

## **Formgedächtnis und Pseudoelastizität von NiTi-Legierungen**

Stoeckel

Metall Wissenschaft & Technik  
41. Jahrgang, Heft 5, Mai  
pp. 494-500

1987

# Formgedächtnis und Pseudoelastizität von Nickel-Titan-Legierungen<sup>1)</sup>

Prof. Dr. Dieter STÖCKEL, Raychem Corporation,  
Menlo Park, California, USA

Wird eine Formgedächtnislegierung bei Temperaturen unterhalb einer bestimmten kritischen Temperatur bleibend verformt, so kann sie sich bei Erwärmung über diese kritische Temperatur an ihre ursprüngliche Gestalt erinnern und diese wieder annehmen. Neben der freien Gestaltsänderung, die meist zu Anzeigezwecken genutzt wird, wird vor allem die unterdrückte Gestaltsänderung zur Krafterzeugung bei Rohrverbindungs- und Reparatursystemen, Befestigungs- und Dichtelementen sowie zur Herstellung hochzuverlässiger Steckverbinder technisch genutzt. Da Shape-Memory-Legierungen im Gegensatz zu Thermobimetallen verschiedene Bewegungsarten (Verlängerung, Verkürzung, Biegung, Torsion sowie Durchmesser-Verkleinerung oder -Vergrößerung) durchführen können und dazu nur geringe Temperaturänderungen erforderlich sind, sind sie zur Verwendung als Stallelemente für viele Regel-, Steuer- und Stellaufgaben geeignet. Shape-Memory-Legierungen können darüber hinaus den Effekt der Superelastizität aufweisen, der unter anderem in der Medizintechnik Verwendung findet.

When deformed in the martensitic state, shape memory alloys return to their initial shape upon heating to a critical temperature. Besides free recovery which is mainly used for demonstration purposes constrained recovery is used to create high forces in tube and pipe couplings, tube repair systems, fasteners and sealing elements as well as high reliability connectors. Compared to thermobimetals, shape memory alloys can change their shape in many different modes with only little temperature change. Because of this they can be used as actuators in many applications. NiTi alloys can exhibit superelasticity, widely used in dental and medical applications.

## Einleitung

Der Formgedächtnis- oder Shape-Memory-Effekt wurde bereits 1932 bei der Untersuchung von Gold-Cadmium-Legierungen entdeckt, jedoch erst 1951 als Ergebnis einer martensitischen Umwandlung erkannt [1]. Er wurde inzwischen in mehreren Legierungssystemen gefunden, von denen allerdings nur die Kupferbasislegierungen CuZnAl und CuAlNi sowie die Nickel-Titan-Legierungen technisch bedeutsam geworden sind.

Die metallkundlichen Grundlagen sowie die Voraussetzungen für das Auftreten des Formgedächtniseffektes wurden an anderer Stelle eingehend beschrieben [2, 3, 4]. Es soll daher hier nur auf die für die Anwendung der Nickel-Titan-Legierungen notwendigen Eigenschaften der am Shape-Memory-Effekt beteiligten

Phasen (Austenit und Martensit) eingegangen werden, die vor allem im Festigkeitsverhalten charakteristische Unterschiede zeigen. Während das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits dem konventioneller Legierungen gleicht, ist das des Martensits recht ungewöhnlich (Abb. 1). Es ist gekennzeichnet durch das sogenannte Martensitplateau, einem Bereich mit sehr geringer Verfestigung. In diesem Bereich erfolgt die Verformung durch Verschieben von Zwillingsgrenzen. An das Martensitplateau schließt sich ein zweiter elastischer Bereich an. Bei Erreichen der „wahren“ Streckgrenze erfolgt die plastische Verformung konventionell durch Versetzungsbewegung. Die Verformung im Bereich des Martensitplateaus wird bei Erwärmung über die Umwandlungstemperatur rückgängig gemacht.

Ein mit dem Shape-Memory-Effekt verwandter Effekt in NiTi-Legierungen ist die sogenannte Pseudo- oder Superela-

stizität. Verformt man eine NiTi-Legierung im Temperaturbereich oberhalb der As-Temperatur und einer kritischen Temperatur  $M_d$ , so entsteht spannungsinduzierter Martensit. Bei Entlastung wird der Martensit instabil; mit der Rückumwandlung des spannungsinduzierten Martensits in Austenit nimmt die Probe ihre ursprüngliche Gestalt wieder an. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer bei Raumtemperatur superelastischen NiTi-Legierung zeigt Abb. 2. Es ergibt sich eine Hysteresese, bestimmt durch die für die Bildung des spannungsinduzierten Martensits erforderlichen Spannung, und der Spannung, bei der die Rückumwandlung erfolgt. Die Fläche unterhalb der Entlastungskurve ergibt die nutzbare Arbeit bzw. die gespeicherte elastische Energie [5].

## 2 Einstellung des Formgedächtnisses

Wird eine Feder aus einer NiTi-Legierung im martensitischen (Tieftemperatur-) Zustand so weit gedehnt, daß der Dehnungsbereich des Martensitplateaus nicht überschritten wird, so bleibt sie nach Wegnahme der verformenden Kraft im gedehnten Zustand, sofern keine Temperaturänderung erfolgt. Bei Erwärmung und Überschreiten der As-Temperatur kehrt die Feder in ihre ursprüngliche Form zurück. Kühlt man nun wieder unter  $M_s$  ab, so erfolgt keine Formänderung, sofern keine Kraft einwirkt. Man spricht hierbei vom Einwegeffekt (Abb. 3). Der Einwegeffekt findet vor allem für Verbindungs-, Befestigungs- und Dichtungselemente Verwendung.

Der Einwegeffekt kann nahezu beliebig oft wiederholt werden. Es ist dazu jedoch bei jedem Zyklus eine verformende Kraft erforderlich. Wirkt diese Kraft in Form einer konstanten Last oder einer Gegenfeder ständig ein, kann ein Zweiwegverhalten erreicht werden. Die verformende Kraft muß stark genug sein, die NiTi-Feder im martensitischen Zustand zu dehnen, jedoch zu schwach, um eine nennenswerte Verlängerung der Feder im austenitischen Zustand zu bewirken. Dieses Zweiwegverhalten ist in Abb. 4 schematisch dargestellt.

Shape-Memory-Legierungen können unter bestimmten Bedingungen auch einen wahren Zweiwegeffekt aufweisen, d.h., sie können sich an zwei Formen

<sup>1)</sup> auszugsweise vorgetragen auf der BIG TECH, Berlin 1986.

erinnern. Der wahre Zweieffekt ist für die Anwendung von Nickel-Titan-Legierungen jedoch unbedeutend. Es wird daher nicht näher darauf eingegangen.

### 3 Shape-Memory-Legierungen auf NiTi-Basis

Die intermetallische Verbindung NiTi mit einem Nickelgehalt von etwa 50 Atom-% bzw. 55 Gewichts-% gilt als Standardlegierung mit Formgedächtnis. Da für die Variation der Umwandlungstemperaturen ( $A_s$ ,  $M_s$ ) durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung nur ein schmaler Homogenitätsbereich zur Verfügung steht, muß bei der Herstellung der Legierung auf eine genaue Kontrolle der Legierungszusammensetzung und auf extreme Homogenität geachtet werden. Eine Veränderung der Legierungszusammensetzung um nur 0,1 % kann eine Verschiebung der As-Temperatur um 10 K bewirken. Durch Zulegieren weiterer Elemente wie Cu, Fe etc. kann einerseits die Konzentrationsabhängigkeit abgeschwächt und andererseits eine positive Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften erzielt werden. Gegenüber Formgedächtnislegierungen auf Kupferbasis zeichnen sich die NiTi-Legierungen vor allem durch einen größeren Effekt, höhere Festigkeit, bessere Umformbarkeit, Überhitzungsbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus.

#### 3.1 Binäre Standardlegierungen

Binäre NiTi-Legierungen werden im allgemeinen mit Umwandlungstemperaturen im Bereich von  $-30^\circ\text{C}$  bis  $+80^\circ\text{C}$  hergestellt. Sie können Superelastizität und/oder Formgedächtnis aufweisen und werden daher für orthodontische Drähte und andere medizintechnische Anwendungen, aber auch für Korsagen sowie Anzeige- und Stellelemente verwendet, bei denen keine besonderen Anforderungen an die Hysterese gestellt werden.

#### 3.2 Cryogene Legierungen

Als cryogene Legierungen werden solche NiTi-Legierungen bezeichnet, deren Umwandlungstemperaturen unter  $-100^\circ\text{C}$  liegen. Sie werden meist für Verbindungs- und Befestigungselemente verwendet, wenn die Installation wegen Brand- und Explosionsgefahr oder aus anderen Gründen ohne Wärmeeinwirkung erfolgen muß. Die Legierungen sind im Hinblick auf Austenitfestigkeit optimiert und liefern in einem

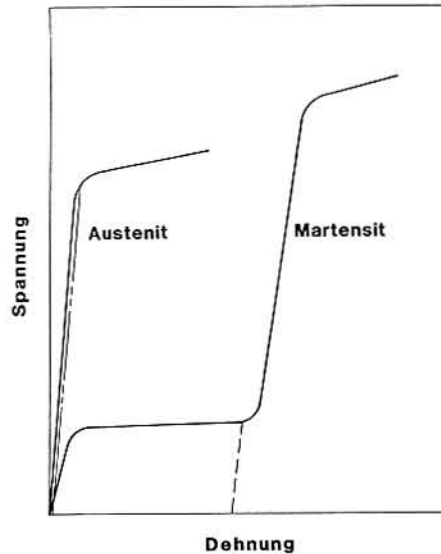


Abb. 1. Verfestigungsverhalten von Nickel-Titan im austenitischen und martensitischen Zustand (schematisch).

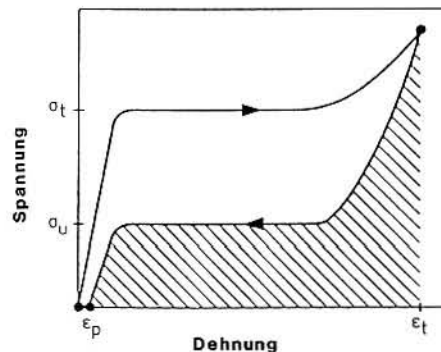


Abb. 2. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer pseudoelastischen NiTi-Legierung (schematisch nach [5]).

Anwendungsbereich von  $-65^\circ\text{C}$  bis  $300^\circ\text{C}$  außerordentlich gute Haltekräfte.

#### 3.3 Legierungen mit erweiterter Hysterese

Während cryogene Legierungen nach der Tieftemperaturformgebung auch bei tiefer Temperatur gelagert, transportiert und die entsprechenden Bauteile bei tiefer Temperatur installiert werden müssen, können Legierungen mit erweiterter Hysterese nach der Tieftemperaturformgebung bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden. Verbindungs- und Befestigungselemente aus diesen Legierungen werden durch Erwärmen auf ca.  $150^\circ\text{C}$  installiert. Nach der Installation bleiben die Legierungen im hochfesten (Hochtemperatur-)Zustand, auch wenn sie auf Temperaturen bis  $-65^\circ\text{C}$  abgekühlt werden. Die Erweiterung der Hysterese erfordert einen speziellen thermomechanischen Prozeß und ist nicht wiederholbar [6].

#### 3.4 Legierungen für Stellelemente

Stellelemente erfordern im allgemeinen den Zweieffekt oder Zweiwegverhalten. Durch Entwicklung von Legierungen mit sehr niedriger Martensitfestigkeit und hoher Austenitfestigkeit kann das Zweiwegverhalten mit relativ geringen Rückstellkräften vorteilhaft genutzt werden. Darüber hinaus weisen diese Legierungen nur eine geringe Hysterese auf sowie ausgezeichnete Stabilität bei zyklischer Beanspruchung. Der Bereich möglicher Umwandlungstemperaturen liegt bei  $-100^\circ\text{C}$  bis  $+100^\circ\text{C}$ .

#### 3.5 Superelastische Legierungen

Außer binären NiTi-Legierungen stehen ternäre Legierungen zur Verfügung, die neben verbesserter Superelastizität eine höhere Festigkeit aufweisen. Sie werden hauptsächlich für medizintechnische Anwendungen eingesetzt. Gegenüber Stählen weisen die superelastischen NiTi-Legierungen eine um den Faktor 10 höhere elastische Dehnung auf. Dieser Effekt ist allerdings auf einen relativ engen Temperaturbereich beschränkt. In Abb. 5 ist die Temperaturabhängigkeit der pseudoelastischen Dehnung einer ternären NiTi-Legierung dargestellt.

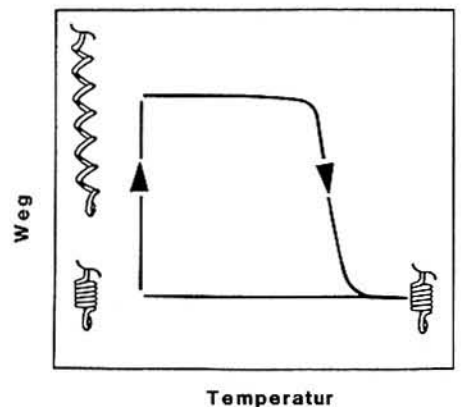


Abb. 3. Einwegeffekt (schematisch).

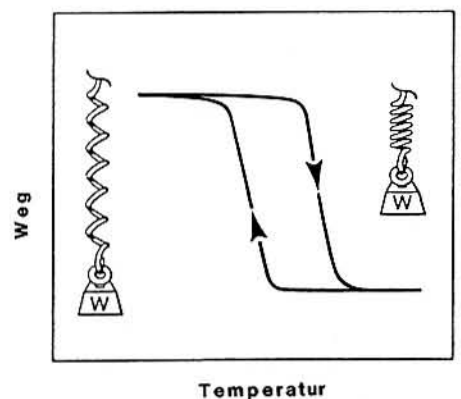


Abb. 4. Zwiwegverhalten (schematisch).

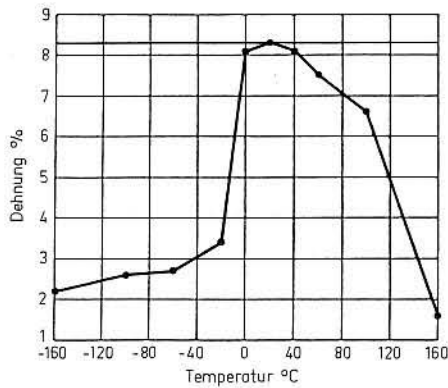


Abb. 5. Temperaturabhängigkeit der pseudoelastischen Dehnung (nach [5]).

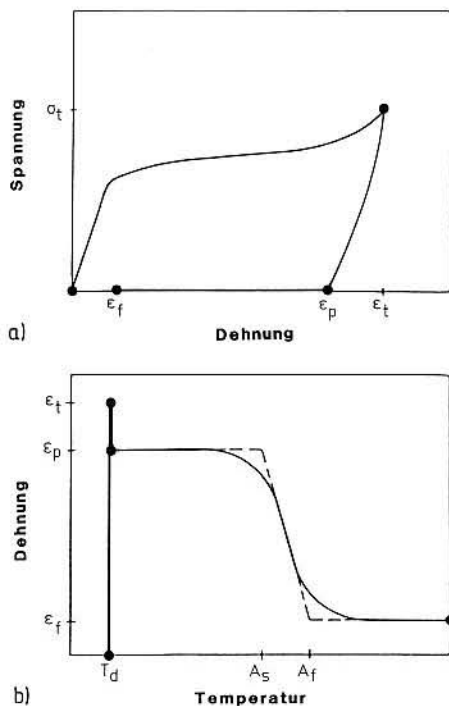


Abb. 6a-b. Freies Formgedächtnis (schematisch nach [5]).

## 4 Anwendungen von NiTi-Legierungen mit Shape-Memory-Effekt

Der Shape-Memory-Effekt ist als dreidimensionaler Effekt anzusehen, gegeben durch die Dimensionen Spannung, Dehnung und Temperatur. Innerhalb dieses „Raumes“ können die Anwendungen des Shape-Memory-Effektes in vier grundsätzlich verschiedene Gruppen eingeteilt werden, die unterschiedliche Konstruktionsparameter und Legierungseigenschaften erforderlich machen [5].

### 4.1 Freies Formgedächtnis (Bewegung)

Das freie Formgedächtnis ist der einfachste Fall der Nutzung des Shape-

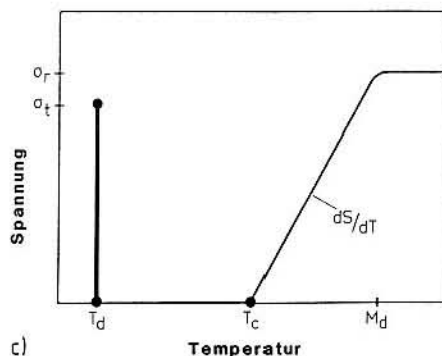
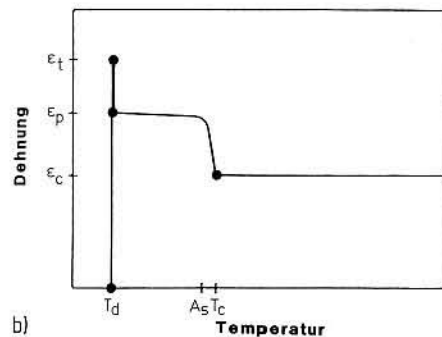
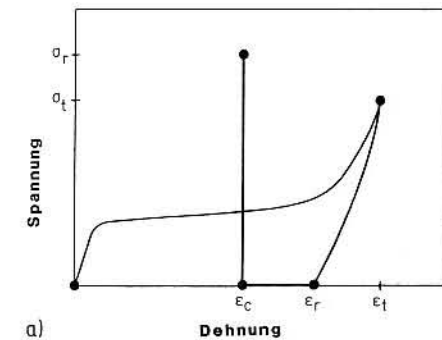


Abb. 7a-c. Unterdrücktes Formgedächtnis (schematisch nach [5]).

Memory-Effektes. Der gesamte Vorgang besteht aus den Teilvorgängen Martensitverformung und Erwärmung über die A<sub>f</sub>-Temperatur, um die ursprüngliche Gestalt wieder einzustellen. In Abb. 6 ist der Effekt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm und im Dehnungs-Temperatur-Diagramm dargestellt. Die wesentlichen Größen sind die Gesamtdehnung  $\epsilon_t$ , die plastische Dehnung  $\epsilon_p$  und die zuweilen als „Gedächtnisschwund“ (amnesia) bezeichnete Enddehnung  $\epsilon_f$ . Das Formgedächtnis selbst ergibt sich aus  $\epsilon_p - \epsilon_f$ . Mit zunehmender Gesamtdehnung nehmen auch  $\epsilon_p$  und  $\epsilon_t$  zu; die Größe des Formgedächtnisses durchläuft ein Maximum bei 8%. Der Gedächtnisschwund kann durch spezielle thermomechanische Behandlung minimiert werden. Die praktische Anwendung des freien

Formgedächtnisses von NiTi beschränkt sich auf Spielzeuge, Demonstrationsobjekte etc. Eine technische Ausnahme stellen die entfaltbaren Antennen für Raumflugkörper dar [7].

### 4.2 Unterdrücktes Formgedächtnis (Kraftentwicklung)

Wird eine im martensitischen Zustand verformte Probe daran gehindert, bei Erwärmung über A<sub>s</sub> in ihre ursprüngliche Gestalt zurückzukehren, spricht man von unterdrücktem Formgedächtnis. Die Probe kann dabei eine erhebliche Kraft entwickeln.

Dieser Effekt wird technisch in großem Umfang genutzt. Er kann am Beispiel eines Schrumpfringes anschaulich erläutert werden. Ein Ring aus NiTi wird in der Hochtemperaturphase (Austenit) z. B. durch Stanzen oder Drehen hergestellt. Der Innendurchmesser dieses Ringes ist kleiner als der Durchmesser des Schaftes oder der Welle, auf die der Ring aufgebracht werden soll. Anschließend wird der Ring unter M<sub>f</sub> abgekühlt. Die Umwandlung von Austenit in Martensit verläuft ohne Gestaltsänderung. Der Ring wird im martensitischen Zustand aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer als der Durchmesser der Welle ist. Danach wird der Ring über die Welle geschoben und erwärmt. Bei der Rückumwandlung schrumpft der Ring zunächst frei (freies Formgedächtnis), bis er die Welle berührt. Die weitere Formänderung wird unterdrückt, d. h. verhindert. Stattdessen wird eine Spannung aufgebaut. Abb. 7a zeigt dieses Verhalten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Relevante Größen sind nun  $\epsilon_c$ , die Dehnung, bei der der Ring die Welle berührt, und  $\sigma_r$ , die Spannung, die durch die unterdrückte Gestaltsänderung aufgebaut wird. Im Dehnungs-Temperatur-Diagramm (Abb. 7b) erscheint der Anteil der freien Formänderung ( $\epsilon_p - \epsilon_c$ ) sowie die Temperatur, bei der der erste Kontakt Ring/Welle zustande kommt.

Eine weitere wichtige Darstellung ist die Temperaturabhängigkeit der Spannung (Abb. 7c). Sobald der Ring die Welle berührt, ergibt sich eine lineare Zunahme der Spannung mit steigender Temperatur, bis bei M<sub>d</sub> die maximale Spannung erreicht wird. Es ist verständlich, daß die Spannung von der Kontaktdehnung abhängt. Um maximale Spannungswerte zu erhalten, sollte die Kontaktdehnung mindestens 2% betragen (Abb. 8). Für die praktische Anwendung von Schrumpfverbindungen bedeutet dies, daß vom gesamten Formgedächtniseffekt von ca. 8% nur maximal 6%



für die Montage zur Verfügung stehen. Die bisherige Betrachtung des unterdrückten Formgedächtnisses ging davon aus, daß das Substrat, auf das der Ring aufgebracht wird, dabei nicht verformt wird und dieselbe thermische Ausdehnung wie der NiTi-Ring aufweist. Dies ist in der Praxis im allgemeinen nicht der Fall. Das Substrat, z.B. ein Rohr im Falle von NiTi-Rohrverbindungselementen, wird entweder plastisch oder elastisch deformiert. Die erreichbare „Montagespannung“ ist damit von den mechanischen Eigenschaften des Substratwerkstoffes abhängig. In Abb. 9 ist dies schematisch für die Verformung von Substraten mit unterschiedlichen elastischen Eigenschaften dargestellt.

#### 4.2.1 Rohrverbindungssysteme

Eine der ältesten und bisher erfolgreichsten Anwendungen des Shape-Memory-Effektes sind Rohrverbinder. Im einfachsten Fall besteht ein Rohrverbinder aus einem Zylinder aus einer NiTi-Legierung, dessen Innendurchmesser im Arbeitstemperaturbereich (Austenit) kleiner ist als der Außendurchmesser der zu verbindenden Rohre. Bei Verwendung cryogener Legierungen wird der Zylinder in flüssigem Stickstoff so weit aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer ist als der Rohrdurchmesser. Das aufgeweitete Verbindungselement wird in flüssigem Stickstoff gelagert und transportiert. Zur Montage wird das Element mit einer speziellen Zange dem Kühlbehälter entnommen und über die Rohrenden geschoben. Bei der Erwärmung auf Raumtemperatur schrumpft das Element auf die Rohrenden und verbindet diese druck- oder

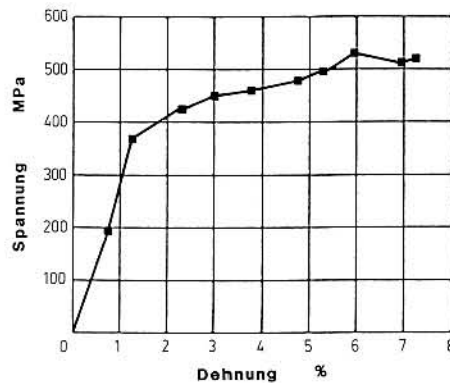


Abb. 8. Spannung in einem NiTi-Schrumpfelement als Funktion der Kontaktdehnung (nach [5]).

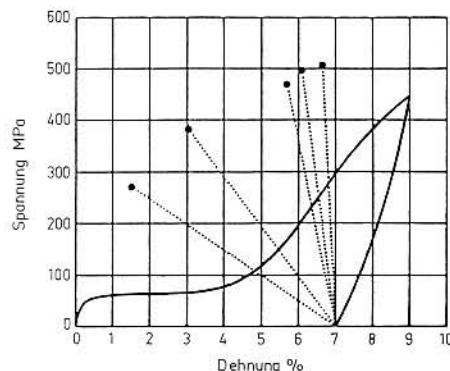


Abb. 9. Spannung in einem NiTi-Schrumpfelement bei verschiedenen Substratwerkstoffen (nach [5]).

vakuumdicht. Zur Verbesserung der Dichtwirkung weisen die Elemente im allgemeinen Dichtlippen auf der Innenoberfläche auf (Abb. 10).

Cryogene Legierungen werden hauptsächlich dann verwendet, wenn aus Gründen von Brand- und Explosionsgefahr ohne Wärmeeinwirkung gearbeitet werden muß. Dies ist z. B. bei Treibstoffleistungen und in Lackieranlagen der

Fall. Andererseits ist die Lagerung und der Transport der Verbindungselemente in flüssigem Stickstoff umständlich und teuer. Elemente aus Legierungen mit erweiterter Hysterese können dagegen nach der Aufweitung bei Raumtemperatur gelagert werden. Durch Erwärmen auf 100 bis 150°C werden diese Elemente installiert. Wie bereits erwähnt, bleiben diese Legierungen auch nach Abkühlung im austenitischen Zustand. Shape-Memory-Rohrverbinder aus Nickel-Titan werden hauptsächlich für die Verbindung von Hydraulikleitungen im Flugzeugbau verwendet. Sie zeichnen sich durch außergewöhnlich hohe Zuverlässigkeit aus. Von den mehr als 1 000 000 Elementen, die seit 1971 für die Grumman F-14 „Tomcat“ eingesetzt wurden, wurde kein einziger Schadensfall gemeldet. Neben Flugzeugbau sind vor allem der Schiffbau und die Prozeßtechnik bevorzugte Anwendungsgebiete der NiTi-Rohrverbindungssysteme.

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet für Rohrverbindungssysteme – vor allem aus NiTi-Legierungen mit weiter Hysterese – sind Unterwasser-Rohrverbindungen. Die Verbindung von Gas- und Ölleitungsrohren auf dem Meeresgrund muß schnell und zuverlässig erfolgen. Bei dem in Abb. 11 gezeigten System, das für die Verbindung von dickwandigen Rohren mit ca. 60 mm Durchmesser ausgelegt ist, besteht das eigentliche Verbindungselement aus rostfreiem Stahl. Die „Treiber“ sind Ringe aus NiTi mit erweiterter Hysterese.

#### 4.2.2 Rohrreparatursysteme

Korrosionsschäden an Wärmeaustauscherrohren in Kraftwerken können auf

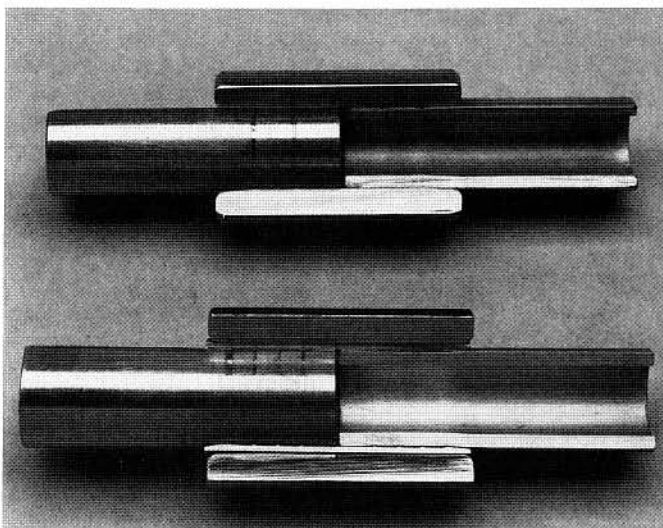


Abb. 10. NiTi-Rohrverbindungselement.

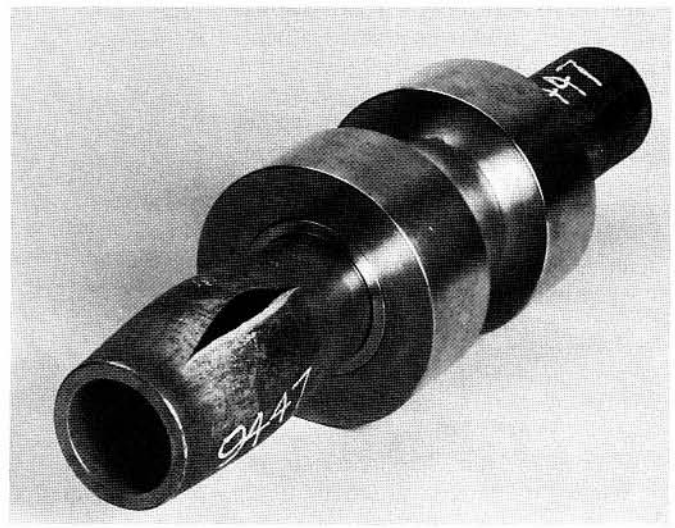


Abb. 11. Rohrverbinder für Unterwasser-Gasleitungen (nach Berstversuch).

elegante Weise mit Hilfe von Shape-Memory-Rohrreparatursystemen behoben werden. In das beschädigte Rohr wird ein Rohrabschnitt aus NiTi eingeführt, der zuvor im martensitischen Zustand komprimiert wurde. Bei Erwärmung dehnt er sich radial aus und legt sich damit an die Innenoberfläche des zu reparierenden Rohres an.

Bei einem modifizierten System wird ein Rohrabschnitt aus einem mit dem zu reparierenden Rohr artgleichen Material durch zwei Shape-Memory-Ringe mit großer Kraft in das Rohr eingepreßt. Die Installation des Reparatursystems erfolgt unter Verwendung einer wiederverwendbaren Shape-Memory-Montagvorrichtung.

#### 4.2.3 Befestigungs- und Dichtelemente

Wegen der großen erzielbaren Formänderung eignen sich NiTi-Shape-Memory-Elemente in einer Vielzahl verschiedener Konfigurationen hervorragend als Befestigungs- und Dichtelemente. Dies gilt vor allem für Elemente aus Legierungen mit erweiterter Hysterese. Eine bevorzugte Ausführungsform sind geschweißte Drahringe, die bei Erwärmung radial schrumpfen.

Derartige Ringe werden in großem Umfang für die Befestigung von Abschirmgeflechten an Steckergehäusen verwendet. Zur Montage wird der Ring über Geflecht und Steckergehäuse geschoben und elektrisch erwärmt (Abb. 12). Bei dieser Art der Erwärmung schrumpft der Ring innerhalb 5 bis 10 Sekunden. Das Erreichen der maximalen Installationstemperatur wird durch Farbumschlag eines Thermocolorindikators angezeigt. Für die elektrische Montage können die Ringe mit einer isolierenden Schicht aus einem wärmebeständigen und druckfesten Kunststoff auf der Innenoberfläche versehen werden.

Geschweißte Drahringe können mit nahezu beliebigen Durchmessern hergestellt werden. Für kleine Abmessungen (Innendurchmesser < 10 mm) ist die Verwendung aus Blech gestanzter Ringe allerdings vorteilhafter. Darüber hinaus bieten gestanzte Ringscheiben eine ebene Auflagefläche. Gegenüber der konventionellen „Aufschrumpftechnik“, die auf der thermischen Ausdehnung des aufzubringenden Elementes beruht, bieten Shape-Memory-Elemente einen um Größenordnungen größeren Schrumpfweg, wodurch die Montage deutlich erleichtert wird. Darüber hinaus erfolgt der Zusammenbau bei Raumtemperatur und ohne den

durch Erwärmung oder Abkühlung der zu verbindenden Bauteile verursachten Zeitdruck.

Bei den bisher besprochenen Elementen wird eine Durchmesserverringerung als Formgedächtniseffekt genutzt. Es können jedoch auch andere Bewegungsarten wie Biegung, Verlängerung, Verkürzung etc. zu Befestigungszwecken induziert werden. Hantelförmige Spannelemente können z. B. für die Verbindung ebener Bauteile verwendet werden. Die vorgedehnten Elemente werden in formgefräste Schlitzte eingelegt. Bei Erwärmung verkürzen sich die Elemente und verbinden damit die Bauteile.

Auf dem Gebiet der Verbindungstechnik konkurrieren die Shape-Memory-Elemente mit konventionellen Techniken wie thermisches Schrumpfen, Kleben, Löten, Schweißen etc. Gegenüber

diesen Techniken bietet die Verwendung von NiTi-Befestigungselementen einige Vorteile:

- keine Wärmeeinwirkung (bei Verwendung cryogener Legierungen);
- größere zulässige Montagetoleranzen (gegenüber thermischem Schrumpfen);
- einfache Montagetechnik, keine aufwendigen Werkzeuge;
- Verbindungen artfremder Werkstoffe möglich (z. B. Metall/Keramik).

#### 4.2.4 Steckverbinder

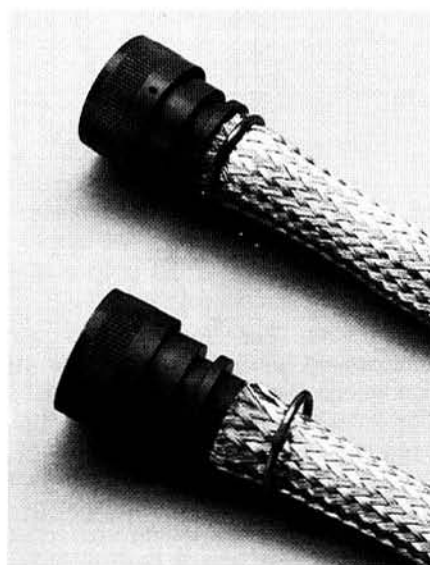
Steckverbinder für die Befestigung elektronischer Bauelemente auf Leiterplatten sollen einerseits eine niedrige Einsteckkraft (ZIF: zero insertion force), andererseits jedoch einen größtmöglichen Kontaktdruck aufweisen. Die Forderung nach niedriger Einsteckkraft ist in Anbetracht der immer weiter zunehmenden Zahl der Anschlußbeinchen elektronischer Bauelemente verständlich. Der hohe Kontaktdruck ist aus Gründen der Kontaktzuverlässigkeit erforderlich. Die sich offenbar widersprechenden Forderungen können durch Verwendung von „Shape-Memory-Kontakten“ erfüllt werden, die in [8, 9] bereits ausführlich beschrieben wurden.

Der Shape-Memory-Steckverbinder besteht aus zwei wesentlichen Komponenten, dem eigentlichen Kontakt aus einem Federwerkstoff (CuBe) und dem NiTi-Shape-Memory-Element, das den Kontakt umschließt. Bei Raumtemperatur befindet sich das NiTi-Element im hochfesten Zustand (Austenit) und kann somit den Kontaktspace schließen. Wird diese Anordnung unter  $M_s$  (bzw.  $M_f$ ) abgekühlt, übersteigt die Federkraft des Kontaktes die Haltekraft des Shape-Memory-Elementes, das nun im niederfesten Zustand vorliegt. Der Kontakt öffnet somit. Dieses Prinzip wird bei den in [9] vorgestellten Cryocon- und Cryotact-Kontakten angewendet.

Anwendung finden derartige Kontakte in Stecksockeln für DIP- und Bubble-Memory-Packages sowie für Flachbandkabel- und Mother-Daughter-Board-Steckverbinder.

VLSI-Logik-Chips können wegen der hohen Zahl von Kontaktstiften (bis zu mehreren hundert) bei Verwendung konventioneller Stecksockel nur mit Pressen eingesteckt werden, und dennoch ist der Kontaktdruck an den einzelnen Stiften zu niedrig, um ausreichende Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Für derartige Bauelemente wurde der PGAP-Stecksockel (PGAP: pin grid array package) entwickelt, bei dem alle



a)



b)

Abb. 12a–b. Installation eines NiTi-Schrumpfringes.



Kontakte gleichzeitig von einem einzigen Shape-Memory-Element geöffnet oder geschlossen werden. Der Sockel besteht im wesentlichen aus drei Teilen: der Deckplatte, dem Shape-Memory-Treiber und der Bodenplatte. Die CuBe-Kontakte sind in der Bodenplatte mit derselben Matrixkonfiguration angeordnet wie die Führungslöcher in der Deckplatte. Der NiTi-Treiber ist an einem Ende mit der Bodenplatte, am anderen Ende mit der Deckplatte verbunden (Abb. 13). Im Arbeitstemperaturbereich ( $-55^{\circ}\text{C}$  bis  $+125^{\circ}\text{C}$ ) ist die Deckplatte leicht gegen die Bodenplatte verschoben und schließt damit die Kontakte. Mit einem speziellen Montagegerät kann der NiTi-Treiber abgekühlt und nach Unterschreiten der Umwandlungstemperatur gedehnt werden. Dabei werden alle Kontakte geöffnet.

#### 4.3 Zyklische Bewegung (Arbeitsverrichtung)

Um Arbeit zu verrichten, muß ein Shape-Memory-Element eine Bewegung gegen eine einwirkende Kraft ausführen. Dieser Fall wurde bereits in Kapitel 2 bei der Einstellung des Zweiwegverhaltens erläutert. Im Last-Verlängerungs-Diagramm ergibt sich die in Abb. 14 dargestellte Situation am Beispiel einer Shape-Memory-Feder, die mit einer konstanten Last beaufschlagt wird. Ohne Last ist die Feder „auf Block“ gewickelt. Wird die Feder im austenitischen Zustand mit einem Gewicht belastet, so verlängert sie sich entlang A-B. Sie zeigt ein „normales“ Federverhalten. Wird die Feder nun unter die Umwandlungstemperatur abgekühlt, so ist die Last in der Lage, die Feder bis C zu verlängern. Bei Erwärmung zieht sich die Feder wieder auf B zusammen und hebt dabei die Last, d. h. sie verrichtet Arbeit als Zugfeder. Das entsprechende Weg-Temperatur-Diagramm wurde schon in Abb. 4 gezeigt. Selbstverständlich können in gleicher Weise Druckfedern hergestellt werden. Für die technische Nutzung müssen Kraft und Weg (oder Spannung und Dehnung) optimiert werden, um entweder maximale Arbeit bei niedriger Zahl der Arbeitszyklen verrichten zu können oder um eine maximale Lebensdauer (hohe Zyklenzahlen) eines Stellelementes zu erzielen. In Abb. 15 ist die erzielbare Arbeit als Funktion von Spannung und Dehnung für ein NiTi-Stellelement aufgetragen. Für hohe Zyklenzahlen werden jedoch nur geringere Werte erzielt, da Kriech- und Ermüdungseffekte beachtet werden müssen. Das Zweiwegverhalten wird für thermi-

sche und elektrische Stellelemente technisch genutzt. Thermische Stellelemente nehmen Änderungen der Umgebungstemperatur wahr und reagieren bei Überschreiten ihrer Umwandlungstemperatur. Sie vereinen somit Sensor und Stellelement. Sie stehen meist in Konkurrenz zu Thermobimetallen, die Hysteresefreiheit, lineare Bewegung über einen großen Temperaturbereich und höhere Stabilität bieten. Shape-Memory-Elemente zeichnen sich dagegen durch wesentlich größere Stellwege, vielfältige Bewegungsarten und überlegenes Arbeitsvolumen aus [10].

Wegen ihres hohen elektrischen Widerstandes eignen sich NiTi-Legierungen besonders gut für elektrisch aktivierte Stellelemente, die somit interessante Alternativen zu Magnetantrieben und Stellmotoren bieten. Gegenüber diesen sind NiTi-Stellelemente klein und leicht, sie sind wartungsfrei und arbeiten leise [11].

Wegen ihrer guten Miniaturisierbarkeit eignen sich NiTi-Shape-Memory-Elemente gut als Stell- und Auslöseelemente im Bereich der Elektronik. Ein interessantes Beispiel ist der „headlift“ für Plattenlesegeräte, der aus einem dünnen NiTi-Drahtelement und einem trapezförmigen Federbügel besteht. Mit diesem Lift wird ein Aufsitzen des Lesekopfes auf der Platte während der Ruhe- und Anlaufphasen verhindert und somit Reibung und Verschleiß verringert.

Die Verwendung von Shape-Memory-Auslösern in Leitungsschutzschaltern wurde schon vor vielen Jahren diskutiert. Shape-Memory-Elemente weisen gegenüber den heute verwendeter Thermobimetallauslösern einige faszinierende Vorteile auf, wie z. B. großen Weg in engem Temperaturbereich. Wegen der relativ niedrigen Umwandlungstemperaturen erfüllen Shape-Memory-Auslöser bisher allerdings in vielen Fällen nicht die strengen Anforderungen hinsichtlich Überlastbarkeit und Wiedereinschaltgeschwindigkeit.

Bei der Absicherung elektronischer Schaltkreise konnten dagegen die bislang üblichen Glasrohr-Sicherungen durch wieder einschaltbare Shape-Memory-Sicherungsautomaten ersetzt werden. Die Abmessungen dieses Schaltgerätes sind so gewählt, daß die Schalter in die Stecksockel der Glasrohr-Sicherungen passen. Es ist somit kein Umbau der Halter erforderlich. Auch hier wird ein dünner Draht einer NiTi-Legierung als Auslöseelement verwendet.

Die Verwendung von Shape-Memory-Stellelementen zur Herstellung von

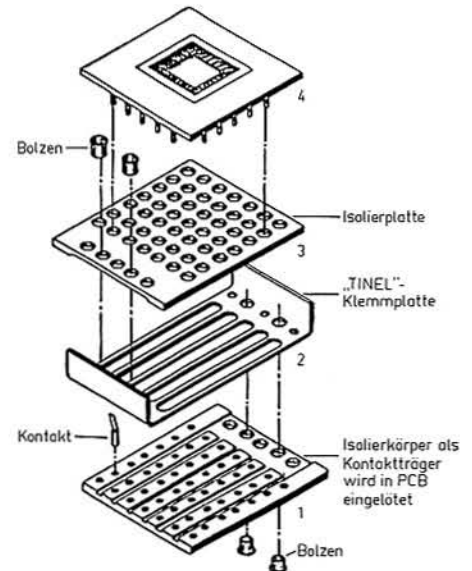


Abb. 13. Pin grid array-Steckverbinder.

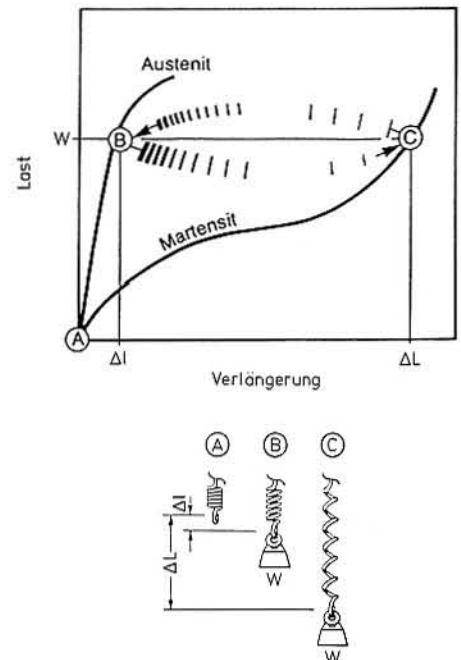


Abb. 14. Wirkungsweise von NiTi-Stellelementen im Last-Verlängerungs-Schaubild.

Wärmekraftmaschinen wird vielfach diskutiert. Hystereseverluste und die hohe Umwandlungswärme bei der Umwandlung Martensit/Austenit führen jedoch zu einem außerordentlich niedrigen Wirkungsgrad. Darüber hinaus müssen Ermüdungseffekte beachtet werden, wenn zur Leistungssteigerung mit hohen Spannungen gearbeitet wird.

## 5 Anwendung superelastischer NiTi-Legierungen

Wie an anderer Stelle bereits erwähnt, kann die Martensitbildung bei einer thermoelastischen martensitischen Um-

wandlung nicht nur durch thermische sondern auch durch mechanische Triebkräfte bewirkt werden. Die mechanische Induzierung erfolgt dabei allerdings nur im Temperaturbereich zwischen Af (der Austenit-finish-Temperatur) und Md (der Temperatur, oberhalb derer keine spannungsinduzierte Martensitbildung mehr auftritt).

Da der spannungsinduzierte Martensit sich nach Wegnahme der verformenden Spannung in Austenit rückumwandelt und das Bauteil damit wieder seine ursprüngliche Gestalt annimmt, wird der Effekt wissenschaftlich Pseudoelastizität genannt. Die Dehnungen, die dabei rückgängig gemacht werden, sind um den Faktor 10 größer als die elastische Dehnung „normaler“ Werkstoffe (wie Stahl etc.), weshalb der Effekt auch Superelastizität genannt wird. Das Kennzeichen der Superelastizität ist der sich an den normalen elastischen (Hook'schen) Bereich anschließende Bereich, in dem ohne nennenswerte Zunahme der Spannung Dehnungswerte bis ca. 8 % erzielt werden (Abb. 16). Nach Wegnahme der verformenden Kraft wird diese Dehnung zwar bei niedrigerer, jedoch wiederum nahezu konstanter Spannung rückgängig gemacht, bis der Hook'sche Bereich erreicht ist. Erst dann nimmt die Spannung proportional zur Dehnung ab. Es können somit „Federn“ hergestellt werden, die unabhängig vom Weg konstante Kraft ausüben. Technisch wird dieser Effekt in großem Umfang bei der Zahnregulierung genutzt. Während orthodontische Bögen aus Stahl oder Chrom-Nickel-Legierungen während der Regulierungsphase wiederholt nachgespannt werden müssen, üben Bögen aus superelastischen NiTi-Legierungen immer eine nahezu konstante Kraft aus und müssen somit nicht nachgespannt werden. Dies hat eine deutliche Verkürzung der Behand-

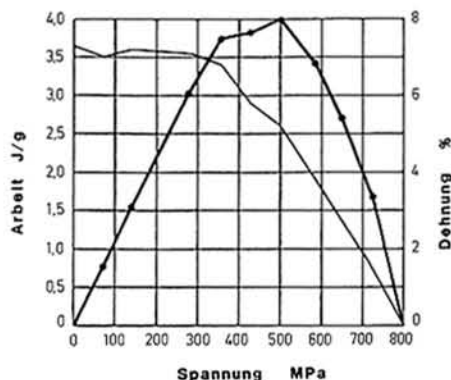


Abb. 15. Arbeit eines NiTi-Stellelementes als Funktion von Spannung und Dehnung (nach [5]).

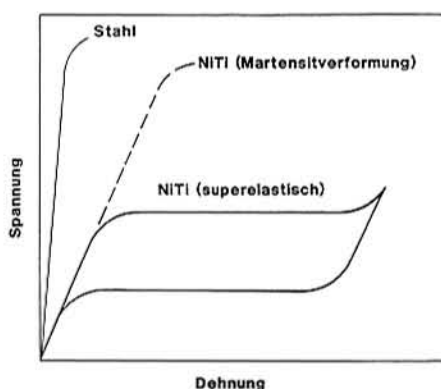


Abb. 16. Vergleich des elastischen Verhaltens von Stahl, einer kaltverformten marten-sitischen NiTi-Legierung und einer pseudo-elastischen NiTi-Legierung (schematisch).

lungsdauer zur Folge. Außerdem muß der Patient die Angschwelle des Zahnarztbesuches weniger oft überwinden.

Weitere Anwendungen des Superelastizitätseffektes in der Medizintechnik sind Knochenklammern und Operationshaken. Bei einem zu Markierungszwecken verwendeten Haken wird ein ursprünglich gebogener NiTi-Draht in eine Hohl-

nadel eingezogen und damit gestreckt. Wird z.B. bei der Mammographie ein Tumor entdeckt, kann die Nadel während der Beobachtung am Röntgensschirm exakt plaziert werden. Der NiTi-Draht wird sodann aus der Nadel geschoben, wobei er in seine ursprüngliche Gestalt zurückkehrt und sich somit in dem Tumor verankert. Bei der anschließenden Operation folgt der Chirurg dem Draht und entfernt den damit lokalisierten Tumor. Die Operation wird dadurch wesentlich vereinfacht.

Für Korsagen und dabei im wesentlichen für drahtverstärkte Büstenhalter werden in jüngster Zeit ebenfalls NiTi anstelle von Stahlbügeln verwendet. Der Tragekomfort soll dadurch deutlich verbessert sein.

Bereits seit einiger Zeit wird NiTi für Brillengestelle verwendet, wobei die Superelastizität vor allem für Augenränder und Bügel Vorteile bringt.

## Literatur

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. of Int. Summer Course on Mart. Transf., KUL (1982), 81.
4. Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: Zwf 78 (1983), 486.
5. Duerig, T. W.; Melton, K. N.: Proc. Int. Symp. SMA, Guilin (1986), 397.
6. Melton, K. N.; Simpson, J. A.; Duerig, T. W.: JCOMAT Nara (1986).
7. Wayman, C. M.; Shimizu, K.: Met. Sci. J. 6 (1972), 175.
8. Flot, R.; McCullough, J.; McGaffigan, T.: Electr. Comp. Conf., New Orleans (1984).
9. Garretson, C.; Stöckel, D.: METALL 41 (1987), 22–25.
10. Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: METALL 41 (1987), 26–32.
11. Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: Zwf 81 (1986), 703.