

# Het gebruik van geheugenmetaal in werktuigbouwkundige constructies\*

Ir. P.A. Besselink,

Afdeling Werktuigbouwkunde/Materiaalkunde, Technische Hogeschool Twente

## Inleiding

Allereerst zullen in het kort de belangrijkste eigenschappen van geheugenmetalen worden behandeld, waarna verder wordt ingegaan op enige toepassingsgebieden waarvan ook voorbeelden worden gegeven.

## Eigenschappen van geheugenmetalen

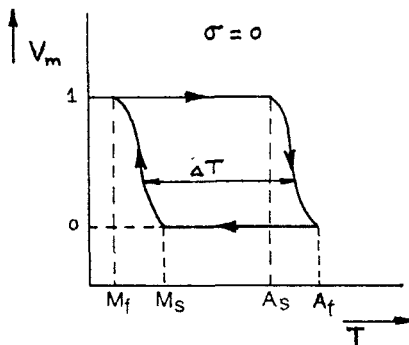
Met het vormherstelgedrag of Shape Memory Effect (SME) wordt hierbij bedoeld de eigenschap van bepaalde legeringen (en van sommige kunststoffen, waarop hier echter niet wordt ingegaan) om na een bepaalde schijnbaar plastische deformatie bij een relatief lage temperatuur door temperatuurverhoging al dan niet volledig in de uitgangstoestand terug te keren, door middel van een reversibele thermo-elastische martensitische transformatie.

Deze transformatie kan op verschillende manieren optreden. Bij een bepaalde temperatuurverlaging tot beneden de transformatietemperatuur wordt temperatuur-geïnduceerd martensiet (TIM) gevormd.

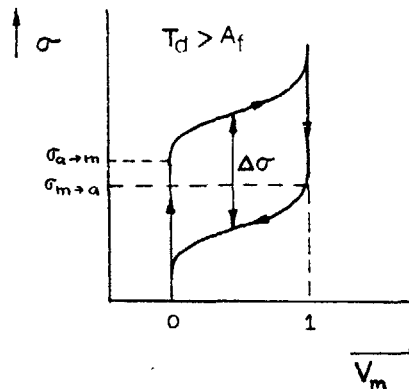
Bij deze transformatie is sprake van een temperatuurhysterese van slechts 20-30°C. In figuur 1 is te zien hoe de volumefractie martensiet ( $V_m$ ) afhankelijk is van de temperatuur.

Bij opwarmen van een volledig martensitische structuur zal over traject  $A_s - A_f$  de transformatie plaatsvinden naar austeniet,  $A_s$  en  $A_f$  is "start" resp "finish" van de austenietvorming. Bij afkoelen zal op traject  $M_s - M_f$  de martensietvorming plaatsvinden.

Martensiet kan ook zonder temperatuurverlaging gevormd worden, zoals in figuur 2 te zien is. Vanuit een austenitische structuur, deformatietemperatuur  $T_d > A_f$ , zal bij een bepaalde uitwendige kritische spanning  $\sigma_{a \rightarrow m}$  een spanningsgeïnduceerde transformatie plaatsvinden en zal worden gevormd (SIM). Ook hierbij zal bij ontlasten een bepaalde spanningshysterese  $\Delta\sigma$  optreden voordat de reversibele transformatie plaatsvindt.



Figuur 1 Vorming van temperatuur-geïnduceerd martensiet (TIM)

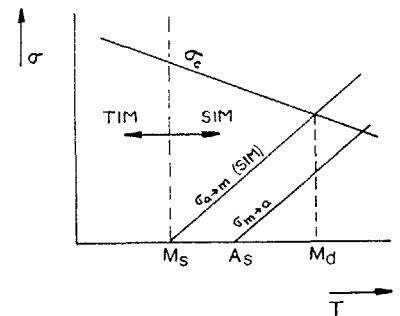


Figuur 2 Vorming van spanningsgeïnduceerd martensiet (SIM)

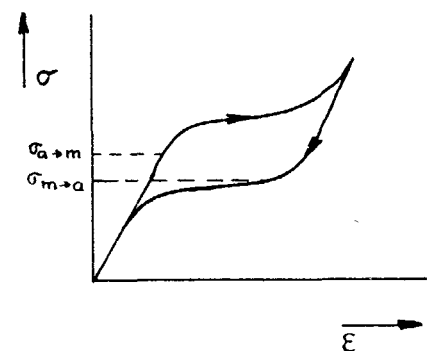
De hoogte van  $\sigma_{a \rightarrow m}$  blijkt ongeveer lineair afhankelijk te zijn van de temperatuur, zoals in figuur 3 te zien is. In deze figuur is  $\sigma_c$  (permanente deformatie) de maximaal toelaatbare spanning. De gebieden waarin SIM en TIM te verwachten zijn worden ook aangegeven. Verder geeft  $M_d$  de maximumtemperatuur aan, waarbij zonder plastische deformatie nog SIM kan worden gevormd, dit is het snijpunt van de lijnen  $\sigma_c$  (permanente deformatie) en  $\sigma_{a \rightarrow m}$  (SIM).

Nu kunnen de invloeden van deze transformaties op de mechanische eigenschappen verder worden verklaard. In figuur 4 wordt een trek-reekromme weergegeven bij een deformatietemperatuur  $T_d$ , die boven  $A_f$  ligt. Aangezien het

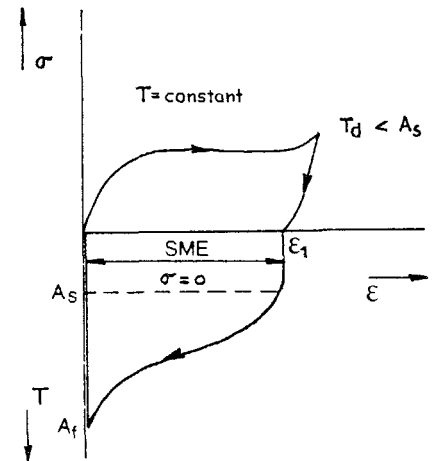
verloop van de trek-reekromme niet lineair is, maar wel volledig elastisch, wordt hiervoor de term "pseudo-elastischeit" (PE) gebruikt. Hiervoor bestaan diverse toepassingen waarover verderop in dit artikel meer. Wordt een trekproef uitgevoerd bij  $T_d < A_s$ , dan zal er een schijnbaar plastische deformatie  $\epsilon_1$ , overblijven na ontlasten, die echter bij opwarmen ( $A_s - A_f$ ) volledig teniet wordt gedaan.



Figuur 3 De temperatuursafhankelijkheid van  $\sigma_c$  (SIM)



Figuur 4 Trek-reekromme met pseudo-elastischeit (PE)



Figuur 5 Trek-reekromme met een wegeffect (SME)

\* Voordracht gehouden op de Leergang Vormgeheugenmetalen, georganiseerd op 14 oktober 1985 door het Mikrocen-trum Nederland

Dit is het éénwegeffect (SME), waarbij een opvolgende afkoeling verder geen vervorming teweeg brengt. Hierbij kunnen voor b.v. NiTi deformaties van maximaal 8% volledig hersteld worden.

Dit is duidelijk anders bij het tweeweg-effect of reversibel SME (RSME), dat in figuur 6 staat aangegeven. Hier is de aangelegde belasting zo groot dat er enige plastische deformatie optreedt, bijvoorbeeld door buiging, waarbij de uiterste vezels "overstrekt" worden en dus niet meer volledig in de uitgangsvorm kunnen terugkeren. De delen, die niet plastisch vervormd, zijn zullen dan op het traject  $A_s-A_f$  volledig willen terugkeren in de uitgangstoestand, zoals in figuur 5 is getoond, terwijl de plastisch vervormde delen dit volledig herstel tegenhouden. Het gevolg is dat er een blijvende deformatie  $\epsilon_{irreversibel}$  zal zijn, hetgeen gepaard gaat met inwendige spanningen tengevolge van de interactie van de gebieden waar al dan niet volledig herstel zal willen optreden.

Wordt vervolgens afgekoeld, dan zal dit restspanningspatroon ervoor zorgen dat op het traject  $M_s-M_f$  de voorheen plastisch vervormde delen de nu gemakkelijker vervormbare delen – dit door de lagere temperatuur – in de richting van de oude primaire vervorming dwingen.

Nu is er dus een situatie ontstaan waarbij een geheugenelement tengevolge van temperatuurwisselingen spontaan twee verschillende vormen aanneemt, hetgeen daarna onbeperkt herhaalbaar is. Vandaar de term "reversibel SME".

Tenslotte dient de vormherstelspanning  $\sigma_{rec}$  (recovery stress) vermeld te worden; zie figuur 7. Wanneer een martensitisch geheugenelement vervormd wordt, zoals in figuur 5 ( $T_d < M_f$ ) en vervolgens ontlast, dan zal, wanneer het element niet de gelegenheid krijgt om door middel van SME in de uitgangsvorm terug te keren, bij opwarmen tot boven  $A_f$  het volgende gebeuren. Zodra de terugtransformatie begint (bij  $A_s$ ) wordt een spanning  $\sigma_{rec}$  opgebouwd, die afhankelijk is van de vervorming en de temperatuur. Deze spanning is hoger naarmate de rek en de temperatuur toenemen, totdat een maximumwaarde wordt bereikt, het optimum ligt bij circa 8% rek en  $T \gg A_f$  voor NiTi. Bij het ontlasten op hoge temperatuur ligt de teruggaande curve op een hoger niveau dan de heengaande, dus wordt er arbeid geleverd door het geheugenelement!

Samenvattend kunnen de figuren 3 t/m 7 in één overzichtsfiguur, figuur 8, worden weergegeven, waarin ook staat ver-

meld over welk gebied het PE- respectievelijk het SME-effect te verwachten is. Ondanks zijn complexiteit geeft figuur 8 toch een grove indicatie van de mogelijkheden van geheugenmetalen en geeft hij tevens aan hoe de afzonderlijke figuren geïnterpreteerd dienen te worden. Let hierbij op de richting van de temperatuur.

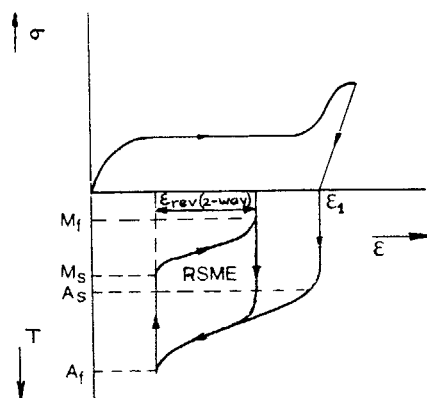
## Toepassingen van geheugenmetalen

### Inleiding

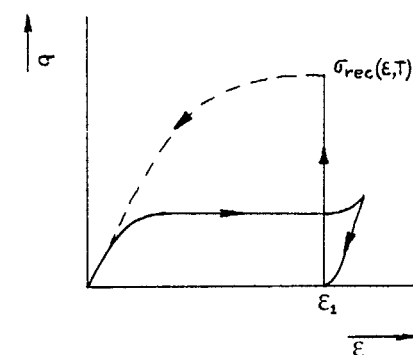
In het verleden zijn al diverse toepassingen voor geheugenmetalen bedacht, maar tot op heden zijn er

hiervan slechts weinig werkelijk in gebruik genomen. Naast de onbekendheid van potentiële gebruikers met de materie kan dit ondermeer geweten worden aan de moeilijkheden die in het verleden ondervonden zijn om geheugenmateriaal met de gewenste, gespecificeerde en ook reproduceerbare eigenschappen te maken.

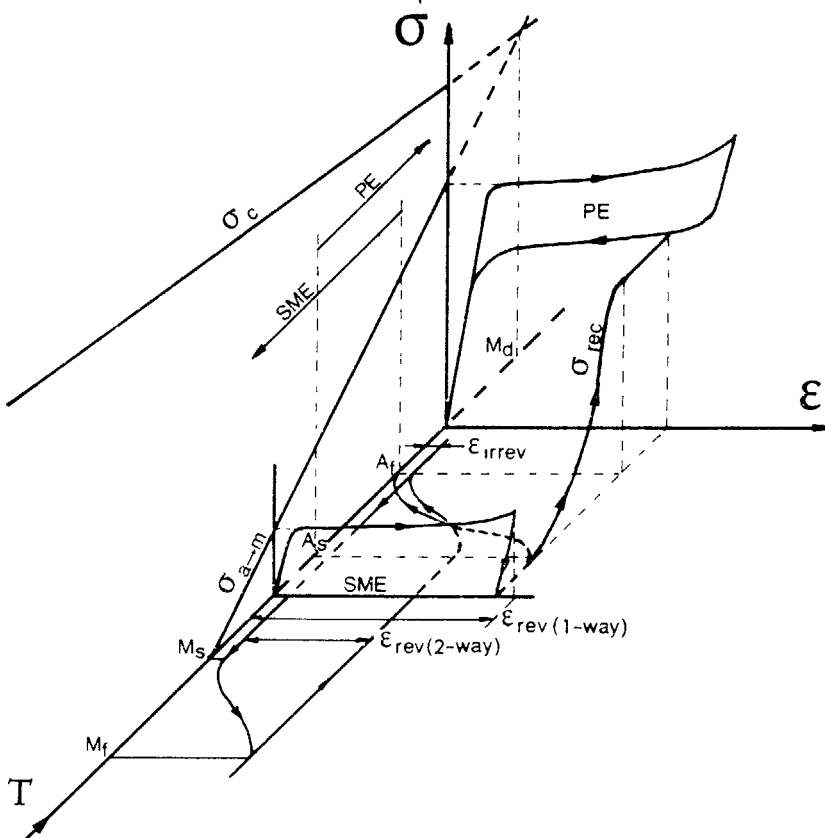
Door verschillende onderzoekers wordt reeds vele jaren naarstig getracht de eigenschappen van geheugenmetalen beter te beheersen en te verbeteren, hetgeen tot dusver geleid heeft tot drie legeringen waarnaar de meeste belangstelling uitgaat. Dit zijn CuZnAl, CuAlNi en NiTi.



Figuur 6 Trek-rekdiagram met tweeweg-effect (RSME)



Figuur 7 Vormherstelspanning bij tegenhouden van SME



Figuur 8 Totaaloverzicht (let op de richting van de temperatuur)

Ook in Nederland wordt al vanaf 1968 onderzoek verricht aan NiTi-geheugenmetaal, en wel op de TH-Twente binnen de leerstoel Materiaalkunde van de afdeling Werktuigbouwkunde, waar kennis is opgebouwd die varieert van een brede fundamentele basis en de meer technologische aspecten zoals productie en bewerken van NiTi, tot het ontwikkelen van toepassingen.

Van de reeds bekende toepassingen zal hier een aantal voorbeelden worden gegeven.

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen algemeen technische en medische toepassingen. Achtereenvolgens komen aan de orde.

- Algemene techniek
  - thermische sensoren en actuatoren,
  - energieconversie,
  - enkele voorbeelden van technische toepassingen van SME
- Medische toepassingen

## Algemene techniek

### 1. Thermische sensoren en actuatoren

Wanneer gebruik wordt gemaakt van het SME in een regelsysteem kan met één enkel element zowel de functie van sensor als actuator worden gecombineerd. Zodra in een vervormd SME-element het transformatietraject  $A_s - A_f$  wordt bereikt, zal het element willen terugkeren naar zijn uitgangsvorm en dus het registreren van de temperatuurverandering ogenblikkelijk laten volgen door een actie.

Bij dergelijke systemen zal ook bij het afkoelen na een bepaalde temperatuurhysterese een actie moeten volgen. Hiervoor zou het RSME kunnen dienen, maar aangezien het reversibel geheugen veel kleiner is dan het éénwegeffect gaat de voorkeur uit naar een systeem met een tegenwerkende veer, die het geheugenelement vervormt zodra dit in het traject  $M_s - M_f$  zijn "zachte" structuur krijgt. Verder biedt het werken met een tegenveer de mogelijkheid de werkingstemperatuur van het systeem in te stellen, aangezien de transformatietemperaturen verschuiven naar hogere waarden naarmate de belasting toeneemt.

Hierdoor is het mogelijk bijvoorbeeld in een klepregelsysteem de sluitkracht van een klep tegen de zitting met de tegenwerkende veer te kiezen en tevens zowel de openings- als de sluittemperatuur in te stellen, alsmede de klepverplaatsing te sturen.

### 2 Energieconversie

Wanneer een vormgeheugenelement in martensitische toestand verkeert kan met een betrekkelijk geringe belasting een grote vervorming worden bereikt, bijvoorbeeld 8% rek bij 200 MPa (200 N/mm<sup>2</sup>). Wordt daarna de temperatuur verhoogd tot boven  $A_f(\sigma)$  - die voor belaste toestand hoger is dan voor onbelaste toestand - terwijl de rek gelijk wordt gehouden, dan zal een grote vormherstelspanning  $\sigma_{rec}$  worden opgebouwd, zie figuur 7 en overzichtsfiguur 8, waarbij spanningen tot 800 MPa kunnen optreden.

Het is dus mogelijk om een extra last aan te brengen, die bij het opwarmen verplaatst wordt, wanneer de vervorming teniet wordt gedaan door het geheugeneffect. De arbeid, die op zo'n extra last wordt verricht, bedraagt bij NiTi circa 1 N.m/gram per cyclus. De cyclustijd geeft dan het bereikbare vermogen.

Aangezien het verplaatsen van een koud en een warm medium meestal traag verloopt, gaat de voorkeur uit naar systemen, waarbij een NiTi-element, bijvoorbeeld een eindloze draad, van het ene medium naar het andere wordt gebracht. Zo werd in samenwerking met ECN Petten een motor gebouwd, waarin een eindloze gelaste NiTi-strip over vier schijven wordt geleid, waarbij koud en warm water in evenwijdige "troggen" voor het noodzakelijke temperatuurverschil zorgen.

Deze motor bleek uitstekend te werken, maar er waren problemen met de las, waarvan de eigenschappen niet optimaal bleken te zijn. Dit heeft ertoe geleid dat nu naar een alternatief ontwerp wordt gezocht. Ook wordt op dit moment op de THT in een afstudeeropdracht onderzocht in hoeverre het mogelijk is om de structuur van de NiTi-las te verbeteren door het optimaliseren van het stuiklasproces en het geven van een geschikte nabehandeling. Dit heeft reeds geleid tot een sterkte van de las, die op circa 95% van de treksterkte van het moedermateriaal ligt. Ook is het vormherstel van de las na 8% deformatie volledig. Helaas is met name de reproduceerbaarheid van dit proces nog niet bevredigend.

### 3. Enkele voorbeelden van technische toepassingen van SME

- Het uitklappen van parabolantennes in ruimtevaartuigen.
- Manipulatoren voor het verrichten van handelingen op moeilijk bereikbare plaatsen, zoals bij nucleaire processen of in de vacuümtechniek
- Thermisch geactiveerde schakelaars, kleppen, sprinklersystemen

- Temperatuurvoelers en thermisch geactiveerde penhouders voor temperatuurmeters en -recorders
- Automatische choke en sproeiers met variabele diameter (afhankelijk van de brandstoftemperatuur) voor automotoren.
- Klein gereedschap voor bijzondere toepassingen
- Automatische zonwering of raampenopeners voor broeikasen.
- Speelgoed (het theelepeltje e.d.).
- Koffiezetter met geregelde waterdoorlaat
- Lasloze verbindingen, zoals pijpmoffen en elektrische contacten.
- Bevestigingstechnieken, zoals keilbouten, splitpennen en klauwpennen.
- Elementen in remcircuits voor het activeren van noodstopsystemen.
- Automatische koppeling in een ventilatoraanrijving, bijvoorbeeld in auto's.
- Radiatorkleppen.
- Blinde pluggen voor het afdichten van bijvoorbeeld kapotte gas- en waterleidingen
- Robotarmen en -handen

## Toepassingen van NiTi als biomedisch materiaal

De mogelijkheid bestaat om NiTi als een implantaat te gebruiken. Een paar eigenschappen, waaraan een implantaat moet voldoen zijn onder meer.

- Biocompatibiliteit; het mag geen allergische, toxische of carcinogene reacties veroorzaken.
- Niet bio-degeneratief; er mag geen achteruitgang in mechanische, fysieke of chemische eigenschappen in het weefselmilieu optreden.
- Functioneel; het implantaat moet gedurende een vastgestelde tijd de vereiste functies kunnen verrichten.
- Steriliseerbaar; zonder achteruitgang van de eigenschappen moet het implantaat te steriliseren zijn.
- Produceerbaar en acceptabel tegen aannemelijke kosten

In principe is NiTi geschikt voor medisch gebruik aangezien het aan alle bovenstaande voorwaarden voldoet, zij het dat de prijs erg hoog ligt. Dit komt dan door het moeilijke productieproces. Dit is echter voor bepaalde medische toepassingen geen onoverkomelijk probleem, mits een verbetering bereikt wordt ten opzichte van bestaande technieken

Enkele voorbeelden van medisch gebruik van geheugenmetalen zijn:

- Gebitsbeugels met een groter werkzaam gebied dan roestvast staal.

- Hierbij wordt gebruik gemaakt van het PE-effect
- Revalidatiehandschoen voor het reactiveren van functioneel verminderd actieve spiergroepen; ook voor toepassingen in pols-, elleboog-, schouder-, enkel- en kniegewrichten
  - Anticonceptiespiraal, die na inbrenging door de lichaamstemperatuur een functionele vorm aanneemt.
  - Filters voor het tegenhouden in bloedvaten van bloedstolsels; deze kunnen als rechte draad met behulp van een catheter ingebracht worden, waarna het op de gebruiksplaats een filtervorm aanneemt
  - Clips voor het afklemmen van zwakke aders.
  - Een "kunstspier", die met behulp van een elektrische stroom wordt geactiveerd.
  - Fixatie bij botbreuken.
  - Fixatiepen voor het bevestigen van prothesen aan bot.
- Kunstmatige verlengingsinrichting voor "meegroeiende prothese" (bij kinderen).
  - Vervanging van het kraakbeen van de heupkop, zelfklemmend door de bolvorm.
  - Harringtonstaaf voor het corrigeren van een door scoliose vergroeiende wervelkolom.
  - Spandraad bij de scoliose-operatie volgens Dwyer, deze methode berust op trek in plaats van buiging.
  - Tijdelijk inklapbare fixatie-elementen voor intra-oculaire lenzen
  - Afsluitfuncties door middel van kleppen of klemmen

#### Nawoord

Van de toepassingen die genoemd zijn en waar er nog veel aan zouden kunnen worden toegevoegd kunnen er reeds vele gerealiseerd worden mits er be-

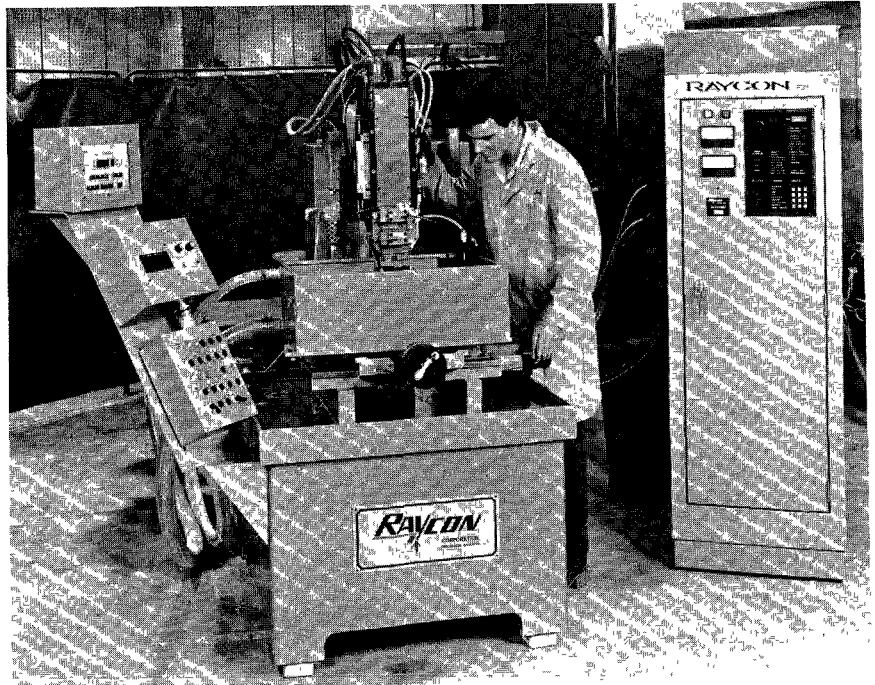
langstelling van de potentiële gebruikers bestaat. De algemeen technische toepassingen lijken daarbij het best op korte termijn ontwikkeld te kunnen worden. Voor het medische vlak zal de aanlooptijd langer zijn gezien de traagheid van die markt, mede door de langdurige test die ieder produkt moet doorlopen voordat het goedgekeurd wordt.

Voor beide gebieden geldt echter dat belangstellenden terecht kunnen op de TH-Twente waar de intentie bestaat om ook de Nederlandse industrie zover te krijgen gebruik te gaan maken van de grote mogelijkheden van geheugenmetalen. Vooruitlopend op deze ontwikkelingen is reeds de firma Memory Metal Holland opgericht die de ontwikkeling en productie van toepassingen van geheugenmetalen zal gaan verzorgen, al dan niet gezamenlijk met de afnemers en zo nodig met ondersteuning vanuit de TH-Twente.

## Raycon Corporation

Het Raycon programma omvat de volgende drie hoofdgroepen.

- 1) een uitgebreid assortiment EDM-systemen voor de meest uiteenlopende applicaties. Naast standaardsystemen kan tevens aan speciale wensen tegemoet worden gekomen. Zo kunnen bestaande systemen van elk willekeurig fabrikaat en elke leeftijd op eenvoudige wijze worden aangepast waardoor zij niet alleen technisch doch ook economisch vernieuwd zijn. Raycon levert niet alleen de hardware, de software vormt een even belangrijk onderdeel van de leverantie.
- 2) Lasersystemen welke voortgevloeid zijn uit het EDM-programma voor het snijden van eenvoudige tot zeer complexe vormen in metalen en niet metalen, het boren van minuscuul kleine gaatjes in allerhande metaal en keramische materialen, vooral waar hoge vermogens vereist zijn en voorts voor speciale lastoepassingen.



- 3) Systemen voor het contactloos meten en inspecteren van precisiewerkstukken welke conventioneel

niet tot nauwelijks zijn te beoordelen. Deze systemen werken volgens het optische principe.