



We are Nitinol.™

## Nickel-Titan Legierungen

Stoeckel

CAV, August 1987  
pp. 104-106

1987

# Nickel-Titan-Legierungen

Prof. Dr. Dieter Stöckel

## Industrielle Nutzung des Formgedächtniseffektes

Obwohl bereits im Jahre 1932 bei der Abkühlung einer Gold-Kadmium-Legierung ungewöhnliche Veränderungen im Kristallgitter beobachtet wurden, wurde dieses Phänomen erst 1951 als Ergebnis einer martensitischen Umwandlung erkannt. Seit dieser Zeit wurde der Formgedächtnis- oder Shape-Memory-Effekt in mehreren Legierungssystemen gefunden.

Nickel-Titan-Legierungen weisen nicht nur einen ausgeprägten Shape-Memory-Effekt auf, sondern darüber hinaus auch andere wesentliche Eigenschaften wie hohe Festigkeit, Duktilität, niedriges spezifisches Gewicht und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit. Diese Kombination aus Formgedächtnis- und Konstruktionseigenschaften machen Nickel-Titan-Legierungen zu den heute technisch interessantesten Werkstoffen.

### Grundlagen des Shape-Memory-Effektes

Voraussetzung für den Shape-Memory-Effekt ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung, bei der die beteiligten Phasen, Hochtemperaturphase (Austenit) und Niedertemperaturphase (Martensit), geordnete Gitterstrukturen aufweisen. Martensitische Umwandlungen stellen im wesentlichen eine bei Abkühlung auftretende Scherung des Austenitgitters dar. Die Martensitphase tritt in Form unterschiedlich orientierter Platten auf, die sich meist zu Gruppen zusammenschließen.

Bei einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung entstehen und wachsen die Martensitplatten kontinuierlich mit sinkender Temperatur und verschwinden in genau umgekehrter Weise bei Temperaturerhöhung (Abb. 1), wobei stets ein Gleichgewicht zwischen zwei entgegengesetzten Energietermen vorliegt. Treibende Kraft der Umwandlung ist die Differenz der Freien Enthalpie beider Phasen. Diesem Energieterm sind einige Energiebeiträge nichtchemischer Natur entgegen gerichtet, von denen die mit der Phasenumwandlung verbundene elastische Verzerrungsenergie am wichtigsten ist. Der

wesentliche Grund für die Reversibilität des thermoelastischen Martensits ist die Tatsache, daß nur sehr geringe elastische Spannungen bei der Umwandlung auftreten, die praktisch keine irreversible plastische Verformung durch Versetzungsbeugung bewirken. Die Verzerrungen, die beim Wachsen der Martensitplatten entstehen, werden durch Akkomodation der Platten innerhalb einer Gruppe weitgehend abgebaut. Darüber hinaus wird der Verzerrungsabbau durch Zwillingsbildung und Stapelfehler in den einzelnen Martensitplatten unterstützt.

Der Mechanismus des Shape-Memory-Effektes ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die kubisch raumzentrierte Hochtemperaturphase (Austenit) wandelt sich bei Abkühlung in eine verzwilligte Martensitstruktur um. Diese Umwandlung erfolgt diffusionslos durch Scherbewegungen und ist nicht mit einer Gestaltsänderung verbunden. Der Martensit ist durch Verschieben der Zwillingsgrenzen bis zu ca. 8% leicht verformbar. Diese Verformung bleibt bestehen, solange das Material auf tiefer Temperatur gehalten wird (unterhalb der Umwandlungstemperatur). Wird der verformte Martensit jedoch erwärmt, stellt sich bei Überschreiten der

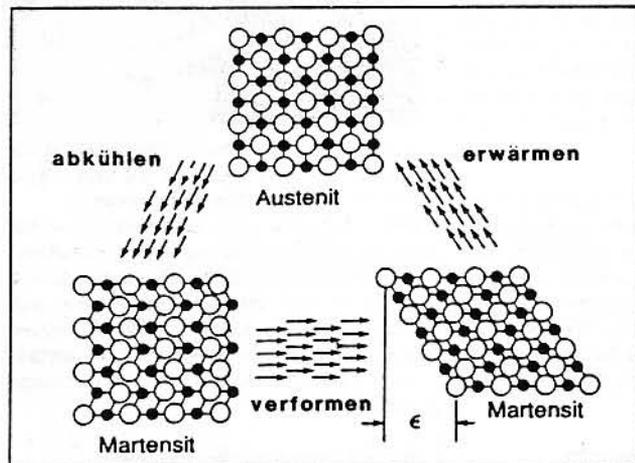


Abb. 1 Schematische Darstellung des Shape-Memory-Effektes

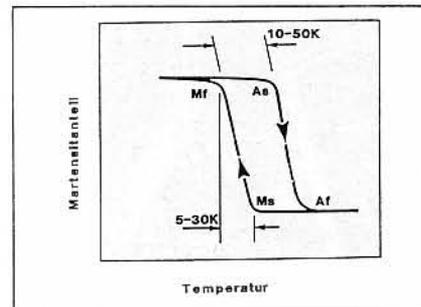


Abb. 2 Temperaturabhängigkeit der martensitischen Umwandlung (schematisch)

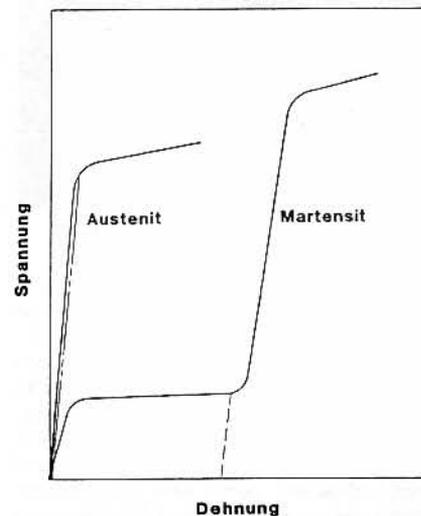


Abb. 3 Verfestigungsverhalten von NiTi im austenitischen und martensitischen Zustand (schematisch)

Umwandlungstemperatur die ursprüngliche Kristallorientierung der Hochtemperaturphase und damit die ursprüngliche Gestalt wieder ein.

Die Umwandlung Austenit/Martensit und die Rückumwandlung Martensit/Austenit findet bei unterschiedlichen Temperaturen statt, d. h. es wird eine Hysterese durchlaufen.

In Abbildung 2 ist der Anteil an Martensit in einer Probe als Funktion der Temperatur schematisch aufgetragen. Die die Umwandlung kennzeichnenden Temperaturen sind Austenit-Start (As) und Austenit-Finish (Af) sowie Martensit-Start (Ms) und Martensit-Finish (Mf). Die beiden Phasen zeigen charakteristische Unterschiede im Festigkeitsverhalten (Abb. 3). Während das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits dem konventioneller Legierungen gleicht, ist das des Martensits recht ungewöhnlich.

Es ist durch das sogenannte Martensitplateau gekennzeichnet, einen Bereich mit sehr geringer Verfestigung. In diesem Bereich erfolgt die Verformung durch Verschieben der Zwillingsgrenzen. Da diese Verformung bei Temperaturerhöhung rückgängig gemacht werden kann, wird sie gelegentlich auch als quasi- oder pseudoplastisch bezeichnet. An das Mar-

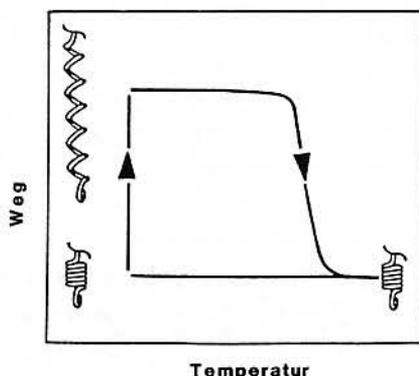


Abb. 4a Einwegeffekt

tensitplateau schließt sich ein zweiter elastischer Bereich an. Bei Erreichen der „wahren“ Streckgrenze erfolgt die plastische Verformung konventionell durch Verformungsbewegung.

### Einstellung des Formgedächtnisses

Wird eine Feder aus einer Nickel-Titan-Legierung im martensitischen (Tieftemperatur) Zustand soweit 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  $A_s$ -Temperatur kehrt die Feder in ihre ursprüngliche Form zurück. Kühlt man nun wieder unter  $M_s$  ab, erfolgt keine Formänderung, sofern keine Kraft einwirkt. Man spricht hierbei vom Einwegeffekt (Abb. 4a).

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 Nickel-Titan-Feder im martensitischen Zustand zu dehnen, jedoch zu schwach, um eine nennenswerte Verlängerung der Feder im austenitischen Zustand zu bewirken. Dieses Zweiwegverhalten ist in Abbildung 4b dargestellt.

### 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

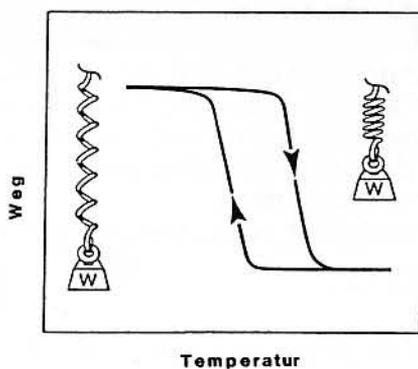


Abb. 4b Zweiwegeffekt

eine genaue Kontrolle der Legierungszusammensetzung und auf extreme Homogenität geachtet werden. Eine Veränderung der Legierungszusammensetzung um nur 0,1 % kann eine Verschiebung der  $A_s$ -Temperatur um 10 K bewirken.

### 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 ohne Wärmeeinwirkung erfolgen muß. Die Legierungen sind im Hinblick auf Austenitfestigkeit optimiert und liefern in einem Anwendungsbereich von  $-65^\circ\text{C}$  bis  $300^\circ\text{C}$  außerordentlich gute Haltekräfte.

### Legierungen mit erweiterter Hysterese

Während cryogene Legierungen nach der Tieftemperaturformgebung auch bei tiefer Temperatur gelagert, transportiert und die entsprechenden Bauteile bei tiefen Temperaturen installiert werden müssen, können Legierungen mit erweiterter Hysterese bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden. Verbindungs- und Befestigungselemente aus diesen Legierungen werden durch Erwärmen auf  $150^\circ\text{C}$  installiert. Nach der Installation bleiben die Legierungen im hochfesten Zustand, auch wenn sie auf Temperaturen bis  $-65^\circ\text{C}$  abgekühlt werden.

### Legierungen für wieder lösbare Verbindungen

Wieder lösbare Verbindungen erfordern Zweiwegverhalten. Durch Entwicklung von Legierungen mit sehr niedriger Martensitfestigkeit und hoher Austenitfestigkeit kann das Zweiwegverhalten mit relativ geringen Rückstellkräften vorteilhaft genutzt werden.

### Binäre Standardlegierungen

Binäre NiTi-Legierungen werden im allgemeinen mit Umwandlungstemperaturen im

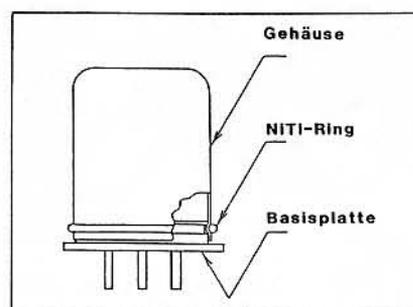


Abb. 5 Anwendung von NITi-Schrumpfringen als Dichtelemente

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 verwendet.

### Anwendungsbeispiele

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 Draht-ringe, die bei Erwärmung radial schrumpfen.

Derartige Ringe werden in großem Umfang für die Befestigung von Abschirmflechten an Steckergehäusen verwendet. Zur Montage wird der Ring über Geflecht und Steckergehäuse geschoben und elektrisch erwärmt. Bei dieser Art der Erwärmung schrumpft der Ring innerhalb von 5 bis 10 s. 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.

Eine weitere Ausführungsform radial schrumpfender Befestigungselemente sind aus NiTi-Bändern hergestellte Ringe. Derartige Ringe werden beispielsweise für die Verbindung von Rohren aus faserverstärktem Kunststoff mit Metallflanschen etc. verwendet.

Draht- oder bandförmige sowie gestanzte Ringe können auch für das gasdichte Verschließen dünnwandiger zylindrischer Gehäuse verwendet werden. Abbildung 5 zeigt einen solchen Anwendungsfall schematisch.

Weitere Informationen **cav-291**