3 Matlab file voor botshoek = 0°

```
clear all
close all
clc
warning off
```

```
% Impactmodel voor rechte val met botshoek 0 pi
```

```
% Hertze contactspanning
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% R en r zijn de kromtestralen van de lichamen
% een indexnummer voor desbetreffende lichaam
% 1 voor disc (staal) en 2 voor spacer (Al)
```

```
R1 = 7.5e-3;
R2 = 1e3;
r1 = 1e-5;
r2 = 2e-3;
```

```
E1 = 2.1e11; % elasticiteitsmodulus
E2 = 7.0e10;
v1 = 0.3; % Poissons ratio
v2 = 0.33;
```

```
Re1 = sqrt(R1*r1); % equivalente radius van de ronding
Re2 = sqrt(R2*r2);
Er = ((1-v1^2)/E1+(1-v2^2)/E2)^(-1); % gereduceerde E-modulus
```

```
fveer = 1; % absolute voorspanningskracht
fv = fveer*sqrt(2)/2; % voorspanningkracht bij steunen
delta1 = ((9*fv^2)/(16*Re1*Er^2))^(1/3)*6.5;
delta2 = ((9*fv^2)/(16*Re2*Er^2))^(1/3)*6.5;
```

```
delta = delta1+delta2; %totale indrukking door voorspanning
```

```
% Impuls simulatie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
h = 1.00; % valhoogte
g = 9.81; % valversnelling
ts = 0.000005; % tijdstap
tf = 0.51; % eindtijd
m1 = 0.00540; % platform massa
m2 = 0.000807; % preparaat massa
```

```

c1 = 200;           % stijfheid van de impactdoos
c2 = 2000;         % stijfheid van voorspanveer

m = m1+m2;
c3(1) = (fv*2*cos(pi/4)^2)/delta;      % gevoelde contactstijfheid

vb = sqrt(2*g*h);           % valsnelheid/botssnelheid
Fb1zonderg = vb*sqrt((m1+m2)*c1)      % botskracht
Fb1metg = vb*sqrt(m*c1)+m*g           % botskracht met zwaartekracht
tb = sqrt(2*h/g);           % valtijd

t = [tb:ts:tf];           % aanmaken tijdvector voor simulatie
u = ones((tf-tb)/ts+2,1); % invoer vector (+2 i.p.v +1 vanwege eindige nauwkeurigheid ML)
x = [0 -vb 0 -vb];       % beginconditie: x1 v1 x2 v2

% Systeem matrices opstelling
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ag = [
        0,      1,      0,      0;
      (-c2-c3(1))/m1, 0, (c2+c3(1))/m1, 0;
        0,      0,      0,      1;
      (c2+c3(1))/m2, 0, (-c2-c3(1))/m2, 0];

Bg = [0;-g;0;-g];
A2 = [
        0,      1,      0,      0;
      (-c1-c2)/m1, 0,      c2/m1, 0;
        0,      0,      0,      1;
      c2/m2,    0,      -c2/m2, 0];

B = [0;0;0;0];
C = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
D = [0; 0; 0; 0];

SYSg = ss(Ag,Bg,C,D);
SYS2 = ss(A2,B,C,D);

p = 1; % counter for c3

for n = 1:length(t)-1
    if x(n,1)>0
        [y,tt,xc] = lsim(SYSg,[u(n),u(n+1)],[t(n),t(n+1)],x(n,:));
        x(n+1,:) = xc(2,:);
    elseif (x(n,1)<=0) & (fveer-(x(n,1)-x(n,3))*c2 > 0)
        % Energie check
        Energy_kin(n) = 0.5*m1*x(n,2)^2 + 0.5*m2*x(n,4)^2;
        Energy_pot(n) = 0.5*x(n,1)^2*c1 + x(n,1)*m1*g + x(n,3)*m2*g;
        Energy(n) = Energy_kin(n) + Energy_pot(n);
        % Aanpassen van c3
        F = (fveer-(x(n,1)-x(n,3))*(c3(1)+c2))*sqrt(2)/2;
        p = p+1;
        delta1 = ((9*F^2)/(16*Re1*Er^2))^(1/3)*6.5;
        delta2 = ((9*F^2)/(16*Re2*Er^2))^(1/3)*6.5;
        delta = delta1+delta2;
        c3(p) = (F*2*cos(pi/4)^2)/delta;
        A1=[
                0,      1,      0,      0;
              (-c1-c2-c3(p))/m1, 0, (c2+c3(p))/m1, 0;
                0,      0,      0,      1;
              (c2+c3(p))/m2,    0, (-c2-c3(p))/m2, 0];
    end
end

```

```

        B=[0;-g;0;-g];
        SYS1 = ss(A1,B,C,D);
        [y,tt,xc] = lsim(SYS1,[u(n),u(n+1)],[t(n),t(n+1)],x(n,:));
        x(n+1,:) = xc(2,:);
    else
        Energy_kin(n) = 0.5*m1*x(n,2)^2 + 0.5*m2*x(n,4)^2;
        Energy_pot(n) = 0.5*x(n,1)^2*c1 + x(n,1)*m1*g + x(n,3)*m2*g;
        Energy(n) = Energy_kin(n) + Energy_pot(n);
        p=p+1;
        c3(p)=0;
        [y,tt,xc] = lsim(SYS2,[u(n),u(n+1)],[t(n),t(n+1)],x(n,:));
        x(n+1,:) = xc(2,:);
        break % afbreken van calculatie als het contact los komt
    end
end
end
y = x;

ydelta = y(:,1)-y(:,3);
Fbots1 = ydelta(1:length(c3)).*(c3+c2);
Fbots2 = -y(1:length(c3),1).*c1;

% output
%%%%%%

figure(1)
plot(t(1:length(y)),y(:,1),'b--',t(1:length(y)),y(:,3),'r-')
xlabel('time [s]')
ylabel('displacement [m]')
figure(2)
plot(t(1:length(y)),y(:,2),'b-',t(1:length(y)),y(:,4),'r--')
xlabel('time [s]')
ylabel('velocity [m/s]')
figure(3)
plot(t(1:length(y)),y(:,1)-y(:,3),'g-')
xlabel('time [s]')
ylabel('relative displacement [m]')
figure(4)
plot(t(1:length(c3)),c3)
xlabel('time [s]')
ylabel('contactstijfheid c_3 [N/m]')
figure(5)
plot(t(2:length(c3)),Energy,t(2:length(c3)),Energy_kin,t(2:length(c3)),Energy_pot)
xlabel('time [s]')
ylabel('Energy [W]')
legend('totale energie','kinetische energie','potentiele energie')
figure(6)
plot(t(1:length(Fbots1)),Fbots1)
xlabel('time [s]')
ylabel('botskracht massa 2 op massa 1 [N]')
figure(7)
plot(t(1:length(Fbots2)),Fbots2)
xlabel('time [s]')
ylabel('botskracht massa`s op grond [N]')

```


Bijlage 4 Bibliografie / Bronnen

- [1] Dictaat 4C620 Constructieprincipes 1; Tu/e; maart 2004
- [2] Contact Mechanics; K. L. Johnson ; Cambridge University Press ; 1985
- [3] Polytechnisch zakboek; Prof. Ir P. H. H. Leijendeckers e.a.;Elsevier; 49^e druk 2002
- [4] http://www.schott.com/optics_devices/english/products/zerodur/index.html (22 mei'07)