



We are Nitinol.™

Anwendung von NiTi Legierungen mit Formgedächtniseffekt

Stoeckel

Der Zuliefermarkt
Carl-Hanser-Verlag Muenchen
pp. 198-204

1987

Dieter Stöckel, Menko Park, Kalifornien, USA

Neue Werkstoffe

Anwendungen von NiTi-Legierungen mit Formgedächtnis-Effekt

Wird eine Formgedächtnis-Legierung 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. Dieser außergewöhnliche Effekt wurde zu Beginn der fünfziger Jahre als Ergebnis einer martensitischen Umwandlung im System Gold-Kadmium erkannt. Inzwischen wurde der Formgedächtnis-Effekt in mehreren Legierungssystemen entdeckt, wobei die Nickel-Titan- und einige Kupferbasis-Legierungen die heute technisch bedeutsamsten sind. Dieser Beitrag zeigt verschiedene Anwendungsbeispiele.

Applications of NiTi alloys with shape-memory effect. If a shape-memory alloy is permanently reshaped at temperatures below a specific critical temperature, it can „recollect“ its original shape and take it again, if it is heated to a degree above that critical temperature. This extraordinary effect was recognized at the beginning of the fifties as a result of a martensitic conversion in the gold-cadmium system. In the meantime, the shape-memory effect has been discovered in several alloy systems, the nickel-titanium and some copper-based alloys being technically the most significant ones today. This article shows a number of practical examples.

Wie in [1] erläutert, ist der Formgedächtnis-Effekt bestimmt durch die Dimensionen Spannung, Dehnung und Temperatur. Innerhalb dieses „Raumes“ können seine Anwendungen in drei grundsätzlich verschiedene Gruppen eingeteilt werden, innerhalb derer unterschiedliche Konstruktionsparameter und Legierungseigenschaften erforderlich werden [2].

1 Freies Formgedächtnis

Das freie Formgedächtnis ist der einfachste Fall der Nutzung. Der gesamte Vorgang besteht aus den Teilvorgängen Martensitverformung und Erwärmung über die A_T -Temperatur, um die ursprüngliche Gestalt wieder einzustellen (Bild 1). Die wesentlichen Größen sind die Gesamtdehnung ϵ_f , die plastische Dehnung ϵ_p und die zuweilen als „Gedächtnisschwund“ (amnesia) bezeichnete Enddehnung ϵ_f . Das Formgedächtnis selbst ergibt sich aus $\epsilon_p - \epsilon_f$. Mit zunehmender Gesamtdehnung nehmen auch ϵ_p und ϵ_f 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 [3].

2 Unterdrücktes Formgedächtnis (Kraftentwicklung)

Wird eine im martensitischen Zustand verformte Probe daran gehindert, bei Erwärmung über A_s in ihre ursprüngliche

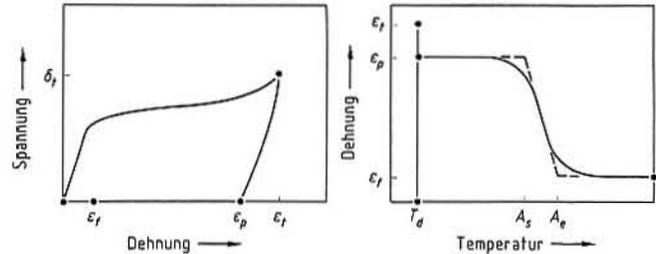


Bild 1. Freies Formgedächtnis [2] im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (links) und Dehnungs-Temperatur-Diagramm (rechts). A_f Austenitumwandlung-Ende, A_s Austenitumwandlung-Start, T_d Umformtemperatur (ϵ im Text erläutert)

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 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. Bild 2A zeigt dieses Verhalten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Relevante Größen sind nun ϵ_c , die

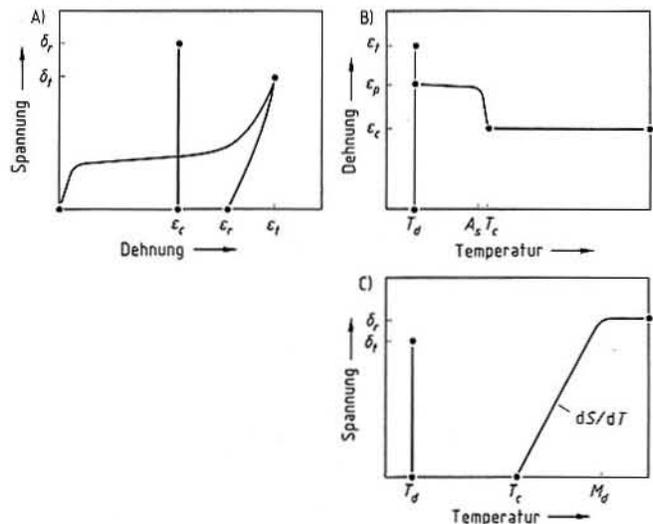


Bild 2. Unterdrücktes Formgedächtnis [2], A) Spannungs-Dehnungs-Diagramm, B) Dehnungs-Temperatur-Diagramm, C) Spannungs-Temperatur-Diagramm (Symbole in Bild 1 und im Text erläutert)

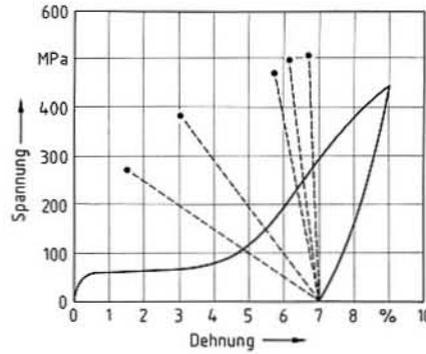
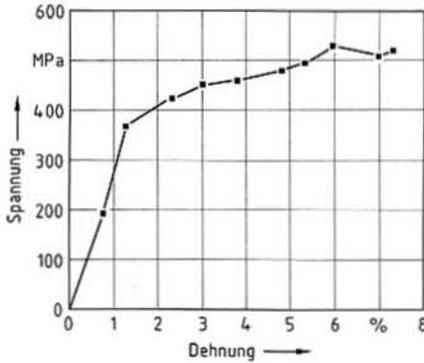


Bild 3 (links). Spannung in einem NiTi-Schrumpfelement als Funktion der Kontaktdehnung [2]

Bild 4 (rechts). Spannung in einem NiTi-Schrumpfelement bei verschiedenen Substratwerkstoffen [2]

Dehnung, bei der der Ring die Welle berührt und σ_r , die Spannung, die durch die unterdrückte Gestaltsänderung aufgebaut wird. Im Dehnungs-Temperatur-Diagramm (Bild 2B) erscheint der Anteil der freien Formänderung ($\epsilon_p - \epsilon_c$), sowie die Temperatur, bei der der erste Kontakt Ring/Welle zustande kommt.

Wichtig ist die Temperaturabhängigkeit der Spannung (Bild 2C). Sobald der Ring die Welle berührt, ergibt sich eine lineare Zunahme der Spannung mit steigender Temperatur, bis bei M_d 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 (Bild 3). Für die praktische Anwendung von Schrumpfverbindungen bedeutet dies, daß vom gesamten Formgedächtnis-Effekt 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“ σ_r ist damit von den mechanischen Eigenschaften des Substratwerkstoffes abhängig. In Bild 4 ist dies schematisch für die Verformung von Substraten mit unterschiedlichen elastischen Eigenschaften dargestellt.

2.1 Befestigungs- und Dichtelemente

Wegen der großen erzielbaren Formänderung eignen sich NiTi-Formgedächtnis-Elemente in einer Vielzahl verschiedener Konfigurationen hervorragend als Befestigungs- und Dichtelemente. Dies gilt vor allem für Elemente aus Legierungen mit erweiterter Hysterese [1]. 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 (Bild 5). Dabei schrumpft der Ring innerhalb 5 bis 10 s. 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 in nahezu beliebigen Durchmessern hergestellt werden. Für kleine Abmessungen (Innendurchmesser < 10 mm) ist die Verwendung gestanzter Ringe allerdings vorteilhafter. Darüber hinaus bieten gestanzte Ringscheiben eine ebene Auflagefläche. Bild 6 zeigt neben geschweißten Ringen NiTi-Scheiben, die auf eine Stahlwelle aufgeschumpft wurden. Gegenüber der konventionellen Aufschumpftechnik, die auf der thermischen Ausdehnung des aufzubringenden Elementes beruht, bieten Formgedächtnis-Elemente einen um Größenordnungen größeren Schrumpfweg, wodurch die Montage deutlich erleichtert wird. Darüber hinaus erfolgt der Zusammenbau bei Raumtempera-

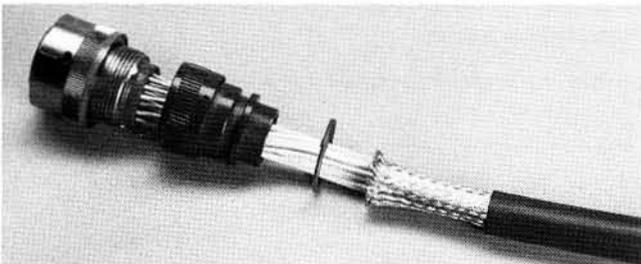


Bild 5. Anwendung von NiTi-Schrumpfringen zur Befestigung von Abschirmgeflecht



Bild 6. NiTi-Schrumpfscheiben und -ringe

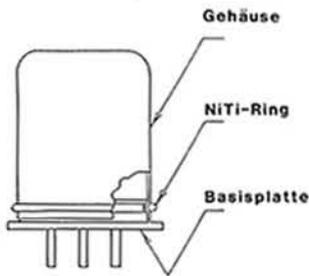


Bild 7. Anwendung von NiTi-Schrumpfringen als Dichtelemente [4]

tur und ohne den durch Erwärmung oder Abkühlung der zu verbindenden Bauteile verursachten Zeitdruck [4].

Aus NiTi-Bändern hergestellte Ringe werden z.B. 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. Bild 7 zeigt einen solchen Anwendungsfall schematisch. Durch entsprechende Gestaltung der Basisplatte aus Metall, Keramik oder Kunststoff wird eine ausgezeichnete Gasdichtigkeit erzielt. Bei der Verbindung eines Aluminiumgehäuses mit ca. 35 mm Durchmesser mit einer Basisplatte aus Aluminium wurde eine Leckrate von weniger als $1,8 \times 10^{-8}$ ccm He/s gemessen (Auflösungsgrenze des Meßgerätes).

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

Auf dem Gebiet der Verbindungstechnik konkurrieren die Formgedächtnis-Elemente mit konventionellen Techniken, wie thermisches Schrumpfen, Kleben, Lötten, Schweißen etc. Gegenüber diesen Techniken bietet sie 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).

2.2 Steckverbinder

Steckverbinder für die Befestigung elektronischer Bauelemente auf Leiterplatten sollen einerseits eine niedrige Einsteckkraft, andererseits jedoch einen größtmöglichen Kontaktdruck aufweisen. Die sich offenbar widersprechenden Forderungen können durch Formgedächtnis-Kontakte erfüllt werden [5]. Dieser Steckverbinder besteht aus dem eigentlichen Kontakt aus einem Federwerkstoff (CuBe) und dem NiTi-Element, das den Kontakt umschließt (Bild 8). Bei Raumtemperatur befindet sich das NiTi-Element im hochfesten Zustand (Austenit) und kann somit den Kontaktpalt schließen. Wird diese Anordnung unter -65°C abgekühlt, übersteigt die Federkraft des Kontaktes die Haltekraft des Formgedächtnis-Elementes, das nun im niederfesten Zustand vorliegt. Der Kontakt öffnet somit. Der Cryocon-Steckverbinder hat sich millionenfach im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik bewährt.

Eine neuere Version dieses Steckverbinders ist der Cryotact-Steckverbinder (Bild 9), bei dem sowohl Kontakt als auch Formgedächtnis-Element als Stanzteile ausgebildet sind. Diese Kontakte finden in Stecksockeln für DIPs (dual in-line

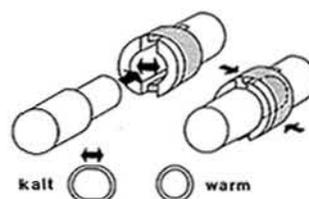


Bild 8. Aufbau, Funktion und Temperaturabhängigkeit der Festigkeit des CuBe-Kontakts und des NiTi-Klemmrings eines Cryocon bzw. Cryotact-Steckers

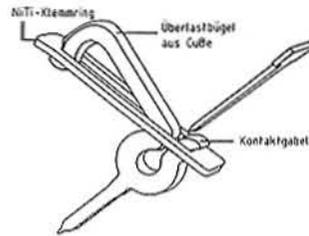
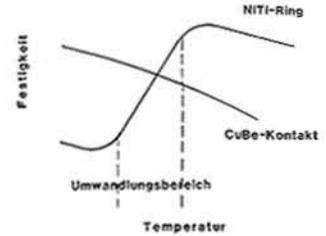
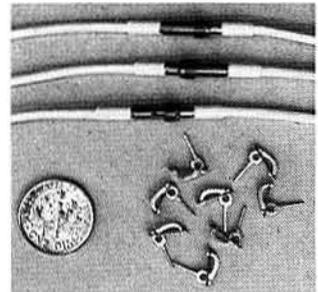


Bild 9. Cryotact-Steckverbinder



packages) etc. Verwendung. Durch die spezielle Gestaltung des Kontaktes können auch größere Toleranzen des Durchmessers der IC-Beinchen ausgeglichen werden.

Modifizierte Cryotact-Kontakte werden für Flachbandkabel und Steckkarten-Steckverbinder verwendet (Bild 10). Höchstintegrierte SI-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) (Bild 11) entwickelt, bei dem alle Kontakte gleichzeitig von einem einzigen Shape-Memory-Element geöffnet oder geschlossen werden. Der Sockel besteht im wesentlichen aus drei Teilen: der Deckplatte, dem Formgedächtnis-Treiber und der Bodenplatte. Die CuBe-Kontakte sind in der Bodenplatte mit derselben Matrixkonfiguration angeordnet wie die Führungslöcher in der Deckplatte. Der Ni-Ti-Treiber ist an einem Ende mit der Bodenplatte, am anderen Ende mit der Deckplatte

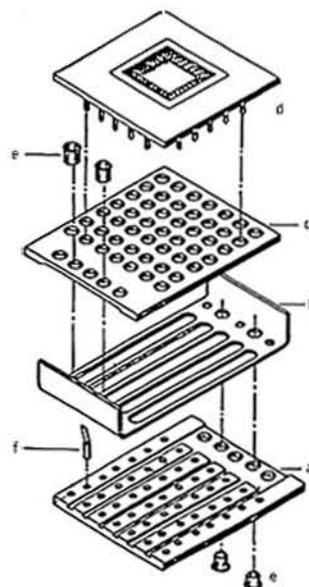


Bild 10. Flachleitersteckverbinder

Bild 11. Pin-grid-array-Steckverbinder
a Isolierkörper als Kontaktträger in die Leiterplatte gelötet, b Klemmplatte, c Isolierplatte, d Chip-Carrier, e Bolzen, f Kontakt

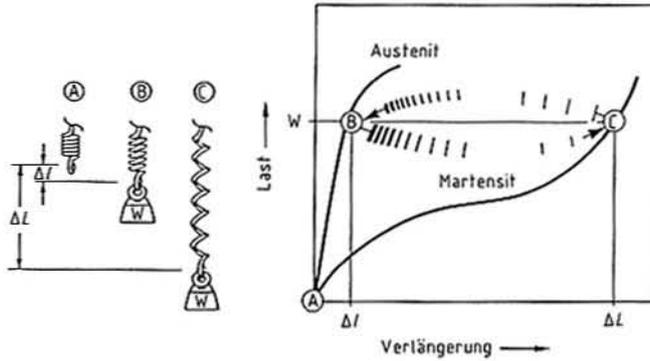


Bild 12. Wirkungsweise von NiTi-Stellelementen im Last-Verlängerungs-Diagramm

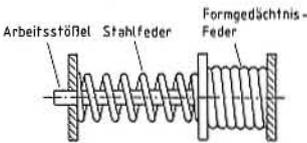


Bild 13. Einfacher Aufbau eines Stellelements

verbunden. Im Arbeitstemperaturbereich (-55 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.

3 Zyklische Bewegung (Arbeitsverrichtung)

Um Arbeit zu verrichten, muß ein Formgedächtnis-Element eine Bewegung gegen eine einwirkende Kraft ausführen. Im Last-Verlängerungs-Diagramm ergibt sich die in Bild 12 dargestellte Situation am Beispiel einer 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, 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. Selbstverständlich können in gleicher Weise Druckfedern hergestellt werden. Bild 13 zeigt eine mögliche Konfiguration, bei der eine Formgedächtnis-Druckfeder gegen eine Stahlfeder als Rückstellelement arbeitet [6].

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 Bild 14 ist

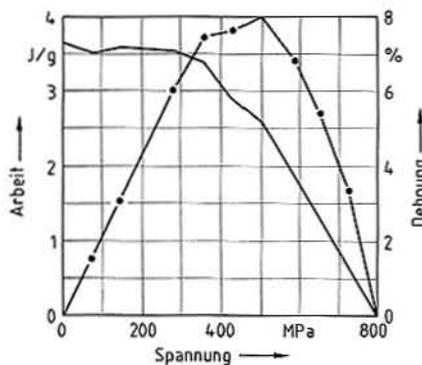


Bild 14 (links). Arbeit eines NiTi-Stellelements als Funktion von Spannung und Dehnung [2]

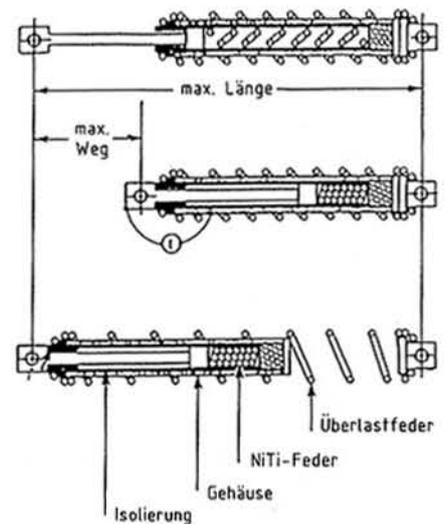
Bild 15 (rechts). NiTi-Stellelement mit Überlastschutzfeder [8]

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 thermische und elektrische Stellelemente technisch genutzt. Thermische Stellelemente nehmen Änderungen der Umgebungstemperatur wahr und reagieren bei Überschreiten ihrer Umwandlungstemperatur. Sie vereinen somit Sensor und Stellelement. Die meisten bekannt gewordenen Anwendungen dieser Art verwenden Legierungen auf Kupferbasis (z.B. Brandschutzelemente, Fensteröffner etc.) [7]. Sie stehen meist in Konkurrenz zu Thermobimetallen, die Hysteresefreiheit, lineare Bewegung über einen großen Temperaturbereich und höhere Stabilität bieten. Formgedächtnis-Elemente zeichnen sich dagegen durch wesentlich größere Stellwege, vielfältige Bewegungsarten und überlegenes Arbeitsvolumen aus.

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. Bild 15 zeigt ein solches Stellelement, das im wesentlichen aus einer bei hoher Temperatur auf Block gewickelten NiTi-Feder, einer Messinghülse und einer Überlastfeder besteht. Die Umwandlungstemperatur der NiTi-Feder liegt bei ca. 60°C . Bei Raumtemperatur kann somit eine äußere Last (oder Zugkraft) die NiTi-Feder verlängern und den Stößel nach außen ziehen. Für die Aktivierung wird die NiTi-Feder durch direkten Stromdurchgang erwärmt. Sie zieht sich dabei auf den Blockzustand zusammen und leistet dabei Arbeit. Dieses Element wurde für die Betätigung von Steinschlag-schutzlamellen von Nebelscheinwerfern entwickelt. Für den Fall, daß die Bewegung der Schutzlamellen verhindert wird (z.B. durch Vereisung) hat das Stellelement eine Stahlüberlastfeder [8].

Wegen ihrer guten Miniaturisierbarkeit eignen sich NiTi-Elemente gut als Stell- und Auslöseelemente im Bereich der Elektronik. Ein interessantes Beispiel ist der Kopflift in Bild 16 für Plattenlesegeräte, der aus einem dünnen NiTi-Drahtelement und einem trapezförmigen Federbügel besteht [9]. In herkömmlichen Plattenspeichern „fliegt“ der Lesekopf in geringem Abstand über die Plattenoberfläche. Der erforderliche Auftrieb wird durch aerodynamische Kräfte erzeugt, die wiederum durch die Relativbewegung zwischen dem stationären Lesekopf und der sich schnell drehenden Platte zustande



kommen. Bei stillstehender Platte sitzt der Lesekopf auf der Plattenoberfläche auf, wofür bei einigen Geräten spezielle „Landebahnen“ vorgesehen sind. Die Start- bzw. Anlaufphase wird durch die nun vorhandene Reibung zwischen Lesekopf und Plattenoberfläche erheblich erschwert. Das Anlaufdrehmoment kann 100 bis 200% größer sein als das Drehmoment bei Dauerlauf. Die Feder des Formgedächtnis-Kopflifts ist so konstruiert, daß sie den Lesearm während der Ruhephasen um weniger als 1 mm von der Plattenoberfläche anhebt. Wenn die Platte ihre Arbeitsgeschwindigkeit erreicht hat, wird der mit dem Federbügel ihres Lifts verbundene NiTi-Draht durch Stromdurchgang erwärmt. Die dazu notwendige Energie ist wegen des sehr geringen Drahtdurchmessers (0,2 mm) außerordentlich gering. Bei Überschreiten der Umwandlungstemperatur verkürzt sich der NiTi-Draht und trennt dabei den Federbügel vom Tonarm, der nun unbehindert „fliegen“ kann (Bild 32).

Bei der Absicherung elektronischer Schaltkreise können die bislang üblichen Glasrohr-Sicherungen durch wieder einschaltbare Formgedächtnis-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.

4 Zusammenfassung

Da die mit dem Formgedächtnis verbundene temperaturabhängige Gestaltsänderung die „normale“ thermische Ausdehnung um Größenordnungen übertrifft, und da während der Rückumwandlung erhebliche Kräfte entwickelt werden, kann der Effekt für eine Vielzahl technischer Problemlösungen genutzt werden. Es sind heute Anwendungen bekannt, die von der Raumfahrttechnik und Elektronik über Medizin und Feinwerktechnik bis zu Damenunterwäsche und Spielwaren reichen. 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 Formgedächtnis-Legierungen im Gegensatz zu Thermobimetallen verschiedene Bewegungsarten (Verlängerung, Verkürzung, Biegung, Torsion sowie

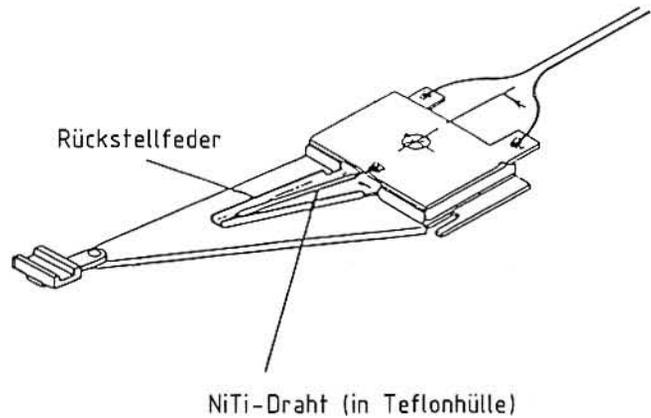


Bild 16. Lesekopf-Lift für einen Plattenspeicher

Durchmesser verkleinern oder -vergrößern) durchführen können, und dazu nur geringe Temperaturänderungen erforderlich sind, sind sie als Stellelemente für viele Regel-, Steuer- und Stellaufgaben geeignet.

Literatur

- 1 Stöckel, D.: Der Formgedächtniseffekt von Nickel-Titan-Legierungen. *Feinwerk. u. Messtechn.* 95 (1987) 4
- 2 Duerig, T.W.; Melton, K.N.: *Proc.Int.Symp. SMA*, Guilin (1986) S. 397
- 3 Wayman, C.M.; Shimizu, K.: *Met.Sci.J.* 6 (1972) S. 175
- 4 Dietemann, C.: *Machine Design* (1986) S. 74
- 5 Garretson, C.; Stöckel, D.: *Metall* 41 (1987)
- 6 Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: *Konstr.Entw.Design* (1984) 9, S. 46
- 7 Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: *ZWF CIM* 81 (1986) 12, S. 703-708
- 8 Yaeger, J.R.: *Mech.Eng.* 106 (1984) S. 51
- 9 Yaeger, J.R.: *Design News* (1986) 10, S. 188

Der Autor dieses Beitrags

Professor Dr. rer. nat. *Dieter Stöckel*, geboren 1944, Studium der Hütten- und Metallkunde in Berlin und Stuttgart, war seit 1969 Mitarbeiter der Firma G. Rau GmbH & Co, Pforzheim, Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung, und ist Honorarprofessor der Fachhochschule für Technik, Aalen. Er arbeitet jetzt bei der Raychem Corporation, Menlo Park, CA, USA, als Leiter der Verfahrenstechnik.