



We are Nitinol.™

**NiTi Formgedächtnislegierungen - Intelligente Werkstoffe fuer moderne
Problemlösungen**

Stoeckel

VDI Berichte Nr. 797
pp. 203-216

1990

NiTi-Formgedächtnislegierungen – Intelligente Werkstoffe für moderne Problemlösungen

D. Stöckel

Zusammenfassung

Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen können sich nach einer Verformung bei Erwärmung an ihre ursprüngliche Gestalt erinnern. Dieser Effekt ist das Ergebnis einer thermoelastischen, martensitischen Umwandlung. Die Umwandlungstemperatur kann im Bereich von -100°C und $+100^{\circ}\text{C}$ eingestellt werden. Die Legierungen sind im martensitischen Zustand sehr weich und gut verformbar, im austenitischen Zustand jedoch hochfest. Dieser Festigkeitsunterschied ist die Grundlage einer Vielzahl technischer Anwendungen, die in vier Kategorien eingeteilt werden können: freies Formgedächtnis, unterdrücktes Formgedächtnis, Arbeitsverrichtung und Superelastizität.

1. Einleitung

Seit über 20 Jahren tragen Formgedächtnis- (Shape-Memory) Legierungen zu interessanten und kreativen Lösungen technischer Probleme bei. Eine nennenswerte Verbreitung haben diese intelligenten Werkstoffe jedoch erst seit kurzem gefunden, nämlich seit die Herstellungstechnik verstanden und der internationale Erfahrungsaustausch offener geführt wird. Der Markt für Bauteile aus Formgedächtnislegierungen verzeichnet derzeit ein jährliches Wachstum von über 30% und umfaßt alle Bereiche der modernen Industrie. Es sind heute Anwendungen bekannt, die von der Raumfahrttechnik und Elektronik über Medizin- und Feinwerktechnik bis zu Damenunterwäsche und Spielwaren reichen.

Wird eine Formgedächtnislegierung bei Temperaturen unterhalb einer bestimmten "Schalttemperatur" bis zu einem bestimmten Grad bleibend verformt, so kann sie sich bei Erwärmung über diese "Schalttemperatur" an ihre ursprüngliche Gestalt erinnern und diese wieder annehmen. Dieser außergewöhnliche Effekt, der in der technischen Berichterstattung häufig als Kuriosität angesehen wird, wurde zu Beginn der fünfziger Jahre als Ergebnis einer martensitischen Umwandlung im System Gold-Kadmium erkannt [1]. Inzwischen wurde der Formgedächtniseffekt in mehreren Legierungssystemen entdeckt, wobei die Nickel-Titan-Legierungen die heute technisch bedeutsamsten Formgedächtnislegierungen sind.

2. Eigenschaften von Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen

Die metallkundlichen Grundlagen sowie die Voraussetzungen für das Auftreten des Formgedächtniseffektes wurden in der Literatur wiederholt beschrieben [2]/[3]/[4]. An dieser Stelle soll daher nur mit Bild 1 der prinzipielle Mechanismus kurz dargestellt werden. Die bei hoher Temperatur stabile kubische Phase "Austenit" wandelt bei der Abkühlung unter die Umwandlungstemperatur in "verzwillingten Martensit" um. Dieser kann durch "Entzwillingen" bis ca 8% verformt werden. Bei Erwärmung wandelt der verformte Martensit in Austenit um und die Probe findet in ihre ursprüngliche Gestalt zurück.

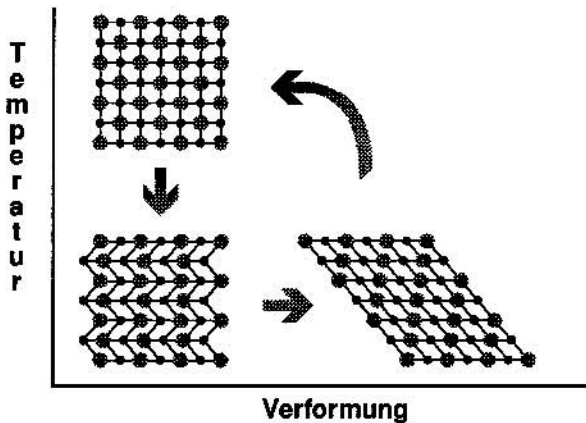


Bild 1: Mechanismus des Formgedächtniseffektes

2.1. Umwandlungstemperaturen

Wie Bild 1 zeigt sind diese beiden Phasen bei unterschiedlichen Temperaturen stabil, wobei bei der Umwandlung zwischen Hochtemperatur (Austenit)- und Niedertemperaturphase (Martensit) eine Hysterese durchlaufen wird. Diese Hysterese ist gekennzeichnet durch die für den Werkstoff typischen Temperaturen A_s (Austenit-Start), A_f (Austenit-Finish), M_s (Martensit-Start) und M_f (Martensit-Finish). Abhängig von der Zusammensetzung der Legierungen, liegen diese Temperaturen zwischen ca. -100°C und $+100^\circ\text{C}$. Die Breite der Hysterese beträgt bei binären Standard-Legierungen ca. 30 bis 50K, kann jedoch durch Legierungszusätze und thermomechanische Verfahren auf ca. 10 bis 15K verringert [5] oder bis ca. 150K erweitert werden [6]. Die für die vollständige Umwandlung von einer Phase in die andere erforderliche Temperaturdifferenz, also die Neigung der Hystereseschleife, hängt außer vom Werkstoff auch sehr stark von der Belastung des Formgedächtnisbauteiles ab und kann zwischen ca. 5K und 30K betragen.

2.2. Festigkeitsverhalten

Die beiden Phasen Austenit und Martensit zeigen vor allem im Festigkeitsverhalten charakteristische Unterschiede. Während das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits oberhalb einer Grenztemperatur M_d (die noch erläutert wird) dem konventioneller Legierungen gleicht (Bild 2a), ist das des Martensits unterhalb der M_f -Temperatur recht ungewöhnlich. Es ist gekennzeichnet durch das sogenannte Marten-

sitplateau, einen Bereich mit sehr geringer Verfestigung. Wird eine Probe im martensitischen Zustand bis maximal 8% verformt, so bleibt sie nach Entlasten im verformten Zustand (von geringer elastischer Rückfederung abgesehen). Bei Erwärmung über die Umwandlungstemperatur kann diese Verformung wieder rückgängig gemacht werden. Wird die Probe über das Martensitplateau hinaus belastet, so wird sie nach Überschreiten einer "wahren" Streckgrenze durch konventionelle Mechanismen bleibend verformt. Diese Verformung kann nicht rückgängig gemacht werden.

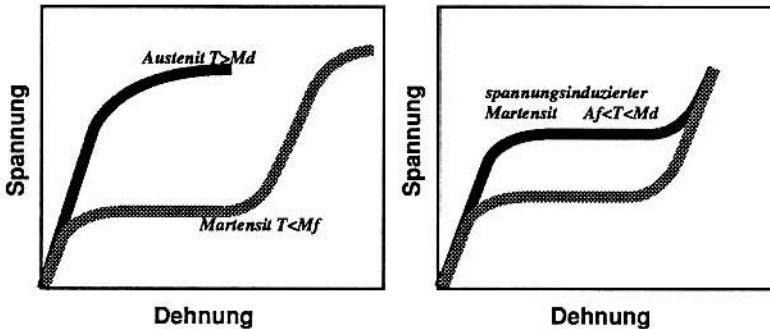


Bild 2: Verfestigungsverhalten von Ni-Ti-Legierungen bei unterschiedlichen Temperaturen

Ein interessantes Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird auch gefunden, wenn die Probe bei Temperaturen knapp oberhalb der Austenit-Finish-Temperatur belastet wird (Bild 2b). Im Temperaturbereich zwischen A_f und der bereits erwähnten Temperatur M_d findet man nämlich den sogenannten spannungsinduzierten Martensit, der nun für das Auftreten eines Martensitplateaus verantwortlich ist, obwohl der Werkstoff eigentlich austenitisch sein sollte. Die Probe kann nun wiederum bis ca 8% gedehnt werden, kehrt jedoch bei Entlastung unter Durchlaufen einer Spannungs-Hysteresese wieder in ihre Ausgangsform zurück. Da dieser Effekt eine elastische Dehnung bewirkt, die ca zehn mal größer ist als bei konventionellen Legierungen, wird er auch als Superelastizität bezeichnet (oder wissenschaftlich "Pseudoelastizität") [7].

Der ungewöhnlich große Festigkeitsunterschied zwischen Martensit (im Plateaubereich) und Austenit sowie die Superelastizität bilden die Grundlage für eine Vielzahl hochinteressanter technischer Anwendungen, von denen im folgenden einige näher beschrieben werden sollen.

3. Anwendung von Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen

Anwendungen von Formgedächtnislegierungen können in vier Kategorien eingeteilt werden [8]:

- freies Formgedächtnis
- unterdrücktes Formgedächtnis
- Arbeitsverrichtung
- Superelastizität

Diese Unterteilung erfolgt im wesentlichen nach der grundsätzlichen Funktion des Shape Memory Elementes. Sie ist jedoch auch zur Unterscheidung von Konstruktionsprinzipien nützlich.

3.1 Freies Formgedächtnis

Das freie Formgedächtnis ist der einfachste Fall der Nutzung des Shape Memory Effektes. Das Element soll hierbei nur eine Gestaltsänderung durchlaufen. Als Beispiel könnte ein Draht aus einer Nickel-Titan-Legierung dienen, der bei Raumtemperatur verformt, z.B. gebogen, und bei Erwärmung wieder gerade wird.

Die praktische Anwendung des freien Formgedächtnisses beschränkt sich im wesentlichen auf Spielzeuge und Demonstrationsobjekte. Die Weltraumantenne, die sich bei Sonneneinstrahlung aus einem Drahtknäuel entfaltet, ist zwar ein eindrucksvolles Beispiel für die Nutzung des freien Formgedächtnisses, wurde jedoch nie im Weltraum eingesetzt.

3.2 Unterdrücktes Formgedächtnis

Wird ein im martensitischen Zustand verformtes Bauteil daran gehindert, bei Erwärmung in seine ursprüngliche Gestalt zurückzukehren, spricht man von unterdrücktem Formgedächtnis. Das Bauteil kann dabei eine erhebliche Kraft entwickeln. Dieser Effekt wird technisch in großem Umfang genutzt [9]. Er kann am Beispiel eines Schrumpfringes mit Hilfe der Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Martensits und des Austenits anschaulich erläutert werden (Bild 3). Ein Ring aus NiTi wird im austenitischen Zustand z.B. durch Stanzen oder Drehen hergestellt (A). Der Innendurchmesser dieses Ringes ist kleiner als der Durchmesser der Welle oder des Schaftes, auf den der Ring aufgebracht werden soll. Anschließend wird der Ring unter die Mf-Temperatur abgekühlt, wobei keine Gestaltsänderung stattfindet (B). Im martensitischen Zustand wird der Ring aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer ist als der Durchmesser der Welle (C) und erwärmt. Bei der Rückumwandlung schrumpft der Ring zunächst frei bis er die Welle berührt (E). Die weitere Formänderung wird unterdrückt. Stattdessen wird eine Spannung aufgebaut (F).

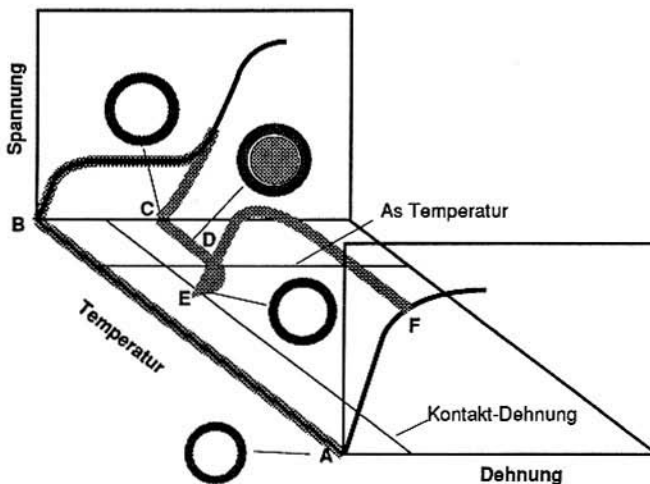


Bild 3: Unterdrücktes Formgedächtnis

3.2.1. Rohrverbindungselemente

Verbindungs- und Befestigungselemente aus Nickel-Titan-Legierungen zählen zu den ältesten und bisher erfolgreichsten Anwendungen des Shape-Memory- Effektes /10/. Seit ca 20 Jahren werden Rohrverbinder aus NiTi für Hydraulikleitungen in Druckbereichen bis 350 bar im Flugzeugbau eingesetzt. Systeme bis 550 bar sind in Entwicklung. Mehr als 1,5 Millionen derartiger Verbindungen, von denen bisher kein einziger Schadensfall gemeldet wurde, sind heute im Einsatz. Wie Bild 4 zeigt wird die hervorragende Dichtwirkung durch Dichtlippen in der Innenoberfläche des Elementes erreicht.

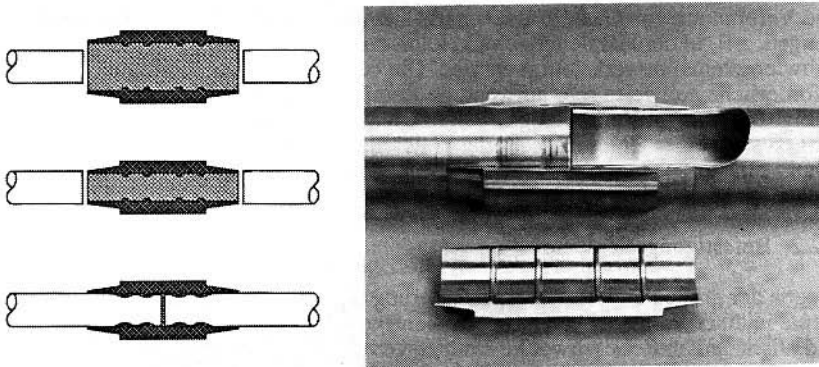


Bild 4: Rohrverbindung aus einer Ni-Ti-Formgedächtnislegierung

Schiffsbau, Förder- und Chemietechnik sind weitere Industriebereiche, in denen Shape-Memory- Rohrverbinder seit langem erfolgreich verwendet werden. Bereits

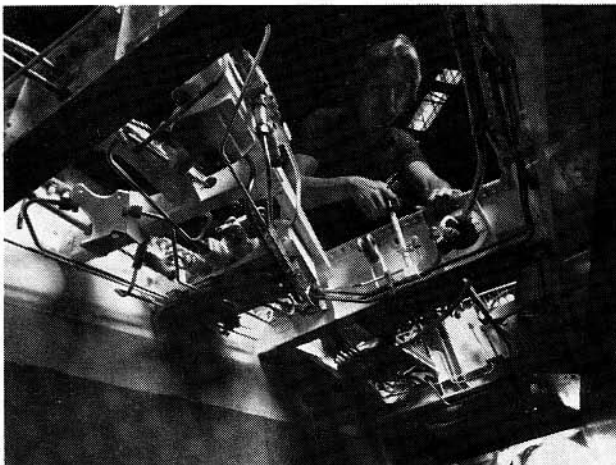


Bild 5: Installation von Shape-Memory-Rohrverbindern

1977 wurden Gasleitungen auf dem Grund der Nordsee mit solchen Elementen repariert. Die wesentlichen Vorteile dieser Verbindungstechnik gegenüber konventionellen Techniken, wie Schweißen, Löten, Pressverbindungen, sind:

- einfache Werkzeuge
- kein speziell geschultes Personal erforderlich
- keine Röntgeninspektion erforderlich
- Installation auch bei beengten Platzverhältnissen möglich
- extrem kurze Montagezeiten
- keine nachträgliche Reinigung erforderlich

Die Verbindung von Gas-, Wasser- und Chemikalienleitungen unter Reinraumbedingungen, z.B. in der Halbleitertechnik, kann mit Shape Memory Verbindern ohne Schwierigkeiten bewerkstelligt werden. Die beim Schweißen derartiger Verbindungen erforderliche, teilweise sehr aufwendige Reinigung des Rohrleitungssystems entfällt völlig. Bild 5 zeigt Verbindungsarbeiten am Sauerstoff- und Wasserstoff-Rohrleitungssystem eines Unternehmens der Halbleiterindustrie. Die Leitungen sind in einer relativ schwer zugänglichen Zwischendecke verlegt, was andere Verbindungstechniken zusätzlich erschweren würde.

3.2.2. Befestigungselemente

Wegen der großen erzielbaren Formänderung eignen sich NiTi-Shape Memory Elemente in einer Vielzahl verschiedener Konfigurationen hervorragend als Befestigungs- und Dichtelemente. Geschweißte Drahringe z.B. werden in großem Umfang für die Befestigung von Abschirmgeflechten an Steckergehäusen verwendet (Bild 6). Wegen ihrer hohen und über den Umfang konstanten Haltekraft bieten diese Ringe eine bislang unübertroffene mechanische und elektrische Zuverlässigkeit. Ähnliche Ringe werden in der Automobiltechnik zur Befestigung thermischer Schutzgeflechte am Gehäuse spezieller Lambda-Sonden verwendet.

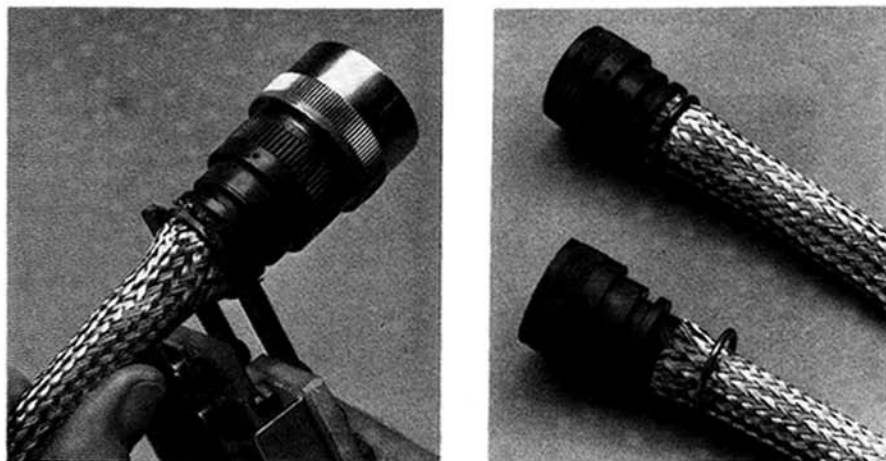


Bild 6: Schirmgeflecht-Befestigung durch direkte elektrische Erwärmung von Ni-Ti-Ringen

Schwierige Montageprozesse können mit radial schrumpfenden Befestigungselementen aus NiTi vereinfacht werden. Beim Zusammenbau von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, z.B., wird eine Hülse aus NiTi verwendet, um die sieben Einzel-

teile des Sensors mit gleichmäßigem Druck zusammenzuhalten. Durch Addition der Toleranzen der Einzelteile ergaben sich erhebliche Schwierigkeiten bei der Verwendung rein thermisch schrumpfender Hülsen (Bild7).

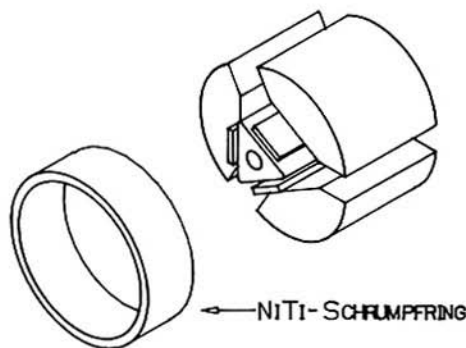


Bild 7: "Cluster"-Montage mit Ni-Ti-Schrumpfringen

Bei neuartigen Drehmomentsensoren für die Automobiltechnik sollen ebenfalls NiTi-Hülsen den Zusammenbau erleichtern. Mäanderförmige Strukturen aus Metallglasfolien werden um Torsionsstäbe gelegt und mit Hilfe der Shape Memory Hülse mit hohem Druck gleichmäßig angepresst. Alle anderen Befestigungstechniken, wie Kleben, Schweißen etc., führten nicht zum Erfolg. Wie Bild 8 schematisch zeigt, passt sich die NiTi-Hülse wegen ihres großen Schrumpfvermögens den Konturen der Metallglasfolie an.

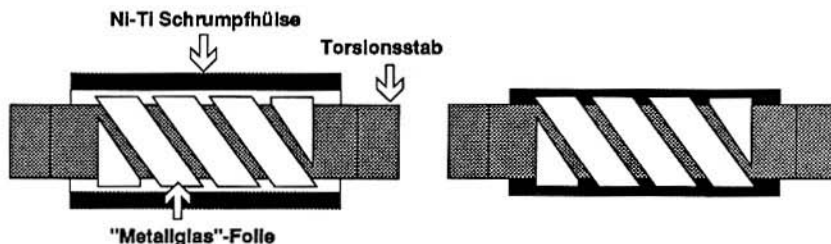


Bild 8: Befestigung von Metallglas-Folien auf Torsionsstäben

Weitere Beispiele aus dem Bereich der Befestigungs- und Montagetechnik sind kraft-freies, lagegenaues Fixieren von Kugellagern und anderen Komponenten auf Wellen durch NiTi-Schrumpfringe (Bild9), Verbindung von Metall- oder Kunststoffrohren mit Metallflanschen, das Verbinden von Gehäuseteilen bei Flugkörpern oder profan Schlauchschellen, die von Robotern ohne Schwierigkeiten installiert werden können.

NiTi-Schrumpfringe können auch für das gasdichte Verschließen dünnwandiger zylindrischer Gehäuse verwendet werden. Bild 10 zeigt einen solchen Anwendungsfall. Durch entsprechende Gestaltung der Basisplatte, die aus Metall, Kunststoff oder Keramik bestehen kann, wird eine ausgezeichnete Gasdichtigkeit erzielt

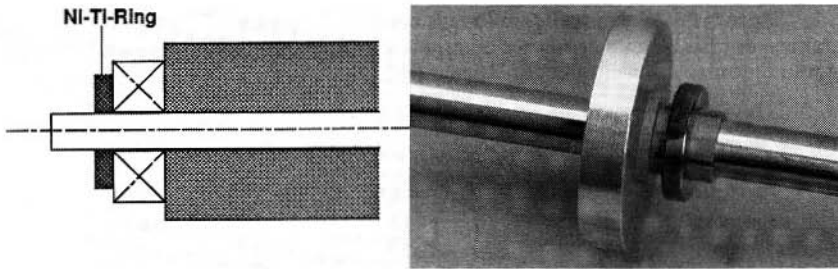


Bild 9: Lagegenaues Fixieren von Komponenten auf Wellen

Bei den bisher besprochenen Elementen wird eine Durchmessererringerung als Formgedächtniseffekt genutzt. Dies ist zweifellos die in den meisten Fällen günstigste Nutzung. Es können jedoch auch andere Bewegungsarten wie Biegung, Verlängerung, Verkürzung, Durchmesserergrößerung etc. zu Befestigungszwecken induziert werden.

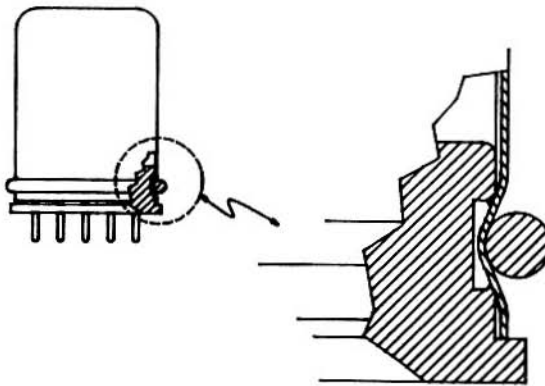


Bild 10: Gasdichtes Verschließen von Aluminium-Gehäusen

3.2.3. Steckverbinder

Bei Verbindungs- und Befestigungselementen wird der Formgedächtniszyklus (Abkühlen, Verformen, Installieren, Erwärmen) im allgemeinen nur einmal durchlaufen. Ein Lösen der Verbindung ist nicht beabsichtigt. Ein anderer Sachverhalt wird bei Steckverbindern gefunden. Hier wird zwar im gesteckten Zustand auch eine hohe Haltekraft (hoher Kontaktdruck) verlangt, jedoch sollte die Kraft zur Herstellung und zum Lösen der Steckverbindung sehr niedrig sein /11/. Diese sich offenbar widersprechenden Forderungen können durch die Verwendung von Shape Memory-Kontakten erfüllt werden. Bei Verwendung derartiger Kontakte können elektronische Bauelemente, aber auch Einzelkontakte, Steckkarten, Falchbandleiter-Steckverbinder u.ä. mit niedrigster Kraft eingesteckt und wieder entfernt werden, ohne auf hohe Haltekraften, d.h. hohen Kontaktdruck verzichten zu müssen.

Der Shape Memory Steckverbinder besteht aus zwei wesentlichen Komponenten, dem eigentlichen Kontakt aus einem Federwerkstoff und dem NiTi-Element, das den Kontakt umschließt (Bild 11). Bei Raumtemperatur befindet sich das NiTi-Element im hochfesten (austenitischen) Zustand und kann somit den Kontaktpalt schließen. Wird diese Anordnung unter M_f abgekühlt, übersteigt die Federkraft des Kontaktes die Haltekraft des Shape Memory Elementes, das nun im niederfesten (martensitischen) Zustand vorliegt. Der Kontakt öffnet somit. Diese Prinzip wird bei den meisten, industriell hergestellten Shape Memory Kontakten genutzt. Zur Verfügung stehen Einzelkontakte (millionenfach für hochbeanspruchte Steckverbindungen in der Luft- und Raumfahrttechnik bewährt), DIP- und PGAP-Stecksockel, Mother/Daughterboard-Steckerleisten u.ä. (Bild 12, 13).

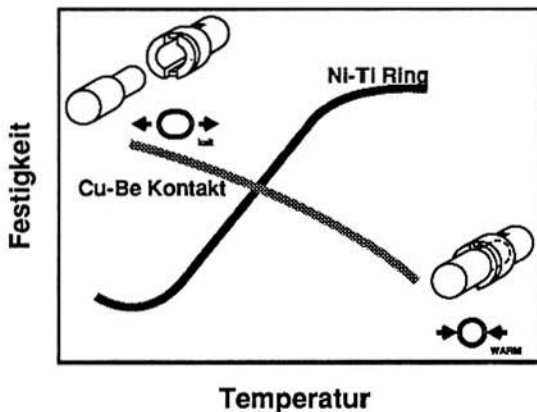


Bild 11: Funktionsweise von Shape-Memory-Steckverbindern

Bei den bisher beschriebenen Shape Memory Kontakten wird die Haltekraft (Kontaktdruck) von einem NiTi-Element erzeugt. Bei einer anderen Variante wird der Formgedächtniseffekt derart ausgenutzt, daß beim Stecken und Lösen ein NiTi-Element die Kontaktkraft des Federwerkstoffes überwindet. In diesem Fall wird das NiTi-Element für den Steckvorgang elektrisch beheizt (Bild 13) /12/.

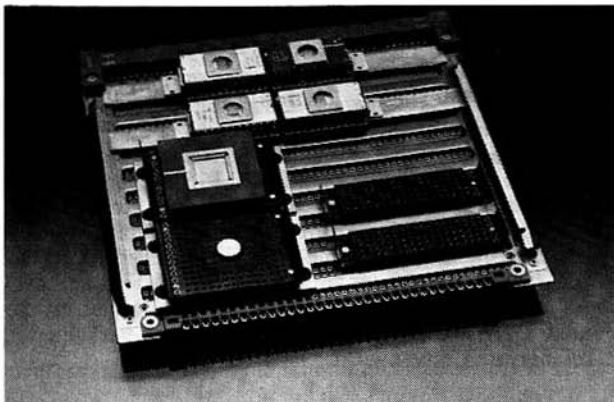


Bild 12: Steckerkarte mit Null-Kraft-Stecksockeln (DIP und PGAP)

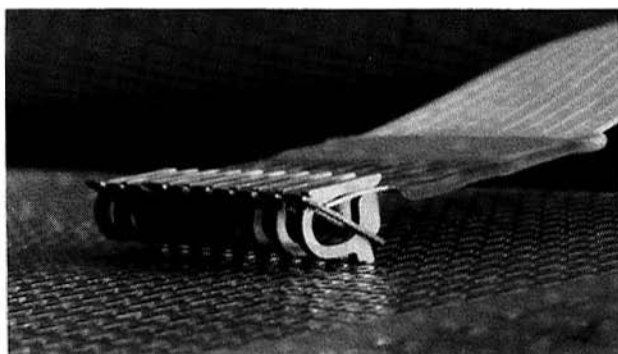


Bild 13: Null-Kraft-Steckverbinder für Flachleiterbandleitung

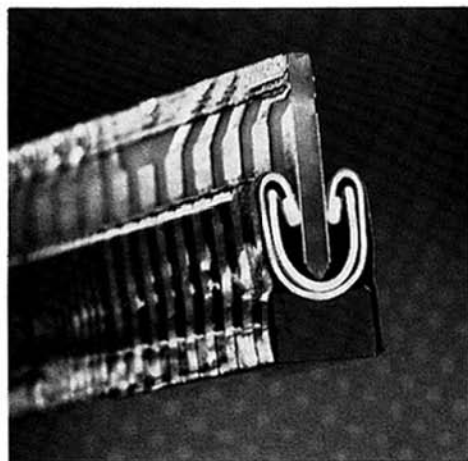


Bild 14: Leiterplatten-Steckverbinder (Beta-Phase)

3.3 Arbeitsverrichtung

Um Arbeit zu verrichten, muß ein Shape-Memory-Element eine Bewegung gegen eine einwirkende Kraft ausführen. Die Arbeitsweise von NiTi-Stellelementen kann anschaulich mit Hilfe des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes (oder auch Last-Verlängerungs-Diagrammes) erläutert werden. Bild 15 wiederholt im wesentlichen die in Bild 2 gezeigten Kurven. Eingezeichnet ist jetzt jedoch eine horizontale Linie (Bild 15a), die die Verfestigungskurve des Austenits in Punkt B und die des Martensits in Punkt C schneidet. Diese horizontale Linie stellt eine konstante Last dar, mit der z.B. ein NiTi-Draht belastet wird. Bei Raumtemperatur ($T < M_f$) ist die Last in der Lage, den Draht bis Punkt C zu verlängern. Bei Temperaturen oberhalb A_f dagegen wird der Draht nur bis Punkt B verlängert. Abkühlen und Erwärmen verlängert und verkürzt somit den Draht, solange die Last einwirkt.

In Bild 15b zeigt die Zusammenhänge bei Verwendung einer Gegenfeder, deren Federkennlinie in das Diagramm eingezeichnet ist.

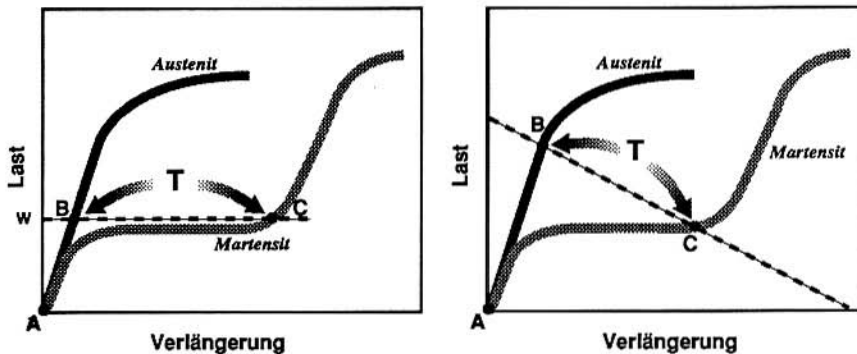


Bild 15: Funktionsweise von Shape-Memory Stellelementen

Dieser Sachverhalt kann in eleganter Weise für Stellelemente ausgenutzt werden. Ein interessantes Beispiel ist der "head-lift" für Plattenlesegeräte, der aus einem dünnen NiTi-Drahtelement und einem trapezförmigen Federbügel besteht /13/. Bild 16 zeigt das Prinzip dieses Gerätes. Bei stillstehender Platte sitzt der Lesekopf auf der Plattenoberfläche auf. Bei voller Drehzahl dagegen fliegt der Lesekopf durch aerodynamischen Auftrieb über die Plattenoberfläche. Bei herkömmlichen Geräten wird die Start- bzw. Anlaufphase durch die Reibung zwischen Lesekopf und Plattenoberfläche erheblich erschwert. Die Feder des Shape-Memory-Lifts ist so konstruiert, daß sie den Lesearm während der Ruhephasen um weniger als 1mm von der Plattenoberfläche anhebt. Wenn die Platte ihre Arbeitsgeschwindigkeit erreicht hat, wird der mit dem Federbügel des Lifts verbundene NiTi-Draht durch Stromdurchgang erwärmt. Der Draht verkürzt sich und trennt dabei den Federbügel vom Lesekopf, der nun unbehindert fliegen kann.

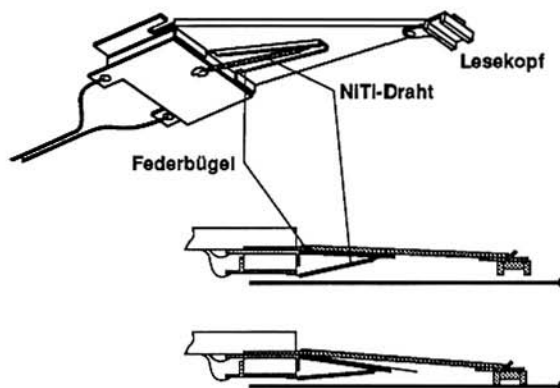


Bild 16: Shape-Memory Lesekopf-Lift

Beim Einbrennen von Kondensatoren werden im allgemeinen Glasrohrsicherungen als Schutzelemente eingesetzt. Es ist schwierig, unter hunderten die durchgebrannten zu finden und zu ersetzen. Eine interessante Alternative ist der in Bild 17 gezeigte Shape-Memory-Schutzschalter. Auch hier wird ein dünner NiTi-Draht durch Stromdurchgang erwärmt. Bereits bei 200 mA verkürzt sich der Draht und löst eine Verklüftung aus, die den Stromkreis unterbricht. Nach dem Abkühlen kann der Schalter wieder eingeschaltet werden.

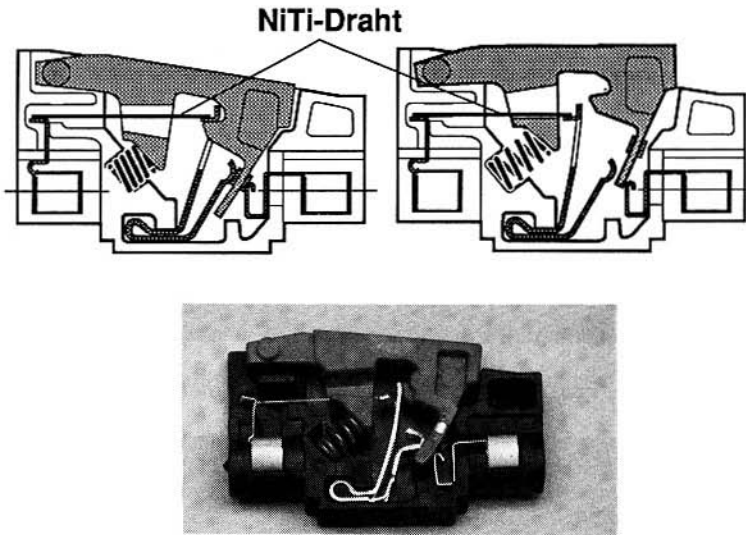


Bild 17: Thermo-Schutzschalter mit NiTi-Auslöseelement

Wegen des relativ hohen Widerstandes eignet sich NiTi gut für die direkte Beheizung durch Stromdurchgang. Beim Einsatz solcher elektrischer Stellelemente ist jedoch zu beachten, daß der Shape-Memory- Effekt ein rein thermischer Effekt ist und somit auch durch hohe Umgebungstemperaturen ausgelöst werden kann. Dies ist bei den thermischen Stellelementen ausdrücklich erwünscht. Derartige Elemente vereinen Sensor und Aktuator. Sie nehmen Änderungen der Umgebungstemperatur wahr und reagieren bei Überschreitung ihrer Umwandlungstemperatur mit einer Gestaltsänderung und/oder Kraftentwicklung /14/.

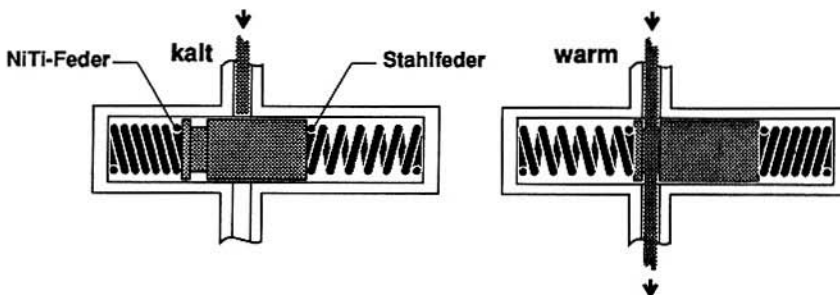


Bild 18: Thermostatisches Ventil

Federn aus NiTi weisen somit unterschiedliche Kennlinien bei hoher und niedriger Temperatur auf. Sie sind somit temperaturabhängig "schaltbar". Bei geeigneter Kombination mit einer Stahlfeder können interessante Stellbewegungen erzielt werden. Bei niedriger Temperatur ist die Stahlfeder stärker als die NiTi-Feder und komprimiert diese. Bei Überschreiten der Umwandlungstemperatur ist jedoch die NiTi-Feder

stärker als die Stahlfeder und kann nun diese komprimieren. In Bild 18 ist eine NiTi/ Stahl-Kombination im Einsatz in einem Ventil dargestellt. Derartige Ventile werden in jüngster Zeit in Automatikgetrieben zur Regelung des Schaltdruckes, bzw. zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Katalysators während einer Kaltstartphase eingesetzt. Bild 19 zeigt die Schaltplatte eines Automatikgetriebes mit zwei Ni-Ti Shape Memory Ventilen (freigelegt), sowie eine Detailaufnahme eines solchen Ventils. In anderen Bereichen der Automobiltechnik wird an der Verwendung von Shape-Memory- Stellelementen für Belüftungsventile, Kaltstartregler u.ä. gearbeitet.

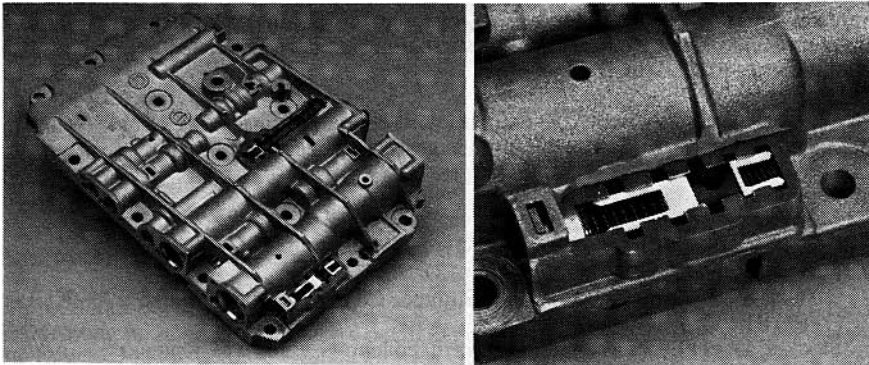


Bild 19: Schaltplatte eines Automatikgetriebes mit zwei Shape Memory Ventilen

2.4 Superelastizität

Die Superelastizität kann auch als "mechanisches Formgedächtnis" bezeichnet werden. Ein superelastisches Element kann bis zu 8% verformt, z.B. gedehnt, werden und kehrt nach Entlastung in seine Ausgangsform zurück. Damit sind die erzielbaren Dehnungen um den Faktor 10 größer als bei konventionellen Legierungen. Allerdings ist zu beachten, daß dieser Effekt sehr stark temperaturabhängig ist. Er ist deshalb überall dort vorteilhaft anwendbar, wo die Umgebungstemperatur konstant gehalten werden kann. Dies ist z.B. in der Medizintechnik der Fall, wo die Körpertemperatur für Konstanz sorgt. Die bisher besten Erfolge wurden daher auch in diesem Bereich erzielt.

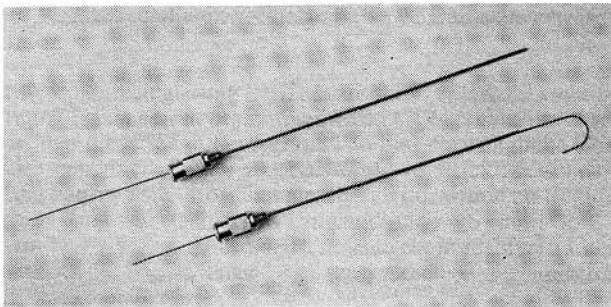


Bild 20: Mammalok-Lokalisierungsnadel mit superelastischem Ni-Ti Haken

Die wahrscheinlich älteste Anwendung der Superelastizität sind orthodontische Bögen zur Zahnregulierung. Derartige Bögen üben während der Regulierungsphase eine nahezu konstante Kraft aus und müssen daher, anders als Bögen aus rostfreiem Stahl, nicht nachgespannt werden. Ausserdem ist die Behandlungszeit verkürzt.

Die zweite sehr erfolgreiche Anwendung der Superelastizität in der Medizintechnik war und ist der Mammalok[®] Operationshaken, der zur Lokalisierung und Markierung von Brusttumoren verwendet wird. Der operative Eingriff wird dadurch stark vereinfacht. Eine ebenfalls drastische Vereinfachung der Operation wird durch Verwendung von Fadenverankerungen aus superelastischem NiTi erzielt. Ein kleines bogenförmiges Drahteillement, an dem der Faden befestigt ist, wird in ein, in den Knochen gebohrtes Loch durch eine Kanüle eingeführt und verspannt sich dort. Es ersetzt deutlich größere Schrauben aus rostfreiem Stahl.

Die extreme Flexibilität von NiTi-Drähten wird bei deren Einsatz als "Guide-Wires" für Katheder genutzt, die durch Blutgefäße geschoben werden müssen.

Schrifttum

- /1/ Chang, L.C.; Read, T.A.: Trans. AIME 191 (1951) 47
- /2/ Perkins, J.: Mat. Sci. Eng. 51 (1981) 181
- /3/ Otsuka, K.; Shimizu, K.: Proc. Int. Summer Course on Mart. Transf. KUL
(1982) 81
- /4/ Stöckel, D. et al: Legierungen mit Formgedächtnis, Band 259 Kontakt &
Studium, Ehningen: Expert Verlag 1988
- /5/ Moberley, W.J., Melton, K.N.: in T. Duerig et al: Engineering Aspects of
Shape Memory, to be published
- /6/ Wide Hysteresis
- /7/ Tautzenberger, P.: in /4/ 175
- /8/ Duerig, T.; Melton, K.N.: Proc. Int. Symp. SMA, Guilin (1986) 397
- /9/ Stöckel, D.: in /4/ 122
- /10/ Stöckel, D.: Chem. Tech. 17 (1988) 68
- /11/ Garretson, C.; Stöckel, D.: Metall 41 (1987) 22
- /12/ Ritter, F.; Stöckel, D.: in /4/ 152
- /13/ Yaeger, J.R.: Design News (1986) Heft 10, 188
- /14/ Tautzenberger, P.: in /4/ 64