

Geheugenmetaal

Citation for published version (APA):

Thijssen, E. J. R. W. (1992). *Geheugenmetaal*. (DCT rapporten; Vol. 1992.072). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Geheugenmetaal

E.J.R.W. Thijssen

266034

GEHEUGENMETAAL

auteur: E.J.R.W. Thijssen

begeleider: dr.ir. P.J.G. Schreurs

Rapport WFW: 92.072

Eindhoven

Juni 1992

Technische Universiteit Eindhoven

faculteit: Werktuigbouwkunde

vakgroep: WFW

Inhoud

	pag
Samenvatting	- 4 -
1 Inleiding	- 5 -
2 "Smart materials"	- 6 -
2.1 Soorten "smart materials"	- 6 -
2.2 Shape memory alloys (SMA)	- 7 -
2.3 Mechanische eigenschappen van SMA	- 8 -
2.4 achteruitgang van het geheugeneffect	- 10 -
2.5 Materialen met het shape memory effect	- 10 -
2.6 Nitinol	- 10 -
3 Materiaalonderzoek	- 12 -
3.1 Diameter van de draad	- 12 -
3.2 Weerstand van de draad	- 13 -
3.3 Het transitiepunt	- 14 -
3.4 Hysterese bij opwarmen en afkoelen	- 16 -
3.5 Trekproeven	- 16 -
4 Opstellingen/constructies	- 19 -
4.1 NiTi-draad in latex	- 19 -
4.2 Matrix van draden	- 20 -
4.3 Holle vezel	- 21 -
4.4 Buigende staaf	- 21 -
4.5 Buigend vierkant	- 22 -
4.6 Puntvervorming	- 22 -
5 Conclusie	- 24 -

6 Aanbevelingen	- 25 -
Bijlage 1: Vergelijken van atoomprocenten met gewichtsprocenten	- 26 -
Bijlage 2: Meetwaarden bij de weerstandmeting	- 27 -
Bijlage 3: meetwaarden bij de transitiepuntmeting	- 30 -
Bijlage 4: meetwaarden bij de hysteresemeting	- 33 -
Bijlage 5: De trekkrommen	- 34 -
Bijlage 6: Karakteristieke variabelen uit de trekproeven	- 38 -
Bijlage 7: beschrijving van het inbedden in latex	- 39 -
Bijlage 8: Foto's	- 40 -
Geraadpleegde literatuur	- 42 -

Samenvatting

De geheugenmetalen behoren tot de groep van de "smart materials". Deze groep is weer op te delen in vier categorieën, namelijk: optische vezels, piëzo-elektrische polymeren en keramieken, electro-rheologische vloeistoffen en shape memory alloys. In deze stage is alleen gebruik gemaakt van de laatste categorie, shape memory alloys (afgekort SMA ook wel geheugenmetalen genoemd). Deze metalen hebben de eigenschap dat er bij een bepaalde transitietemperatuur een omzetting plaatsvindt van de martensiet structuur naar de austeniet structuur. Deze omzetting gaat gepaard met een afname van het volume.

Als eerste zijn in de literatuur een aantal typerende kenmerken van geheugenmetalen bekeken. Daarna is middels enkele experimenten geprobeerd of deze kenmerken ook voor het geheugenmetaal NiTi van toepassing zijn. Door het verrichten van deze experimenten is er meer inzicht ontstaan in de mogelijkheden en eigenschappen van dit geheugenmetaal. De eigenschap waar in het kader van deze opdracht de aandacht naar uitging, is het vormherstel gedrag. Als een draad van NiTi enige procenten plastisch wordt gedeformeerd, zal deze plastische deformatie weer geheel verdwijnen als de draad boven een karakteristieke transitietemperatuur wordt verwarmd.

Er is geprobeerd om met behulp van dit vormherstel gedrag van NiTi, vervormingen van een latex vlies (latex is een natuurrubber) uit zijn vlak te realiseren. Dit blijkt niet te lukken, omdat de spanning die in de draad ontstaat als gevolg van het vormherstel gedrag niet groot genoeg is om het latex te vervormen.

Daarna zijn nog enige andere methoden bedacht die wel tot vervorming van een vlak uit zijn vlak kunnen leiden. Hieruit zijn enkele aanbevelingen voortgekomen voor verder onderzoek.

Hoofdstuk 1

1 Inleiding

Geheugenmetalen vallen in de categorie "smart materials". Deze materialen worden zo genoemd, omdat ze hun eigen sensor, actuator en regelmogelijkheden hebben (Rogers, 1989a, 17). Ze hebben de mogelijkheid om met een eigen intelligentie voorspelbaar te reageren op externe signalen. Deze reactie is het gevolg van veranderingen van de fysische eigenschappen van een "smart material". De materialen die deze eigenschap hebben zijn al in het begin van deze eeuw ontdekt, maar pas omstreeks ± 1970 samengevoegd onder de verzamelnaam "smart materials". De naamgeving is echter niet zo eenduidig als hier wordt aangenomen. Andere gebruikte benamingen voor deze groep van materialen zijn: intelligent, sense-able en adaptive.

Smart materials worden al geruime tijd toegepast in robots, de vliegtuigindustrie en de ruimtevaart. In deze stage wordt getracht enige bekendheid te verschaffen over de eigenschappen van geheugenmetalen. Er worden enkele mechanische en fysische eigenschappen van een geheugenmetaal bekeken.

Als duidelijk is geworden hoe een geheugenmetaal zich gedraagt, dan wordt geprobeerd met behulp van een geheugenmetaal vervormingen te realiseren in een latex vlies. Latex is een natuurrubber waarvan zeer dunne vliezen gemaakt kunnen worden.

De eigenlijke gedachte achter de stage is de volgende. De draden geheugenmetaal worden in een latex vlies ingebed, waarna inkrimping van de draden er voor moet zorgen dat het vlies gaat vervormen.

Hoofdstuk 2

2 "Smart materials"

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd welke soorten smart materials er zijn. Verder wordt er ingegaan op de voor deze opdracht belangrijkste groep, namelijk de geheugenmetalen. Er worden enkele fysische en mechanische eigenschappen van deze groep besproken. Daarna wordt het geheugenmetaal NiTi, dat voor deze opdracht beschikbaar was, behandeld.

2.1 Soorten "smart materials"

Zoals verteld is de term "smart materials" een verzamelnaam voor verschillende materialen met een bepaalde eigenschap. Alleen de vier bekendste materialen die tot de "smart materials" behoren worden behandeld.

- 1) *Optische vezels*: Optische vezels worden in hoofdzaak gebruikt als sensoren. Ze kunnen licht doorleiden of opvangen. Ook kunnen ze gebruikt worden om straling te meten. Daarvoor moeten ze wel een bepaalde vloeistof bevatten die deze straling opvangt en omzet in licht. Optische vezels worden veel gebruikt als sensoren in robots.

- 2) *Piëzo-elektrische polymeren en keramieken*: Een piëzo-elektrische sensor geeft een elektrische respons als er een kracht op wordt aangebracht. Een groot voordeel van deze sensoren is dat een kleine verandering van de kracht al direct waarneembaar is in een verandering van het elektrisch signaal. Als actuator is de werking juist andersom, er wordt dan een kracht geleverd als er een elektrisch signaal aan het piëzo-elektrisch element wordt toegevoerd. Door de hoge gevoeligheid worden deze elementen veel gebruikt in constructies waar de positionering zeer belangrijk is.

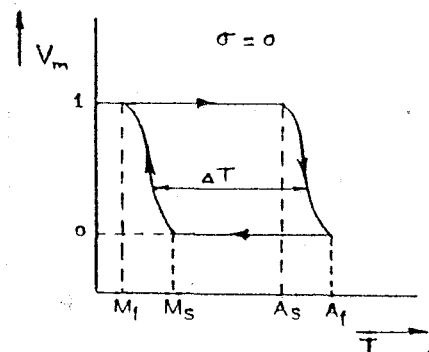
- 3) *Electro-rheologische vloeistoffen*: Deze vloeistoffen hebben de mogelijkheid om een abrupte reversibele verandering in de viscositeit te vertonen als er een spanning op de vloeistof wordt gezet. Ze worden veel gebruikt om het dynamisch gedrag van een systeem te veranderen. In vliegtuigvleugels worden ruimten aangebracht met daarin deze vloeistof, zodat de stijfheid tijdens het vliegen kan worden veranderd.

4) *Shape memory alloys*: Deze materialen hebben de mogelijkheid om een bepaalde vorm die zij hebben te onthouden. Deze materialen worden ook wel geheugenmetalen genoemd. Het metaal kan een relatief grote vervorming ondergaan, die na verwarmen boven de transitietemperatuur weer geheel verdwijnt. Deze metalen worden veel in de ruimtevaart gebruikt.

2.2 Shape memory alloys (SMA)

Geheugenmetalen hebben de eigenschap dat ze na plastische deformatie bij een relatief lage temperatuur weer in de uitgangstoestand terug keren als zij boven de transitietemperatuur worden verwarmd. Dit proces wordt een reversibele thermoelastische martensitische transformatie genoemd. Reversibel, omdat het proces heen en terug verloopt. Thermoelastisch, omdat een schijnbare plastische deformatie bij verwarmen toch elastisch blijkt te zijn. En martensitisch, omdat er bij verwarmen een omzetting van de martensiet structuur naar de austeniet structuur plaatsvindt. Een eenvoudiger benaming voor deze eigenschap is "shape memory effect" (SME).

Deze omzetting van de martensiet naar de austeniet structuur blijkt uit figuur 1, waar de volumefractie martensiet is uitgezet tegen de temperatuur. In deze figuur is te zien dat de volumefractie martensiet bij een temperatuur A_s plotseling sterk afneemt, om bij een temperatuur A_f tot nul te zijn gedaald (de volumefractie austeniet is nu uiteraard één). Bij afnemen van de temperatuur wordt er pas bij een temperatuur M_s weer martensiet gevormd en bij een temperatuur M_f is de volumefractie martensiet weer één. A_s en M_s staan voor austeniet respectievelijk martensiet start temperatuur. A_f en M_f staan voor austeniet respectievelijk martensiet finish temperatuur. Het martensiet dat bij deze verlaging van de temperatuur ontstaat heet temperatuur geïnduceerd martensiet (TIM). Deze benaming duidt er op dat de martensiet structuur ook nog op een andere manier tot stand kan komen. In figuur 2 wordt de volumefractie martensiet als functie van de spanning op het metaal weergegeven. De temperatuur van het metaal ligt boven de transitietemperatuur, zodat de volumefractie martensiet nul is bij een spanning nul. Als de spanning oploopt, dan vindt er bij een spanning σ_{a-m} een omzetting van austeniet naar martensiet



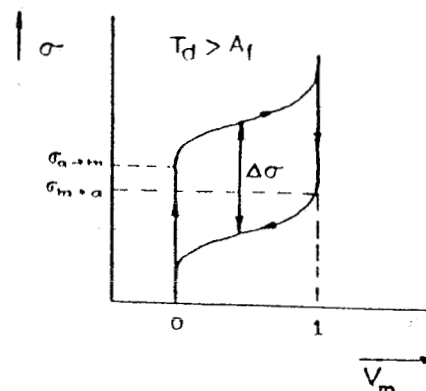
Figuur 1: Vorming van temperatuur geïnduceerd martensiet (TIM). (Besselink,b,13)

oploopt, dan vindt er bij een spanning σ_{a-m} een omzetting van austeniet naar martensiet

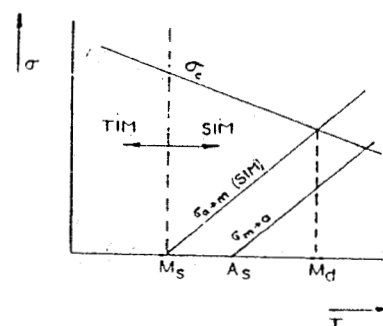
plaats, zodat de fractie martensiet stijgt. Het martensiet dat op deze manier ontstaat wordt spannings geïnduceerd martensiet (SIM) genoemd. Als daarna de spanning op het metaal weer afneemt, vindt er bij een spanning $\sigma_{m \rightarrow a}$ een omzetting plaats van martensiet naar austeniet. In figuur 3 is het spanning-temperatuur verband te zien met daarin aangegeven wanneer er TIM en wanneer er SIM wordt gevormd. Rechts van de lijn $\sigma_{m \rightarrow a}$ is er altijd austeniet aanwezig. Links van de lijn $\sigma_{a \rightarrow m}$ is er altijd martensiet aanwezig. Links van de verticale stippellijn is er TIM en rechts SIM. TIM ontstaat als de temperatuur beneden M_s daalt. SIM ontstaat als de temperatuur vanuit het austeniet gebied daalt naar een waarde net boven M_s (het geheugenmetaal is dan nog in de austeniet structuur), waarna de spanning wordt verhoogd. Uit deze figuur valt op te maken dat de transitietemperatuur is te beïnvloeden door middel van het verhogen van de spanning op het metaal.

2.3 Mechanische eigenschappen van SMA

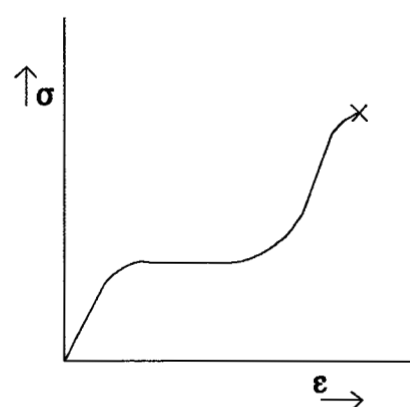
Geheugenmetalen vertonen een geheel ander mechanisch gedrag dan de meer bekende metalen. Het vreemde gedrag is al direct te zien aan het spanning-rek verband in figuur 4. In deze figuur is eerst een lineair-elastisch verloop te zien, waarna de rek plotseling sterk toeneemt terwijl de spanning constant blijft. Na dit plateau neemt de spanning weer toe, waarna breuk volgt. Dit vreemde spanning-rek gedrag van een geheugenmetaal kan op veel manieren worden toegepast. Een andere eigenschap van geheugenmetalen is het volgende. Het metaal wordt tot boven het plateau opgerekt, zie figuur 5. Er treedt dan een schijnbaar plastische deformatie op,



Figuur 2: Vorming van het spanningsgeïnduceerd martensiet (SIM). (Besselink,b,13)



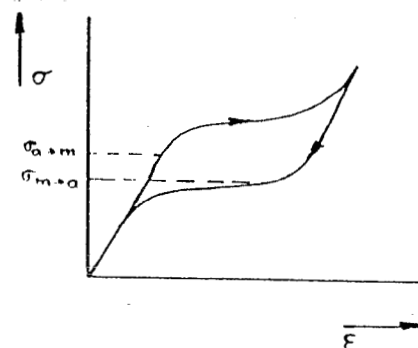
Figuur 3: De temperatuursafhankelijkheid van de sterkte van het NiTi, σ_c . Weergave van de gebieden waar TIM en SIM ontstaat. (Besselink,b,13)



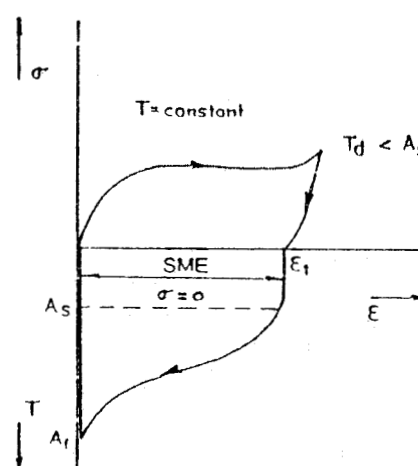
Figuur 4: Het spanning-rek verband van een geheugenmetaal.

want als de spanning weer afneemt dan verdwijnt ook de plastische deformatie in zijn geheel. Dit elastisch gedrag wordt pseudo-elasticiteit of superelasticiteit genoemd, omdat het gedrag niet lineair-elastisch is. De metalen die dit gedrag vertonen worden tweewegmetalen genoemd. De meeste geheugenmetalen vertonen echter een iets afwijkend gedrag zoals in figuur 6 is te zien. Ook hier wordt het metaal tot boven het plateau opgerekt (zie bovenste gedeelte van figuur 6), dit gebeurt wel bij een temperatuur die onder de transitietemperatuur van het metaal ligt. Daarna zakt de spanning weer tot nul en er is een blijvende plastische deformatie ontstaan. Als daarna de temperatuur wordt verhoogd (zie onderste gedeelte van figuur 6), dan verdwijnt de plastische deformatie weer geheel. Dit wordt het éénwegeffect van een geheugenmetaal genoemd. Als het metaal te ver boven het plateau wordt opgerekt, dan ontstaat er natuurlijk wel blijvende plastische vervorming.

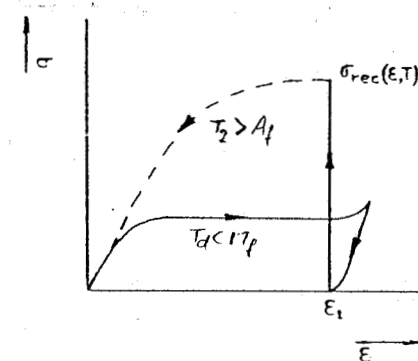
Een derde eigenschap is in figuur 7 te zien. In deze figuur wordt het geheugenmetaal een schijnbaar plastische deformatie ϵ_1 opgelegd. Op dat moment wordt het metaal vastgehouden, zodat het niet meer kan vervormen. Bij deze constante waarde van de rek wordt de temperatuur verhoogd tot boven de transitietemperatuur. De spanning in het geheugenmetaal neemt dan sterk toe. De spanning die op deze manier in het metaal ontstaat wordt de vormherstelspanning genoemd. Als het metaal daarna wordt losgelaten gaat het weer terug naar zijn oorspronkelijke vorm. Uit de figuur valt op te maken dat de teruggaande curve hoger ligt dan de heengaande, dat wil zeggen dat het geheugenmetaal arbeid heeft geleverd.



Figuur 5: De trek-tek kromme met pseudo-elasticiteit (PE). (Besselink,b,13)



Figuur 6: De trek-tek kromme met het éénwegeffect (SME). " $\sigma=0$ " duidt erop dat in de T, ϵ -grafiek geldt dat de spanning nul is. (Besselink,b,13)



Figuur 7: De vormherstelspanning die ontstaat bij het tegenhouden van het SME. (Besselink,b,14)

2.4 achteruitgang van het geheugeneffect

Het geheugeneffect van een SMA is het gevolg van het aanbrengen van een bepaalde structuur in het metaal bij het productieproces. Als deze structuur verandert, zal dit tot gevolg hebben dat het geheugeneffect wordt verstoord. Het veranderen van de structuur kan drie oorzaken hebben (Besselink,1987a,32):

- 1) *mechanische overbelasting*: Bij tegenhouden van het vormherstel kan de spanning erg hoog oplopen, waardoor er beschadiging ontstaat.
- 2) *te grote vervorming*: Bij een klein aantal cycli mag de vervorming groter zijn dan bij een groot aantal cycli. Bij te grote vervorming zal er ook beschadiging optreden.
- 3) *te hoge temperatuur*: Een te hoge temperatuur vormt de grootste bedreiging voor een SMA, vooral als het belast is.

2.5 Materialen met het shape memory effect

Het SME is ontdekt in het begin van deze eeuw, maar de ontwikkeling heeft niet doorgezet, omdat de metalen waarbij het effect werd ontdekt nog maar een gering SME vertoonden. In ±1968 werd bij toeval het SME bij NiTi ontdekt, omdat NiTi zeer gunstige eigenschappen bezit is sindsdien de ontwikkeling weer goed op gang gekomen.

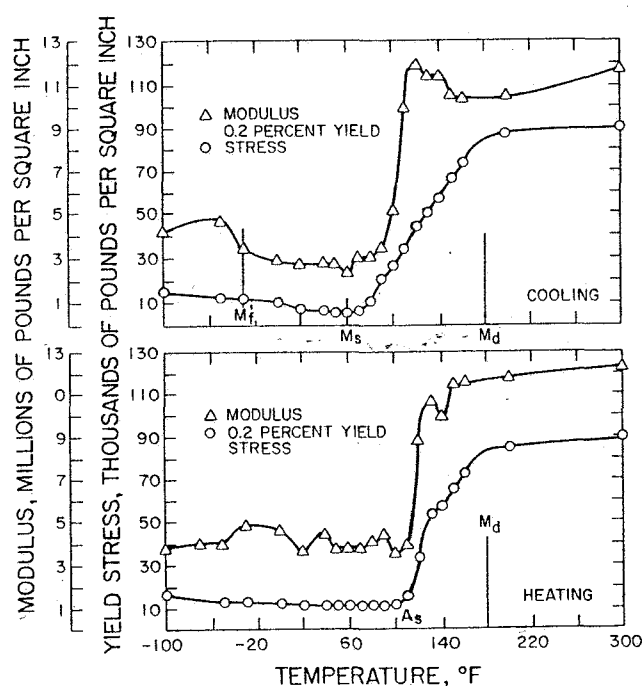
De volgende materialen komen in aanmerking als SMA: Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Ga, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Si, Cu-Al-Ni, Cu-Au-Zn, Cu-Sn, Au-Cd, Ni-Al, Fe-Pt, Ni-Ti (Rogers,1989b,41). Het merendeel van deze legeringen bezit slechts in beperkte mate het SME. Slechts drie metalen kunnen als een goed geheugenmetaal worden beschouwd, dat zijn: Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni en Ni-Ti. Van deze drie bezit Ni-Ti verreweg de beste eigenschappen (Besselink,b,28).

2.6 Nitinol

De legering NiTi wordt ook wel Nitinol genoemd. Deze naam is afkomstig van Nikkel, Titaan en Naval Ordinance Laboratory waar het geheugenmetaal is ontdekt.

Een groot voordeel van Nitinol is dat het een hoge elektrische weerstand heeft, waardoor het zich goed leent voor verwarmen met een elektrische stroom. Bij het verwarmen moet er rekening mee worden gehouden dat een temperatuur boven 250°C ertoe kan leiden dat een nieuwe vorm wordt onthouden (Funakubo,1987,201).

Een ander groot voordeel van Nitinol is dat de transitietemperatuur is vast te leggen door de samenstelling van de legering. Als de concentratie nikkel toeneemt, dan zal de transitietemperatuur lager worden. Om een goed SME te behouden mag de verhouding NiTi niet te veel van stochiometrisch afwijken. Het geheugeneffect blijft behouden als de legering 48 tot 52 atoomprocenten nikkel bevat (Besselink,1987a,32). De hoeveelheid Nikkel mag maximaal 56,5 gewichtsprocenten zijn, omdat anders het atoomrooster niet meer homogeen kan worden opgebouwd (Cross,1969,1). Deze maximale waarde komt goed overeen met de maximale waarde die Besselink voorschrijft, dit is aangetoond in bijlage 1. Verder schrijft Cross dat een verdere verlaging van de transitietemperatuur bereikt kan worden door toevoeging van kobalt aan de legering in plaats van nikkel. Door de samenstelling van de legering te variëren is een zeer groot bereik voor de transitietemperatuur mogelijk. Een variatie van 50 naar 53 atoomprocenten Nikkel (N.B. dit is 1 atoomprocent hoger dan Besselink maximaal voorschrijft) leidt tot variaties in de transitietemperatuur van 165 tot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Schuerch,1968,2). Een toename van 0,1 atoomprocenten nikkel kan leiden tot een afname van 15°C in de transitietemperatuur (Besselink,1987a,32). Om in de gehele legering dezelfde transitietemperatuur te verkrijgen is het dus belangrijk dat de legering goed homogeen is. In 1987 kon er al een nauwkeurigheid van $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ worden bereikt bij de bepaling van de transitietemperatuur (Besselink,1987a,32). Tenslotte heeft Nitinol het voordeel dat het bij een omslag van de martensiet naar de austeniet structuur een vier keer zo grote elasticiteitsmodulus en een 10 keer zo grote sterkte krijgt, zie figuur 8.



Figuur 8: De sterkte en de elasticiteitsmodulus van Nitinol tegen de temperatuur. (Rogers,1989a,44)

Hoofdstuk 3

3 Materiaalonderzoek

In dit hoofdstuk worden de experimenten besproken die uitgevoerd zijn om enkele fysische en mechanische eigenschappen van NiTi te verifiëren.

Het geheugenmetaal dat ter beschikking was, was een NiTi-draad met een diameter van 0,05 mm en een transitietemperatuur A_s van 40°C. Omdat de draad zo dun is kan hij eenvoudig met behulp van een elektrische stroom worden verhit.

3.1 Diameter van de draad

Als de draad wordt opgewarmd met behulp van een elektrische stroom, wordt de temperatuur in de draad bepaald door het evenwicht tussen het afgestane vermogen aan de omgeving en het opgenomen elektrische vermogen. Het opgenomen vermogen ontstaat door de combinatie van de elektrische weerstand van de draad en de stroom die door de draad loopt volgens:

$$P = V I = I^2 R \quad (1)$$

P = het opgenomen vermogen in de draad [W]

V = de spanning over de draad [V]

I = de stroom door de draad [A]

R = de elektrische weerstand van de draad [Ω]

De stroom is door iedere dwarsdoorsnede van de draad constant. Ook wordt aangenomen dat het afgestane vermogen over het hele oppervlak van de draad constant is. Om een gelijkmatige opwarming te krijgen moet de weerstand van de draad in ieder klein gebiedje van de draad even groot zijn. Voor de weerstand van een gebiedje in de draad met lengte Δl en dwarsdoorsnedeoppervlak A geldt:

$$R = R_s \frac{\Delta l}{A} \quad (2)$$

R_s = de soortelijke weerstand van NiTi [Ωmm]

Als het dwarsdoorsnedeoppervlak van de draad niet over de gehele lengte van de draad constant is, dan zal er verschil van weerstand zijn tussen twee gebieden in de draad. Er is dan ook verschil in de transitietemperatuur van die twee gebieden. De draad zal dus niet over de hele lengte gelijk krimpen. Uitgaande van deze redenering is het van belang is dat de draad over de hele lengte een vrijwel constante diameter heeft. De draaddiameter van de NiTi-draad is gemeten met een micrometer met een nauwkeurigheid van $\pm 2 \mu\text{m}$. Het resultaat van deze metingen is dat de draad overal binnen de nauwkeurigheid van $2 \mu\text{m}$ een diameter van $50 \mu\text{m}$ heeft. Het dwarsdoorsnedeoppervlak van de draad is gelijk aan:

$$A = \frac{\pi}{4} (0,05)^2 = 1,96E-3 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

3.2 Weerstand van de draad

In de vorige paragraaf is bepaald dat de weerstand van een stukje draad met lengte Δl , over de gehele draad hetzelfde is. Met het volgende experiment is de soortelijke weerstand van de draad in de martensiet en in de austeniet structuur bepaald. Over een draad met lengte l wordt een spanning gezet. De relatie tussen de spanning en de stroom wordt dan gemeten. Uit deze waarden zijn de weerstand van de draad en de soortelijke weerstand van NiTi te bepalen volgens:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

$$R_s = R \frac{A}{l} \quad (5)$$

De resultaten van de metingen en de berekeningen van deze twee weerstandwaarden zijn te zien in bijlage 2. De soortelijke weerstanden die uit deze berekeningen volgen zijn:

$$R_{s \text{ martensiet}} = 1,19E-3 \Omega\text{mm}$$

$$R_{s \text{ austeniet}} = 0,97E-3 \Omega\text{mm}$$

Aan de waarde voor martensiet mag wel enige twijfel worden gehecht, omdat de waarden van de metingen op één draad zeer sterk fluctueren.

Uit deze metingen volgt dat de soortelijke weerstand van de martensiet structuur hoger is, dan

die van de austeniet structuur. In de literatuur staat echter dat de weerstand van de austeniet structuur hoger is, dan die van de martensiet structuur (Cross,1969,14). De waarde van de soortelijke weerstand die zojuist is verkregen wordt vergeleken met de waarde van andere metalen, zie tabel 1.

Tabel 1: Vergelijking van de soortelijke weerstand van NiTi met die van andere metalen, bij 20°C.

(Gieck,1983,Z21).

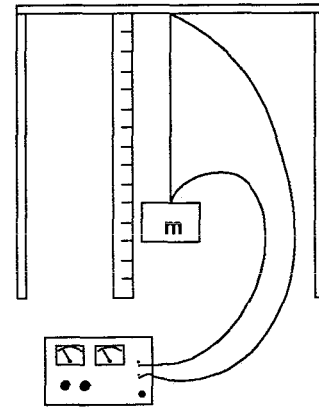
	R_s martensiet [Ω mm]
NiTi	1,19E-3
ijzer	1,00E-4
tin	1,20E-4
nikkel	8,70E-5
koper	1,75E-5
zilver	1,67E-5

In deze tabel is inderdaad te zien dat NiTi een soortelijke weerstand heeft die minstens één orde hoger is dan die van de overige metalen in deze tabel. Daarom kan NiTi goed worden verwarmd met behulp van een elektrische stroom.

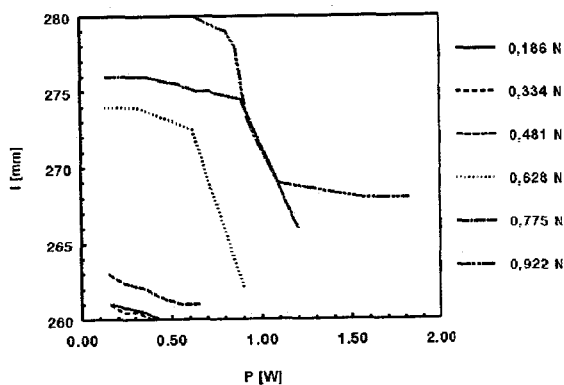
3.3 Het transitiepunt

Uit figuur 3 valt op te maken dat de temperatuur A_s naar hogere temperatuur verschuift als de draad belast wordt. Deze eigenschap is met het volgende experiment geverifieerd. De opstelling is als in figuur 9. In deze opstelling is de draad opgehangen aan een frame, de draad wordt door een variabele massa "m" belast. De lengte van de onbelaste draad is 260 mm en m varieert tussen 0,186 en 0,922 N. Daarna wordt er een spanning over de draad gezet en wordt bij toenemend vermogen de lengte van de draad gemeten. Dit experiment is bij zes verschillende belastingen uitgevoerd, de resultaten staan in bijlage 3.

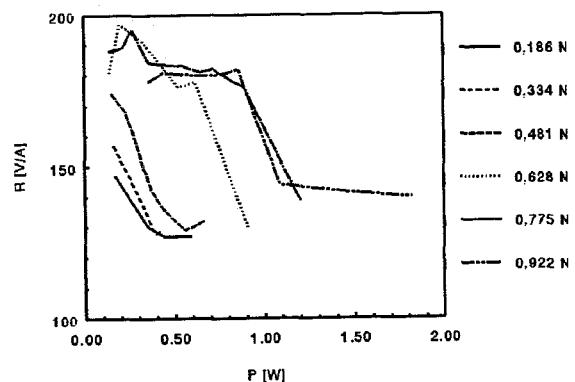
De resultaten van dit experiment zijn weergegeven in figuur 10. In deze grafiek is de lengte van de draad bij verschillende belastingen uitgezet tegen het toegevoerde elektrische vermogen. Uit deze grafiek blijkt dat er bij een lage belasting nauwelijks vormherstel optreedt. Dit kan ook niet, want de belasting op de draad is dan zo klein dat hij slechts 1 mm wordt uitgerekt. Vanaf de vierde belasting valt er een duidelijk vormherstel waar te nemen. De belasting op de draad is dan ook zo groot dat het materiaal tot boven het plateau in de spanning-rek kromme is opgerekt. De rek is dan duidelijk waar te nemen. Uit de waarden van de tabel in bijlage 3 kunnen ook nog conclusies worden getrokken over de weerstand van de draad. In figuur 11 is de elektrische weerstand van de draad bij verschillende belastingen uitgezet tegen het toegevoerde elektrische vermogen. Uit deze grafiek valt nog eens duidelijk waar te nemen dat uit de metingen blijkt dat de martensiet structuur een hogere soortelijke weerstand heeft dan de austeniet structuur.



Figuur 9: Meetopstelling voor het bepalen van de verlenging tegen het toegevoerde vermogen. Deze opstelling is te zien op foto 1 in bijlage 8.



Figuur 10: Lengte van de draad als functie van het toegevoerde vermogen bij verschillende belastingen.



Figuur 11: De weerstand van de draad als functie van het toegevoerde vermogen bij verschillende belastingen.

In het omslagtraject zijn geen metingen uitgevoerd, omdat het omslagtraject instabiel is. Om de temperatuur van de draad te laten stijgen moet de spanning toenemen. In eerste instantie

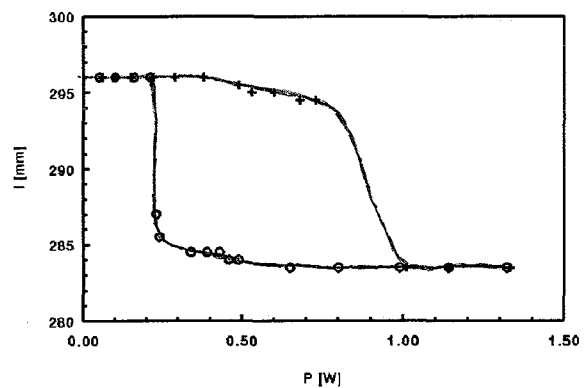
blijft de weerstand gelijk, dat wil zeggen dat de stroom toeneemt. Op een gegeven moment komt de draad in het omslagtraject terecht. De weerstand van de draad wordt dan lager, de spanning blijft constant, dus de stroom neemt toe. Het toegevoerde vermogen neemt dus toe, wat wil zeggen dat de temperatuur van de draad stijgt. Als de temperatuur stijgt dan komt de draad nog verder in het omslagtraject terecht, etc. Hieruit blijkt dat het evenwicht tussen de martensiet en de austeniet structuur van de draad in het omslagtraject instabiel is. Deze instabiliteit van het omslagtraject komt voort uit het feit dat de draad elektrisch wordt verwarmd. Hieruit blijkt dat het moeilijk is om de draad zo te verwarmen dat hij langzaam het omslagtraject doorloopt.

3.4 Hysterese bij opwarmen en afkoelen

Omdat geldt dat de temperatuur A_s hoger is dan de temperatuur M_s , is er sprake van hysteresis. Om deze hysteresis te verifiëren wordt gebruik gemaakt van de opstelling als in figuur 9 afgebeeld. De lengte van de draad is 269 mm en de belasting op de draad is 0,65 N. Deze belasting is nodig om op de draad enige voorrek aan te brengen, zodat de vorm zich bij toename van de temperatuur kan herstellen (zonder vervorming geen herstel bij verwarmen).

De resultaten van deze meting staan in de tabel

in bijlage 4 en zijn uitgezet in figuur 12. Uit de grafiek blijkt dat het transitiepunt bij opwarmen, A_s , een duidelijk hogere temperatuur heeft dan het transitiepunt bij afkoelen, M_s .



Figuur 12: De hysteresis curve. De omslag naar austeniet treedt bij een hogere temperatuur op dan de omslag naar martensiet. + is bij stijgende temperatuur en o is bij dalende temperatuur.

3.5 Trekproeven

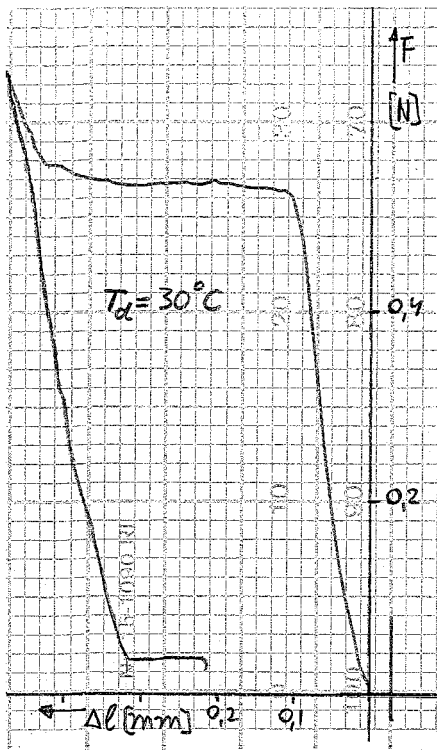
Om meer inzicht in de mechanische eigenschappen van NiTi te krijgen zijn er enkele trekproeven uitgevoerd. Vooraf wordt opgemerkt dat het niet eenvoudig is om een trekproef te doen met zo'n dunne draad. Twee metingen onder dezelfde omstandigheden geven daarom soms verschillende

resultaten. De trekproeven zijn ook alleen maar bedoeld om een indicatie van bepaalde waarnemingen te geven. Er zijn een aantal trekproeven uitgevoerd met een draad van 80 mm lengte. Al deze spanning-rek krommen zijn in bijlage 5 te zien. Uit deze krommen zijn een aantal karakteristieke variabelen bepaald. Deze zijn in de tabel in bijlage 6 weergegeven.

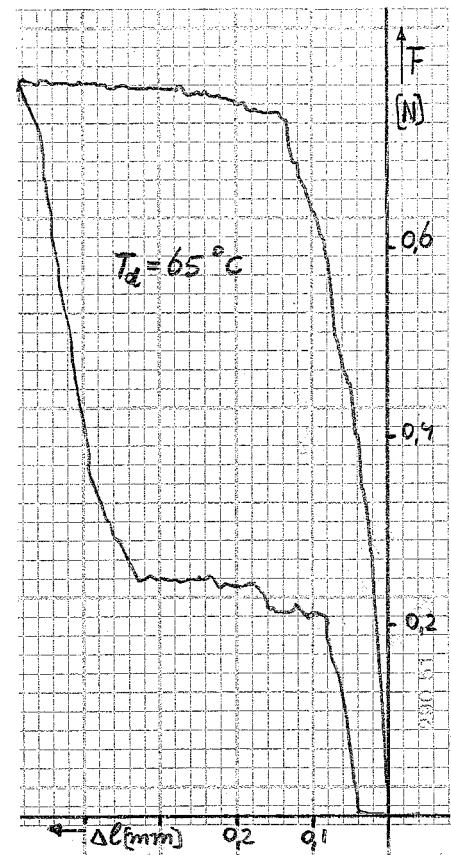
Uit de waarden van de E-modulus is te zien dat deze veel lager ligt dan die van staal ($210E3 \text{ N/mm}^2$). De E-modulus is te vergelijken met die van tin ($40E3 \text{ N/mm}^2$). Er is duidelijk te zien dat de waarde van de E-modulus stijgt bij de omslag van martensiet naar austeniet. In paragraaf 2.6 zagen we dat hij vier keer zo groot werd, maar uit de metingen blijkt dat hij slechts verdubbeld. De breukrek blijft onveranderd als de temperatuur stijgt. Ook valt er geen duidelijke toename van de breukspanning waar te nemen bij de omslag van martensiet naar austeniet. In paragraaf 2.6 zagen we echter dat deze waarde tien keer zo groot kon worden. Er treedt wel een duidelijke toename van de plateauspanning en de lengte van het plateau op.

Het volgende experiment dat is uitgevoerd is het verifiëren van de hysteresis die optreedt in de spanning-rek curve. Het eerste experiment dat is uitgevoerd is het volgende: de draad wordt bij een temperatuur van 30°C , dat is beneden de transitietemperatuur, opgerekt tot boven het plateau. Daarna wordt de spanning weer van de draad gehaald, zodat de draad elastisch terugveert. De draad is nu pseudo-elastisch vervormd. De temperatuur wordt dan verhoogd tot boven de transitietemperatuur, hierdoor zal de vervorming weer geheel verdwijnen, er treedt dus vormherstel op. De spanning-rek kromme die bij dit experiment hoort is in figuur 13 te zien.

Het tweede experiment is uitgevoerd bij een temperatuur van 65°C , dat is boven de transitietemperatuur. Als de spanning nu van de draad wordt gehaald, treedt er direct vormherstel op. Dit is te zien in figuur 14.



Figuur 13: De hysteresecurve bij een temperatuur van 30°C.



Figuur 14: De hysteresecurve bij een temperatuur van 65°C.

Hoofdstuk 4

4 Opstellingen/constructies

In dit hoofdstuk worden een aantal constructies besproken waarmee een vlak uit zijn vlak kan worden vervormd.

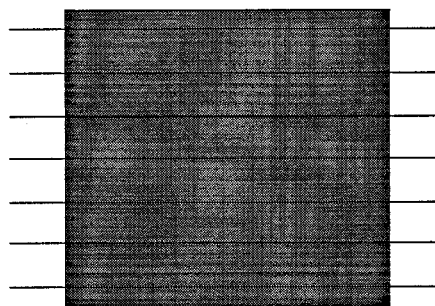
De NiTi-draad die in een constructie gebouwd wordt, moet wel opgerekt zijn. Want als de draad niet opgerekt is, dan kan hij ook geen vormherstel vertonen bij opwarmen. De rek die telkens op de NiTi-draad aan wordt gebracht is $\pm 5\%$. Er wordt voor deze waarde van de rek gekozen, omdat deze rek handmatig op de draad is aan te brengen zonder dat hij breekt en omdat de draad bij een groot aantal cycli dan nog zijn geheugeneffect behoudt.

Verbindingsmethoden die voor de NiTi-draad van toepassing zijn, zijn de volgende:

- *Knopen*: een knoop heeft als nadeel dat hij de draad verzwakt, maar het is wel een goede en snel aan te brengen verbinding.
- *Lijmen*: lijmen is alleen met speciale lijmen mogelijk. Omdat de draad zo dun is, is het zeer moeilijk om de draad aan de lijm te laten hechten, vooral als de draad ook nog verwarmd wordt. De lijm die is gebruikt is "Araldite" van "Ciba-Geigy", dit is een 2-componenten epoxy-hars, de nummers zijn "HV953U" en "AW106".
- *Micropuntlassen*: deze methode niet is niet beproefd, maar is waarschijnlijk wel mogelijk.

4.1 NiTi-draad in latex

Om te proberen of het latex vlies wil vervormen onder invloed van de krachten die de NiTi-draden leveren bij inkrimping, is het volgende experiment uitgevoerd. De NiTi-draden worden in één richting in latex ingebed, zie figuur 15. Nadat de draden opgerekt zijn worden ze ingebed tussen twee lagen latex (de beschrijving van het inbedden is te zien in bijlage 7). Als het vlies klaar is dan liggen de draden gegolfd in het latex vlies. Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken aan te wijzen:



Figuur 15: Het latex vlies met daarin de NiTi-draden ingebed. Dit latex vlies is in bijlage 8 in figuur 23 te zien.

- Het kan het gevolg zijn van de ronding van de trommel waarop het latex vlies wordt gemaakt.
- Bij het drogen van het latex treedt er krimp op. De NiTi-draad kan niet krimpen en zal daarom op een andere manier vervormen.

Als daarna de NiTi-draden verwarmd worden met het doel om enige vervorming in het latex vlies te krijgen, gebeurt er weinig. Het enige wat er te zien is, is dat de draden in het vlies strak trekken, er is verder geen sprake van vervorming van het latex vlies. Als daarna de draden weer worden opgerekt, dan komen ze weer gegolfd in het latex vlies te liggen. Herhaald verwarmen en oprekken van de NiTi-draden levert ook geen resultaat. Daarna zijn nog latex vliezen gemaakt die iets dikker waren, zodat ze dan niet zo vlug zouden golven, maar dit leverde ook geen resultaat op.

Voor het falen van deze experimenten is de volgende oorzaak aan te wijzen: De kracht die een draad levert, wordt over de gehele lengte van de draad overgedragen. Doordat het vlies over de hele lengte aan de draad aanligt neemt het vlies over de hele lengte van de draad de kracht op, waardoor deze kracht veel te klein is om het vlies lokaal te vervormen. Dit is als volgt te begrijpen. Er wordt uitgegaan van het model dat de draad op microniveau in discrete punten met het vlies is verbonden. Tussen twee naburige punten ontstaat door verwarmen een krimpkracht. Als deze krimpkracht te klein is om de buigstijfheid van het vlies tussen deze twee punten te overwinnen zal er geen vervorming optreden.

4.2 Matrix van draden

Om de oorzaak van falen bij het vorige experiment te vermijden is het volgende experiment uitgevoerd. Een aantal draden worden kruislings over elkaar met veertjes opgespannen. Op de knooppunten worden de kruisende draden met een stuk rubber van elkaar geïsoleerd en aan elkaar gelijk, zie figuur 16. Uit deze constructie moet blijken of een aaneenschakeling van kleine stukjes kan leiden tot grote vervormingen.

De constructie is als volgt getest. Alle draden zijn tussen de veertjes strak gespannen. Daarna zijn alle draden $\pm 5\%$ opgerekt, zodat de gehele matrix in het midden doorhangt. Als dan enkele draden worden verwarmd, dan zullen die draden weer strak trekken en zal er enige vervorming van het vlak op moeten treden. Bij uitvoeren van het experiment valt er slechts een geringe vervorming van het vlak van de matrix waar te nemen. Omdat het vlak slechts in geringe mate vervormt als de draden geen latex mee hoeven te vervormen, wordt er vanuit gegaan dat deze

methode en daarbij ook de methode uit paragraaf 4.1 voor het vervormen van het latex vlies niet in aanmerking komen.

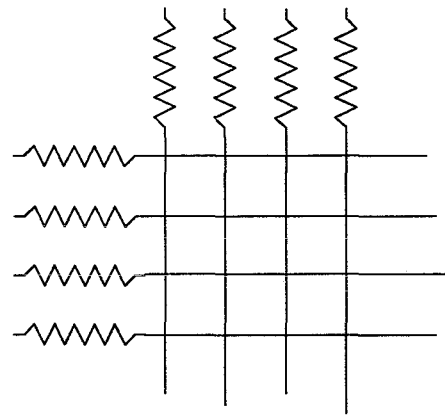
4.3 Holle vezel

De NiTi-draad wordt in een holle vezel gebracht en aan één eind verbonden met de vezel. Aan het andere eind worden de vezel en de draad beide aan de vaste wereld verbonden. Als de NiTi-draad wordt verwarmt, dan ontstaat er een kracht in de draad die op beide einden van de holle vezel werkt. Onder invloed van deze kracht zal de vezel uitbuigen, zie figuur 17. Als er meerdere van deze vezels langs elkaar in een vlak worden gelegd, kan er op deze manier vervorming in het vlak worden gerealiseerd.

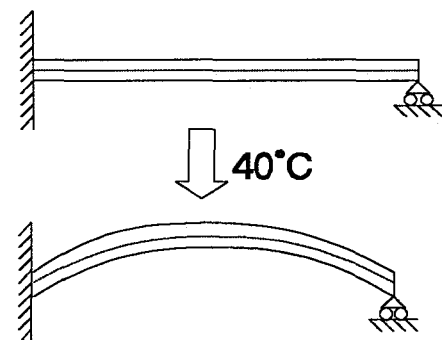
Na beproeving van één holle vezel blijkt dat de vezel wel uitbuigt, maar dat deze over de lengte van de vezel naar verschillende richtingen uitbuigt. Er is dus geen controle over de richting van uitbuigen. Ook als de holle vezel in latex ligt is er geen controle over de richting van uitbuigen.

4.4 Buigende staaf

Deze constructie bestaat uit een dun metalen stripje van ongeveer 3 mm breed, 200 mm lang en 0,5 mm dik. De einden van de strip worden omgebogen en tussen deze omgebogen einden wordt een draad verbonden die $\pm 5\%$ gerekt is, zie figuur 18. De draad moet aan één eind natuurlijk isolerend van de metalen strip verbonden worden, anders kan er geen stroom door de draad worden gestuurd. Als de draad wordt verwarmd, krimpt deze. Dit heeft tot gevolg dat de strip buigt. Als er een aantal van deze strips in een vlak worden gelegd, kan er vervorming van het vlak optreden. Een belangrijk nadeel van deze constructie is dat de NiTi-draden niet in het vlak van vervorming



Figuur 16: De matrix van draden. De draden zijn op de randen vastgezet met veertjes en op de knooppunten vastgelijmd. De matrix is in bijlage 8 in figuur 24 te zien.

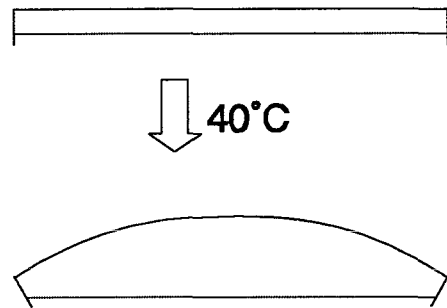


Figuur 17: De NiTi-draad is vastgezet in de holle vezel. De onderste situatie ontstaat als de NiTi-draad wordt verwarmd.

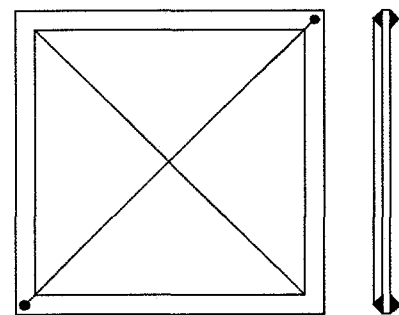
liggen. Een voordeel is dat de vervormingen die optreden zeer groot zijn.

4.5 Buigend vierkant

Deze constructie bestaat uit een metalen vierkant van 50x50 mm en 0,5 mm dik. Het vierkant wordt open gemaakt, zodat er randen van 1 à 2 mm ontstaan, zie figuur 19. Aan de bovenkant van het vierkant wordt tussen twee tegenoverliggende hoekpunten een draad bevestigd die $\pm 5\%$ gerekt is. Aan de onderkant van het vierkant wordt tussen de twee andere hoekpunten ook een draad bevestigd. De draden dienen op alle vier de hoekpunten isolerend van het metalen vierkant te zijn bevestigd. Als beide draden worden verwarmd, dan krijgt het vierkant enigszins de vorm van een gebogen vlak. De vervorming van één vierkant is klein, maar als er enkele vierkanten met elkaar worden verbonden zal de vervorming groter moeten zijn. Ook bij deze constructie liggen de NiTi-draden niet in het vlak van vervorming. De vervorming die per vierkant ontstaat is minder groot dan bij de buigende strip, omdat het vierkant veel kleinere afmetingen heeft.



Figuur 18: De NiTi-draad is vastgemaakt aan de strip. De onderste situatie ontstaat als de NiTi-draad wordt verwarmd. De buigende staaf is in bijlage 8 in figuur 25 te zien.

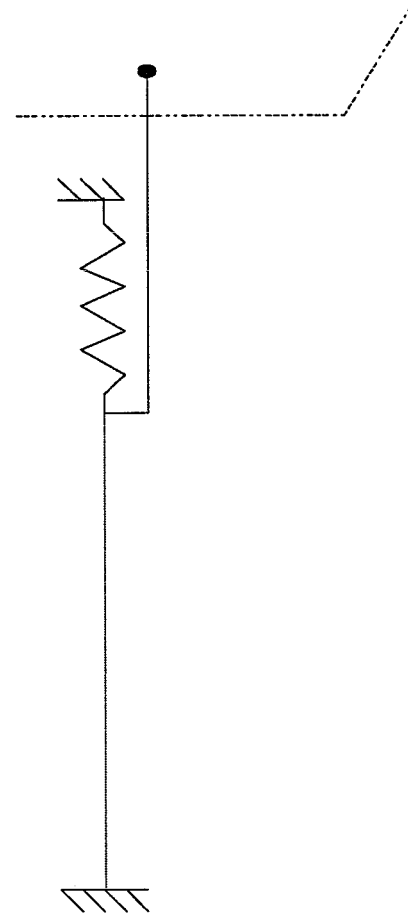


Figuur 19: Het vierkant met boven en onder één draad. Het vierkant is in bijlage 8 in figuur 25 te zien.

4.6 Puntvervorming

De NiTi-draden worden nu verticaal geplaatst en met behulp van een veer ingespannen en opgerekt. Aan het eind van de draad wordt een staafje bevestigd dat boven de bevestiging van de veer uitkomt. Aan dit staafje kan dan het latex vlies worden verbonden. Als de draad wordt verwarmd, dan zal het staafje naar beneden worden getrokken, waardoor het latex vlies vervormd, zie figuur 20. Bij deze constructie liggen de draden dus in het geheel niet in het vlak van vervorming. Een nadeel is dat er zeer veel draden nodig zijn om vervorming over een groot vlak te krijgen, hierbij komt dan ook nog dat door het grote aantal draden er ook een groot aantal aanstuurpunten

ontstaat. Een voordeel is dat er bij één aansturing niet over een gehele lijn vervorming plaatsvindt, maar dat er slechts vervorming in één punt is.



Figuur 20: De opstelling waarbij het latex vlies in ieder punt afzonderlijk wordt vervormd. Deze opstelling is in bijlage 8 in figuur 25 te zien.

Hoofdstuk 5

5 Conclusie

De structuur van SMA is goed te bepalen en te wijzigen door middel van het veranderen van de temperatuur van het materiaal. Alhoewel in het omslagtraject de structuur moeilijk is te controleren, omdat dan de soortelijke weerstand van het materiaal sterk verandert.

Er blijkt ook dat het transitiepunt tussen de martensiet en de austeniet structuur goed is te verschuiven door middel van het aanbrengen van een belasting op het geheugenmetaal.

Het verschil in temperatuur tussen het transitiepunt A_s en M_s is duidelijk waar te nemen in de hysteresecurve.

Uit trekproeven blijkt dat de E-modulus, de plateauspanning en de lengte van het plateau een duidelijke stijging laten zien bij toename van de temperatuur.

De opdracht om vervorming van een vlak uit zijn vlak te krijgen door het gebruik van geheugenmetaal heeft nog geen concreet ontwerp opgeleverd.

Hoofdstuk 6

6 Aanbevelingen

Bij de methode in paragraaf 4.1 waarbij de NiTi-draad in latex is ingebed is het waarschijnlijk wel mogelijk om vervormingen van het latex te krijgen als er een dikkere draad wordt gebruikt. Een dikkere draad kan meer kracht ontwikkelen, zodat de latex dan wel geneigd is om mee te vervormen.

Bij de methode van paragraaf 4.3 kan er in plaats van een holle vezel gebruik worden gemaakt van een lange slappe drukveer. De drukveer zal waarschijnlijk ook uitbuigen en misschien is de richting van uitbuigen meer stabiel en voorspelbaar. Een veer heeft ook als voordeel dat de kracht die nodig is om hem te vervormen kleiner is dan bij een holle vezel.

Bij de methode van paragraaf 4.5 is het mogelijk om verschillende vierkanten langs elkaar te plaatsen, zodat de vervormingen die optreden groter zijn. Een moeilijkheid die hierbij zal optreden is de controle van de vervorming van ieder vierkant.

Bijlage 1: Vergelijken van atoomprocenten met gewichtsprocenten

De relatieve atoommassa van Nikkel is gelijk aan 58,7, die van Titaan is gelijk aan 47,9.

Een blokje NiTi met 100 atomen en een atoompercentage nikkel van 52% heeft dus een relatieve massa van:

$$m_{\text{blokje}} = 52 \cdot 58,7 + 48 \cdot 47,9 = 5351,6 \quad (6)$$

De relatieve massa van nikkel in dit blokje is:

$$m_{\text{Ni}} = 52 \cdot 58,7 = 3052,4 \quad (7)$$

Het gewichtspercentage van nikkel in dit blokje is:

$$\frac{m_{\text{Ni}}}{m_{\text{blokje}}} = \frac{3052,4}{5351,6} = 57\% \quad (8)$$

Een atoompercentage nikkel van 52% in NiTi komt dus overeen met een gewichtspercentage van 57%.

Bijlage 2: Meetwaarden bij de weerstandmeting

In deze tabellen zijn de meetwaarden weergegeven van de metingen die uitgevoerd zijn om de soortelijke weerstand van NiTi te bepalen.

draad 1 $l_0 = 265$ mm					
martensiet			austeniet		
V [V]	I [A]	R [Ω]	V [V]	I [A]	R [Ω]
2,13	13	164	6,79	48	141
2,62	16	164	7,17	52	138
3,07	19	162	7,74	58	133
3,43	22	156	8,34	63	132
4,20	27	156	9,10	66	138
4,80	31	155	10,17	78	130
160			135		

draad 2 $l_0 = 275$ mm					
martensiet			austeniet		
V [V]	I [A]	R [Ω]	V [V]	I [A]	R [Ω]
1,46	8	183	6,53	48	136
2,05	10	205	6,87	50	137
2,67	15	178	7,42	55	135
3,03	18	168	8,00	60	133

3,87	24	161	8,84	68	130
4,45	29	153	9,78	75	130
---			134		

draad 3 $l_0 = 265 \text{ mm}$					
martensiet			austeniet		
V [V]	I [A]	R [Ω]	V [V]	I [A]	R [Ω]
1,54	9	171	6,49	48	135
2,10	12	175	7,09	54	131
2,72	16	170	7,57	59	128
3,26	22	148	8,05	65	124
3,94	27	146	9,00	70	129
4,43	30	148	9,81	76	129
---			129		

De metingen van de weerstand van de draad in de martensiet structuur van de 2^e en ook de 3^e draad wijken onderling veel van elkaar af. Daarom worden deze waarden niet meegenomen bij de bepaling van de soortelijke weerstand van NiTi in de martensiet structuur. De weerstand van het martensiet wordt bepaald aan de hand van de metingen van de 1^e draad. Bij de bepaling van de weerstand van de austeniet structuur wordt gebruik gemaakt van de metingen van alle drie de draden.

De soortelijke weerstand van NiTi in de martensiet structuur wordt dan gelijk aan:

$$R_{s \text{ martensiet}} = R \frac{A}{l} = 160 \frac{1,96E-3}{265} = 1,19E-3 \text{ } \Omega mm \quad (9)$$

De soortelijke weerstand van NiTi in de austeniet structuur wordt dan gelijk aan het gemiddelde van de drie draden:

$$R_{s \text{ austeniet}} = \frac{1}{3} \left(135 \frac{1,96E-3}{265} + 134 \frac{1,96E-3}{275} + 129 \frac{1,96E-3}{265} \right) = 0,97E-3 \text{ } \Omega mm^{(10)}$$

Bijlage 3: meetwaarden bij de transitiepuntmeting

In deze tabel zijn de meetwaarden weergegeven van de metingen die uitgevoerd zijn om het verschuiven van het transitiepunt te bepalen. De spanning, de stroom en de lengte zijn gemeten en de waarden van P, R en ϵ zijn hieruit berekend. De rek is bepaald ten opzichte van de lengte van de draad na belasten.

V [V]	I [mA]	l [mm]	P [W]	R [Ω]	ϵ [%]
belasting is 0,19 g = 0,186 N					
5,01	34	261	0,17	147	0
6,77	52	260,5	0,35	130	0,2
7,50	59	260	0,44	127	0,4
8,61	68	260	0,59	127	0,4
belasting is 0,34 g = 0,334 N					
5,03	32	261	0,16	157	0
5,93	40	260,5	0,24	148	0,2
6,60	48	260,5	0,32	138	0,2
7,06	55	260	0,39	128	0,4
7,46	58	260	0,43	129	0,4
belasting is 0,49 g = 0,481 N					
5,04	29	263	0,15	174	0
6,22	37	262,5	0,23	168	0,2
7,29	51	262	0,37	143	0,4

V [V]	I [mA]	l [mm]	P [W]	R [Ω]	ϵ [%]
7,74	57	261,5	0,44	136	0,6
8,53	66	261	0,56	129	0,8
9,35	71	261	0,66	132	0,8
belasting is 0,64 g = 0,628 N					
5,07	28	274	0,14	181	0
6,30	32	274	0,20	197	0
7,86	41	274	0,32	192	0
9,68	55	273	0,53	176	0,4
10,52	59	272,5	0,62	178	0,5
10,89	84	262	0,91	130	4,4
belasting is 0,79 g = 0,775 N					
5,08	27	276	0,14	188	0
6,24	33	276	0,21	189	0
7,20	37	276	0,27	195	0
8,08	44	276	0,36	184	0
10,06	55	275,5	0,55	183	0,2
10,83	60	275	0,65	181	0,4
11,49	63	275	0,65	182	0,4
12,53	71	274,5	0,89	176	0,5
12,95	93	266	1,20	139	3,6
belasting is 0,94 g = 0,922 N					

V [V]	I [mA]	l [mm]	P [W]	R [Ω]	ϵ [%]
8,02	45	280	0,36	178	0
8,89	49	280	0,44	181	0
10,61	59	280	0,63	180	0
11,32	63	279,5	0,71	180	0,2
12,16	67	279	0,81	181	0,4
12,53	69	278	0,86	182	0,7
12,56	74	273	0,93	170	2,5
12,56	87	269	1,09	144	3,9
14,95	106	268	1,58	141	4,3
15,97	114	268	1,82	140	4,3

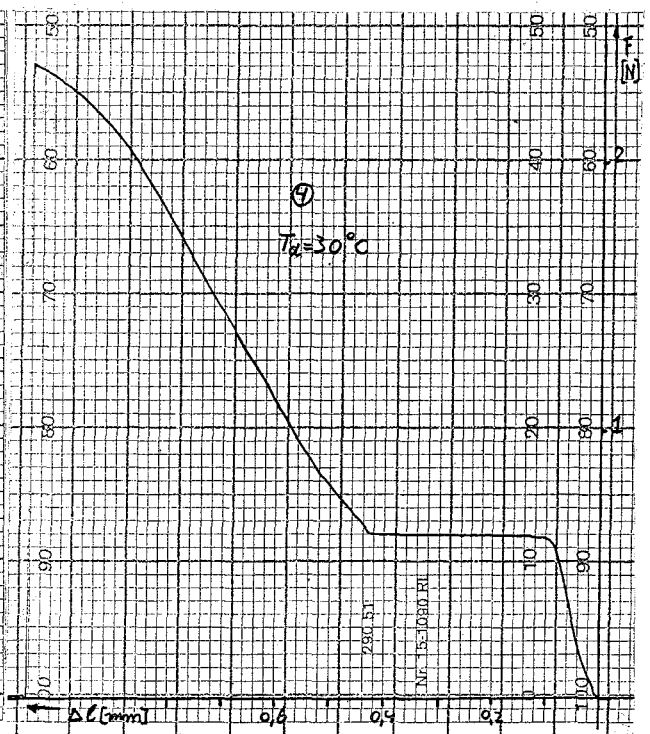
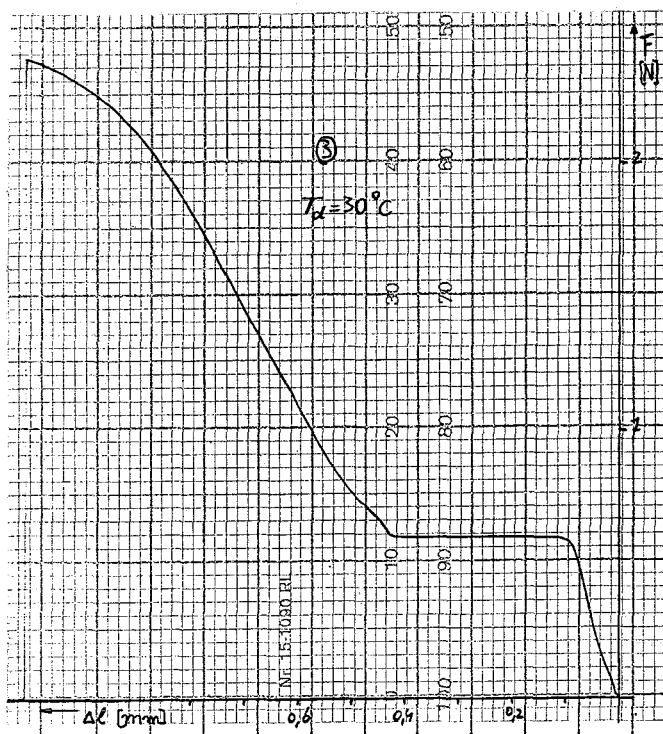
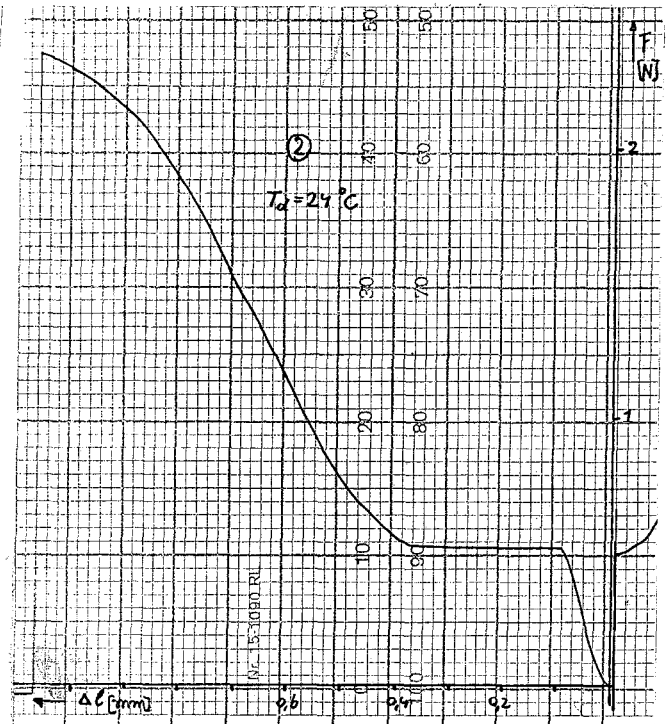
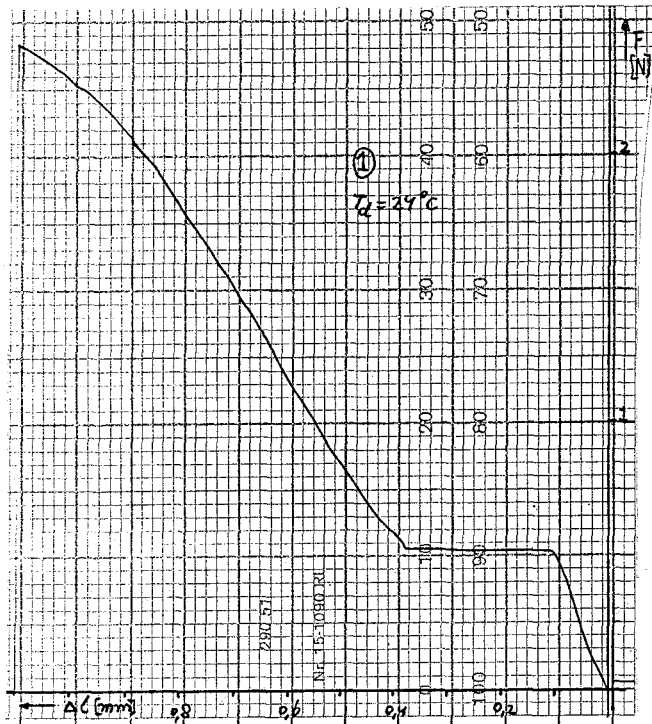
Bijlage 4: meetwaarden bij de hysteresemeting

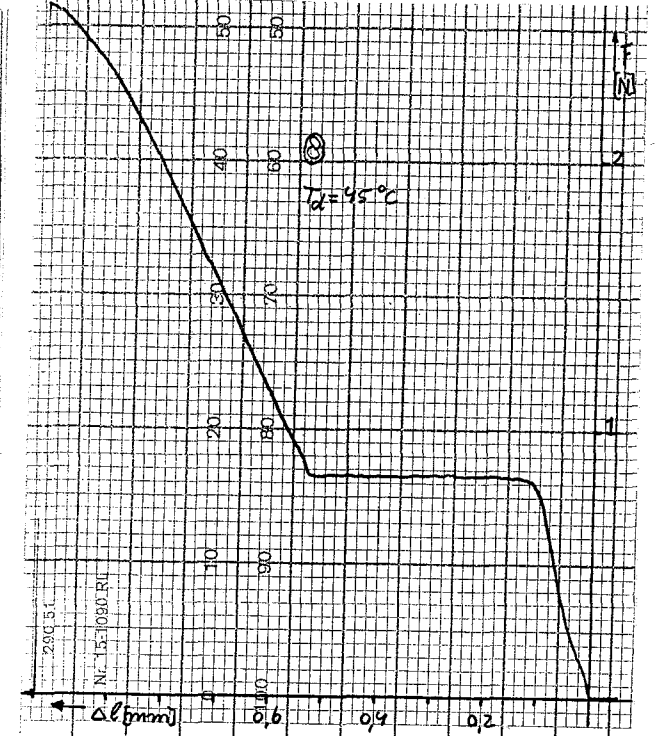
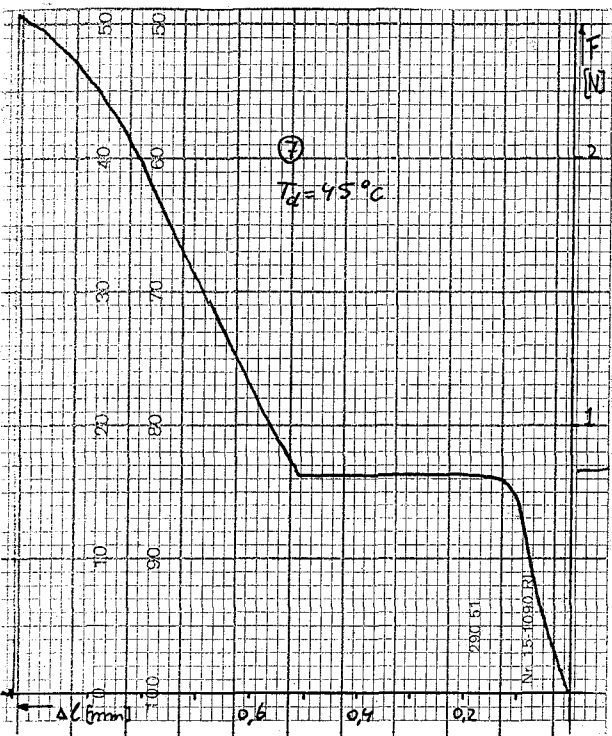
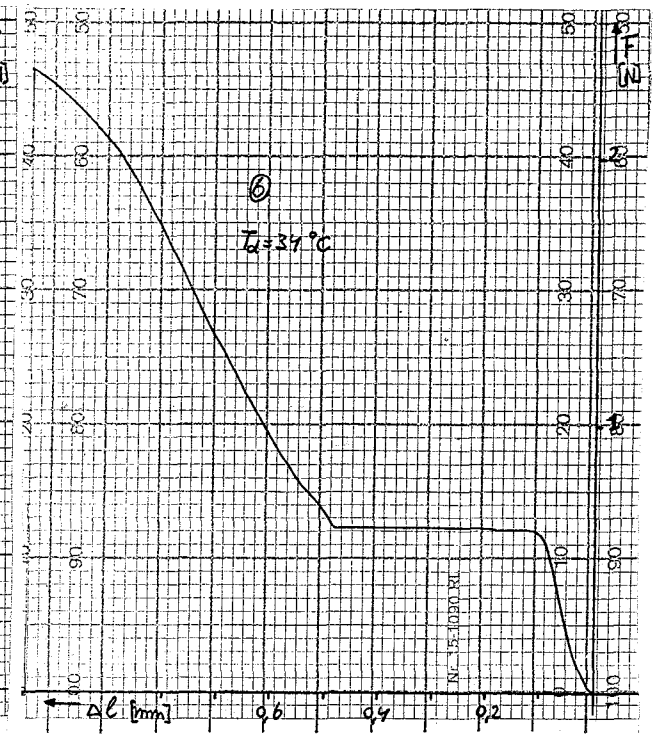
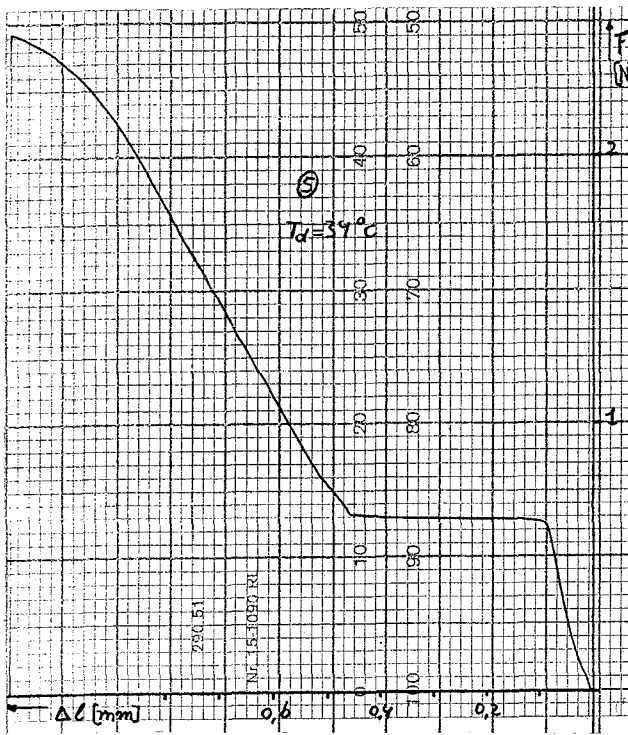
In deze tabel zijn de meetwaarden weergegeven van de metingen ter bepaling van de hysteresis die optreedt als de lengte van de draad tegen de temperatuur wordt uitgezet.

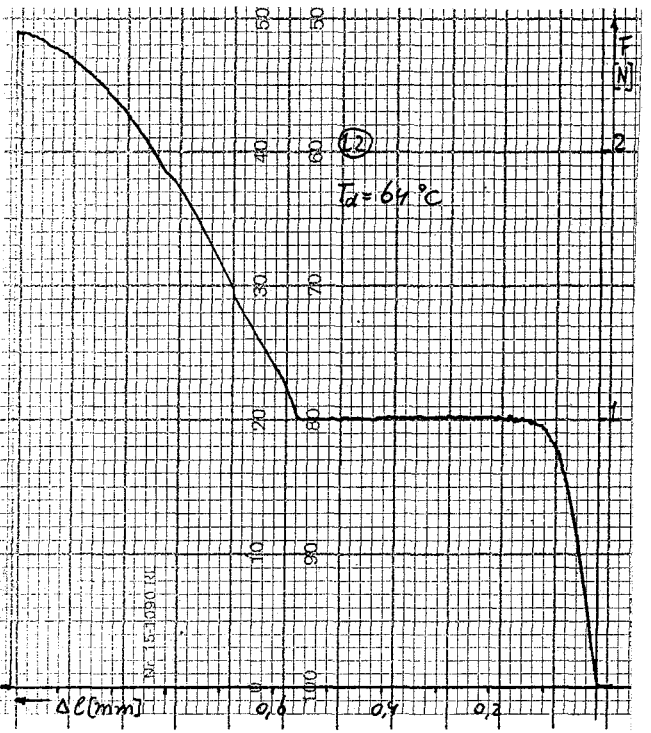
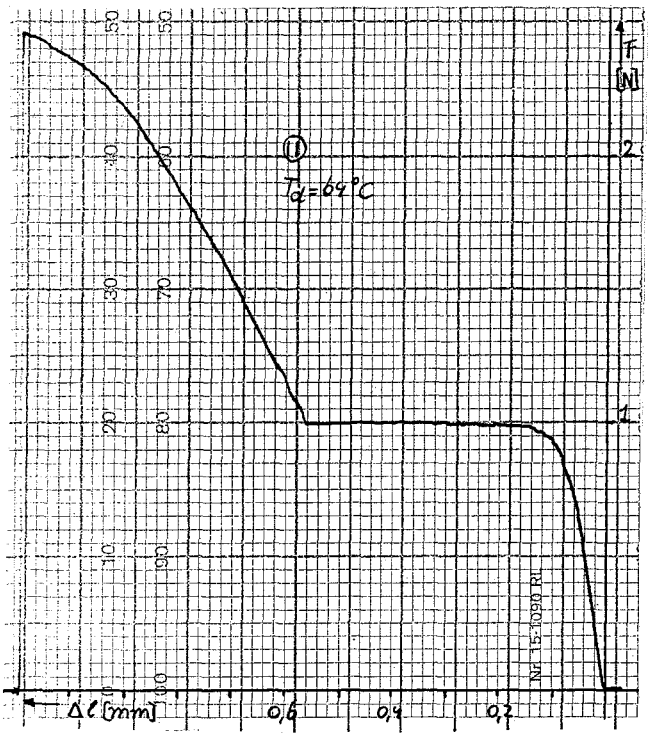
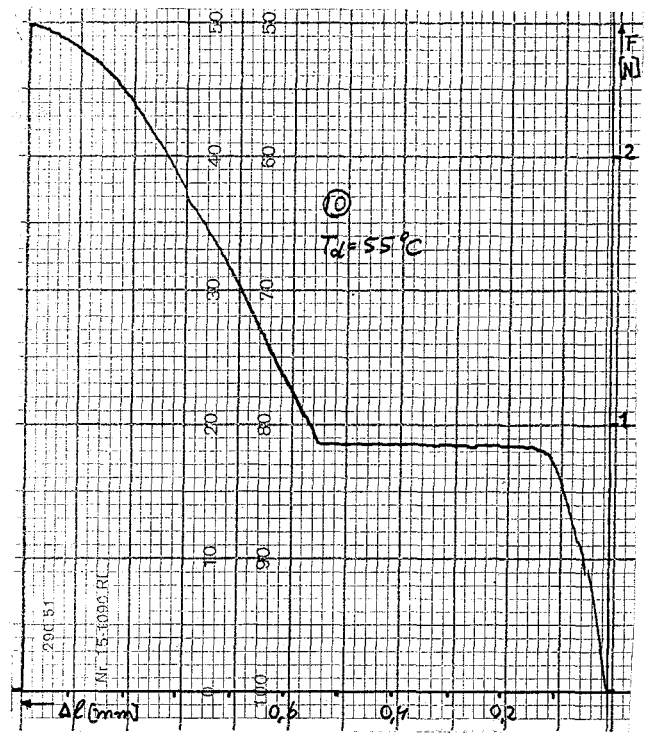
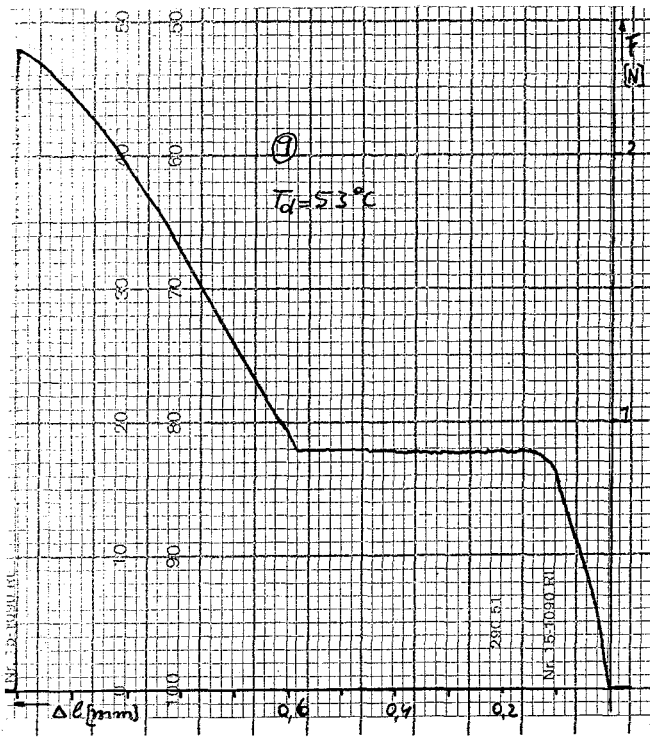
Temperatuur stijgt				Temperatuur daalt			
V [V]	I [mA]	l [mm]	P [W]	V [V]	I [mA]	l [mm]	P [W]
3,00	19	296	0,06	2,93	18	296	0,05
4,00	24	296	0,10	4,00	25	296	0,10
4,99	30	296	0,15	5,01	31	296	0,16
6,03	36	296	0,22	5,89	36	296	0,21
7,00	42	296	0,29	5,89	39	287	0,23
8,02	48	296	0,38	6,07	40	285,5	0,24
9,00	54	295,5	0,49	6,99	48	284,5	0,34
9,42	56	295	0,53	7,41	52	284,5	0,39
10,00	60	295	0,60	7,73	55	284,5	0,43
10,70	64	294,5	0,68	8,00	58	284	0,46
11,01	66	294,5	0,73	8,21	60	284	0,49
11,33	89	283,5	1,01	9,00	72	283,5	0,65
12,02	95	283,5	1,14	10,02	80	283,5	0,80
13,00	102	283,5	1,33	10,94	87	283,5	0,95
				11,98	95	283,5	1,14
				12,98	102	283,5	1,32

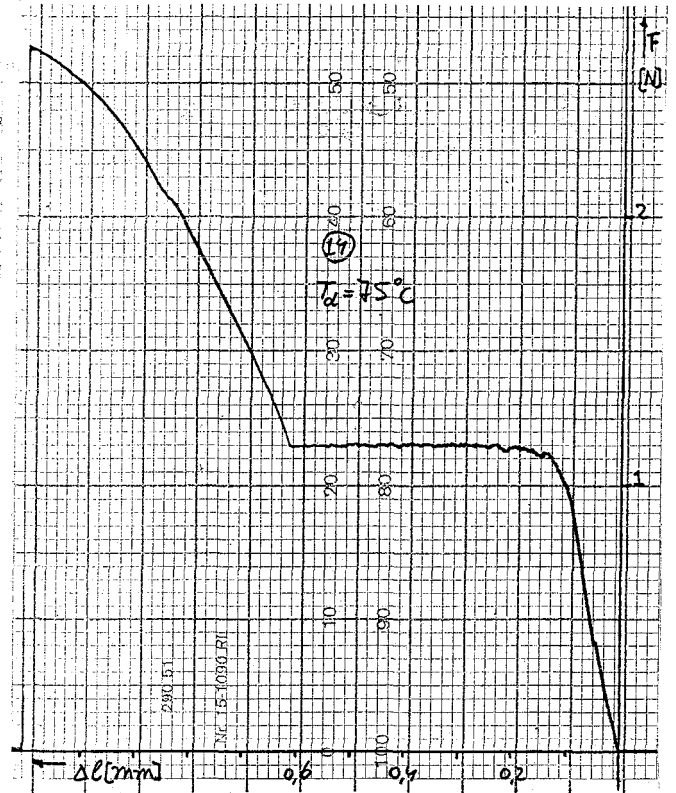
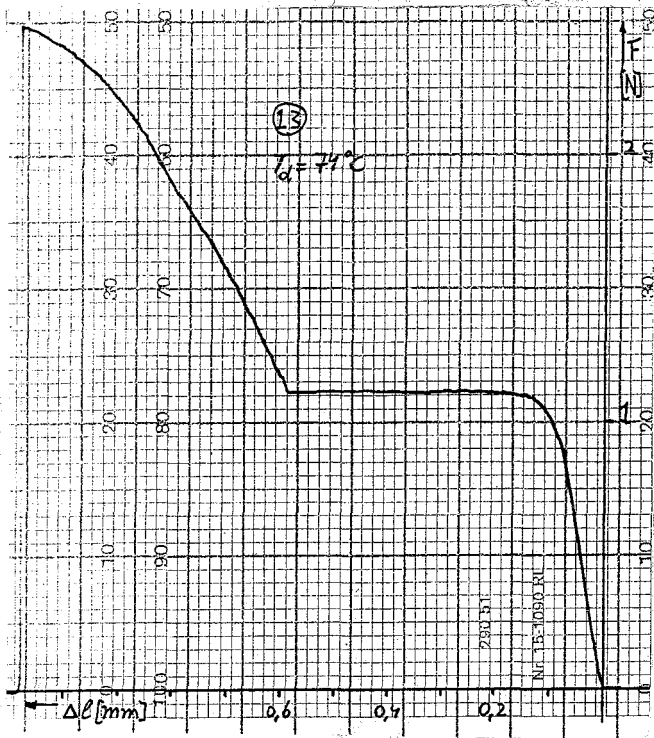
Bijlage 5: De trekkrommen

In deze bijlage zijn alle trekkrommen weergegeven die gebruikt zijn bij de bepaling van enkele karakteristieke variabelen van NiTi. De waarde van T_d die bij iedere kromme is weergegeven duidt op de temperatuur waarbij de deformatie heeft plaatsgevonden.









Bijlage 6: Karakteristieke variabelen uit de trekproeven

In deze tabel staan de karakteristieke variabelen die uit de trekkrommen van bijlage 5 zijn bepaald.

De beginlengte van iedere draad is 80 mm.

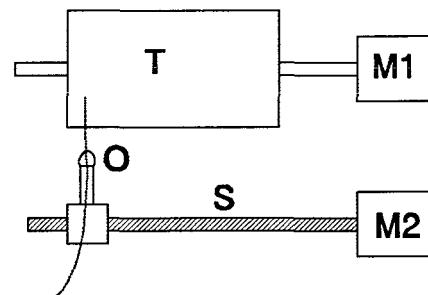
proefstuk	T [°C]	E [kN/mm ²]	ϵ_{breuk} %	σ_{breuk} [kN/mm ²]	σ_{plateau} [N/mm ²]	l_{plateau} [mm]
1	24	21,6	13,8	1,24	270	2,8
2	24	22,6	13,4	1,20	255	2,9
3	30	24,4	13,9	1,22	306	3,1
4	30	24,4	13,3	1,21	306	3,2
5	34	29,4	13,4	1,25	331	3,6
6	34	28,1	13,0	1,19	316	3,7
7	45	27,8	13,0	1,30	418	3,8
8	45	30,6	12,9	1,31	423	4,0
9	53	32,7	13,8	1,23	459	4,4
10	55	36,0	13,6	1,28	469	4,1
11	64	43,4	13,6	1,25	510	4,3
12	64	45,9	13,6	1,25	510	4,4
13	74	52,5	13,5	1,28	571	4,6
14	75	40,8	13,9	1,33	587	4,5

Bijlage 7: beschrijving van het inbedden in latex

De latex vliezen met daarin de NiTi-draden worden met behulp van een machine gemaakt die in figuur 21 schematisch is weergegeven. Deze machine bevindt zich in het lab voor biomedische techniek.

De trommel T moet eerst goed worden ontvet met water en zeep, omdat anders de latex niet aan de trommel hecht.

De ronddraaiende trommel T wordt aangedreven door motor M1. Op de trommel wordt latex aangebracht. De trommel moet langzaam ronddraaien, zodat het latex mooi



Figuur 21: De opstelling, met daarin: T=trommel, S=spindel, O=oog, M1=motor1 en M2=motor2.

over het gehele oppervlak van de trommel wordt verdeeld. De trommel moet rond blijven draaien totdat de latex opgedroogd is.

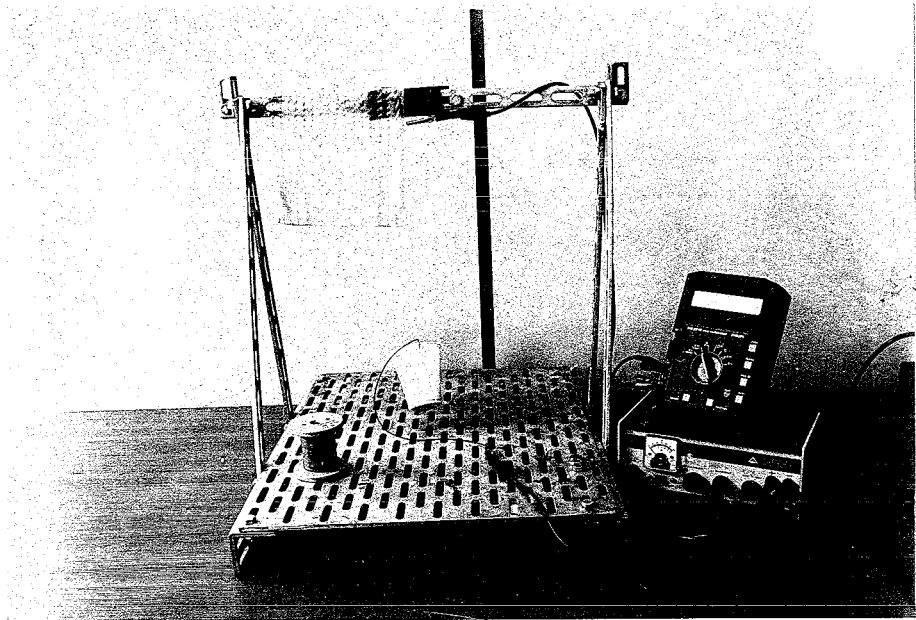
Er moet ook een stuk van de draad zijn dat gebruikt kan worden voor de bevestiging in een constructie of voor de aansluiting van een stroombron. Daarvoor wordt een stuk van de trommel afgeplakt met tape.

Daarna wordt de draad (die van tevoren $\pm 5\%$ gerekt is) via oog O op de trommel bevestigd. De NiTi-draad wordt dan door middel van spindel S die door motor M2 wordt aangedreven over de draaiende trommel gewikkeld. De afstelling tussen motor M1 en motor M2 moet zodanig zijn dat de afstand tussen de draden naar wens is.

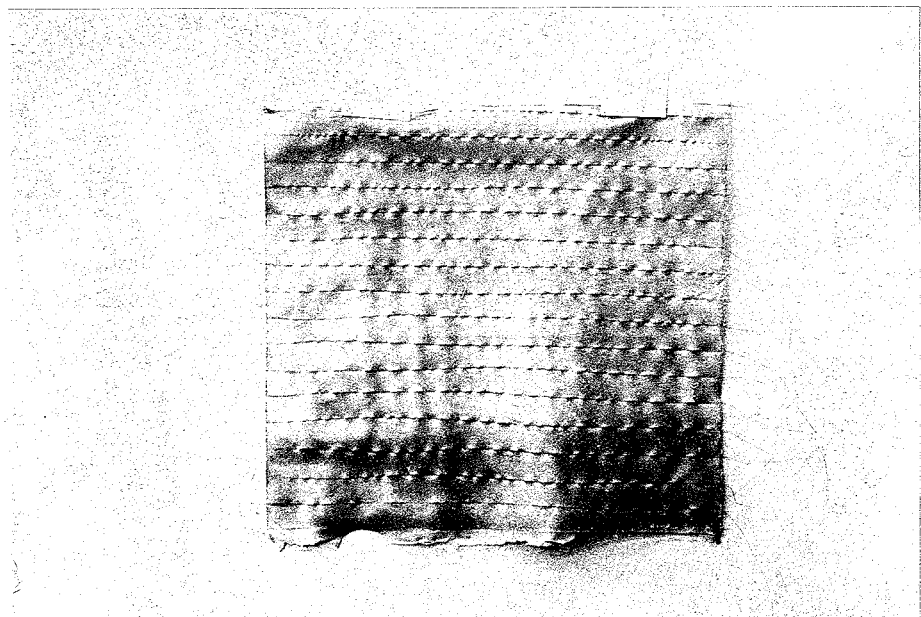
Er wordt dan op dezelfde plaats als hiervoor tape geplakt, zodat de draad op die plaatsen vrij is van de latex.

Daarna wordt er weer latex op de draaiende trommel aangebracht. Als deze laag latex gedroogd is, wordt het gehele vlies in het midden van de tape doorgesneden. De eerste laag tape wordt verwijderd en het latex vlies wordt van de trommel gehaald. Bij het verwijderen van het latex vlies moet er talkpoeder op het vlies worden gestrooid, zodat het niet overal aan vast plakt.

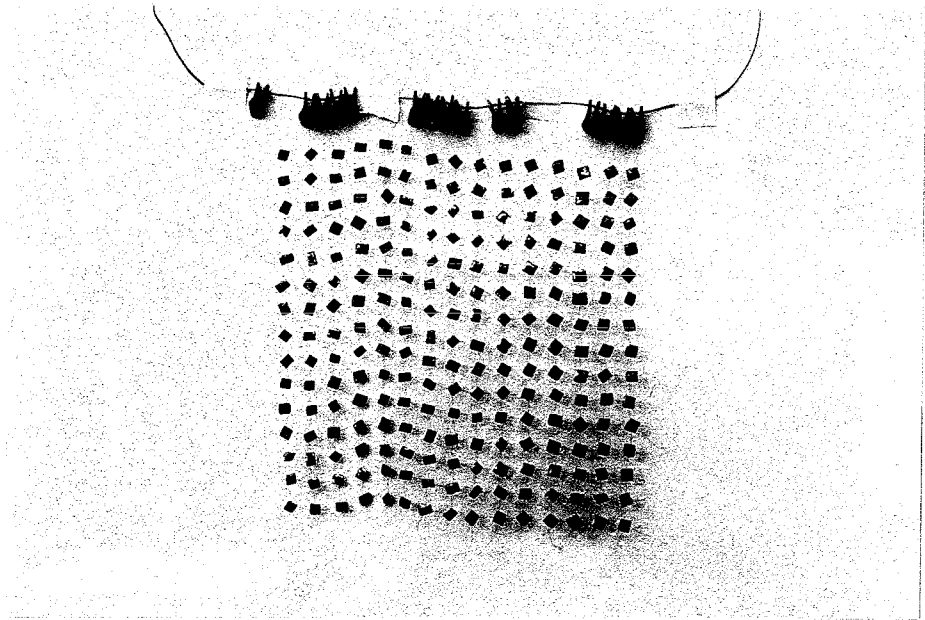
Bijlage 8: Foto's



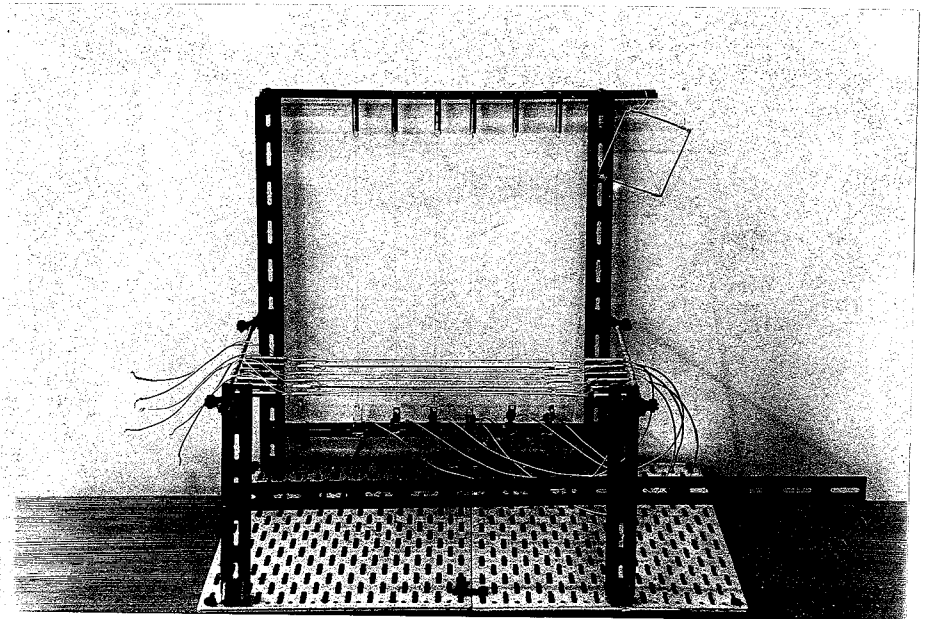
Figuur 22: In deze figuur is de opstelling te zien waarmee de metingen voor de bepaling van het transitiepunt en de hysteresis zijn gedaan. Het witte bekertje is de massa "m", de draad waaraan hij hangt is niet zichtbaar.



Figuur 23: In deze figuur is het latex vlies te zien met daarin de NiTi-draad. Op de foto is te zien dat de draden gegolfd in het vlies liggen.



Figuur 24: In deze figuur is de matrix van draden te zien. De zwarte punten zijn de knooppunten waar de draden aan elkaar zijn gelijmd.



Figuur 25: In deze figuur zien we op de achtergrond de veertjes waarmee de NiTi-draad is verbonden om puntvervorming te realiseren. Rechts aan de constructie is het vierkant opgehangen. Op de voorgrond zijn enkele buigende staven te zien.

Geraadpleegde literatuur

- Besselink P.A., Geheugenmetaal: eigenschappen en toepassingen. In: de constructeur, 8, (aug 1987).
- Besselink P.A., Het gebruik van geheugenmetaal in werktuigbouwkundige constructies. Bron onbekend.
- Cross W.B., Nitinol characterization study. Goodyear aerospace corporation, 1969.
- Funakubo H., Precision machinery and robotics, Shape memory alloys. University of Tokyo, 1987.
- Gieck K., Technische formules. 1983, 4e herziene druk.
- Hoffmann K., Niezgodka M., Mathematical models of dynamical martensitic transformations in shape memory alloys. In: Journal of intelligent material systems and structures, july 1990.
- Krishnan R.V., Delaey L., Tas H. Warlimont H., Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. In: Journal of material science, 1974, pag 1521-1545.
- Onbekend, Intelligente materialen, materiaalsystemen en -constructies. In: Technieus Washington, 1, (1991).
- Rogers C.A., Barker D.K., Jaeger C.A., Smart materials, structures, and mathematical issues, Introduction to smart materials and structures. Technomic, 1989.
- Rogers C.A., Liang C., Barker D.K., Smart materials, structures, and mathematical issues, Dynamic control concepts using shape memory alloy reinforced plates. Technomic, 1989.
- Schuerch H.U., Certain physical properties and applications of nitinol. Astro research corporation, 1968.