

Anwendung von Memory-Legierungen in elektrischen Schaltgeraeten

Tautzenberger, Stoeckel

Metall Wissenschaft & Technik
39. Jahrgang, Heft 1, Januar
pp. 34-38

1985

Anwendung von Memory-Legierungen in elektrischen Schaltgeräten¹⁾

Dr. P. TAUTZENBERGER und Prof. Dr. D. STÖCKEL
Mitteilung der Firma G. RAU GmbH & Co., Pforzheim

In den letzten Jahren hat eine spezielle Legierungsgruppe Aufsehen erregt, die sich durch den sogenannten Formgedächtniseffekt auszeichnet. Wird eine solche Legierung bei tiefer Temperatur bleibend verformt, so „erinnert“ sie sich bei Erwärmung über eine kritische Temperatur an ihre ursprüngliche Form und nimmt diese wieder ein. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den Eigenschaften sowie einigen Anwendungsmöglichkeiten von NiTi-, Cu-Zn-Al- und Cu-Al-Ni-Formgedächtnislegierungen in elektrischen Schaltgeräten.

In the last years considerable attention has been devoted to a special group of alloys, which exhibit the so-called shape memory effect. If a shape memory alloy undergoes a certain permanent deformation at low temperature it reverts to its original shape on heating to some higher temperature. The present paper deals with the properties and some possible applications of NiTi, Cu-Zn-Al and Cu-Al-Ni shape memory alloys in switchgear technology.

1 Einleitung

Unter dem Begriff Memory- oder Formgedächtnis-Legierungen sind verschiede-

dene Legierungen bekanntgeworden, die nach geeigneter Behandlung aufgrund einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung ihre Gestalt in Abhängigkeit von der Temperatur ändern.

Bei einer thermoelastischen martensiti-

schen Umwandlung entstehen und wachsen die Martensitplatten kontinuierlich mit sinkender Temperatur, und sie verschwinden genau in umgekehrter Weise bei Temperaturerhöhung, wobei stets ein Gleichgewicht zwischen zwei entgegengesetzten Energietermen vorliegt. Als treibende Kraft der Umwandlung wirkt die Differenz der Freien Enthalpie beider Phasen. Diesem Energieterm sind einige Energiebeiträge nichtchemischer Natur entgegengerichtet, von denen die mit der Phasenumwandlung verbundene elastische Verzerrungsenergie am wichtigsten ist [1, 2].

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 Versetzungsbewegung 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 [1].

Die meisten Formgedächtnis-Legierungen gehören zur Gruppe der sogenannten β -Phase-Legierungen, bei denen eine Umwandlung von einer geordneten

kubisch raumzentrierten Struktur in Martensit mit einer bestimmten Stapelfolge stattfindet. Als Beispiel seien die Strukturumwandlungen von B2 nach 9R sowie DO₃ nach 18R genannt [2]. Auf einige technisch anwendbare Formgedächtnis-Legierungen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so erfolgt lediglich eine reversible Martensitverformung durch Verschieben von hochbeweglichen Grenzflächen wie Zwillingsgrenzen in einzelnen Martensitvarianten oder Grenzflächen zwischen benachbarten Martensitvarianten. Bei Erwärmung einer reversibel verformten Probe verschwindet der Martensit, und es entstehen die ursprünglichen Kristallorientierungen der Hochtemperaturphase, womit zwangsläufig eine Formrückkehr verbunden ist.

Der Mechanismus des Formgedächtniseffektes ist in vereinfachter Weise in Abb. 1 dargestellt. Abb. 1a zeigt einen Einkristall einer Formgedächtnislegierung in der Hochtemperaturphase, der sich beim Abkühlen in eine verzwillingte Martensitstruktur ohne makroskopische Formänderung umwandelt (Abb. 1b). Durch Einwirkung einer ausreichenden Spannung erfolgt eine bleibende Verformung durch Bewegen von Zwillingsgrenzen (Abb. 1c). Beim Erwärmen über eine bestimmte Temperatur kehrt die Probe aufgrund der Reversibilität der thermoelastischen martensitischen Umwandlung zu ihrer ursprünglichen Form zurück (Abb. 1d) [2].

Neben dem Formgedächtniseffekt zeigen Formgedächtnislegierungen unter bestimmten Bedingungen weitere interessante Eigenschaften wie superelastisches Verhalten und hohes Dämpfungsvermögen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen werden Bauteile aus Memorylegierungen bis heute in der Elektrotechnik und speziell bei elektrischen Schaltgeräten noch nicht eingesetzt. Die vorliegende Arbeit beschreibt daher im wesentlichen einige Möglichkeiten der Anwendung von Bauteilen mit Formgedächtniseffekt, Superelastizität und speziellem Dämpfungsverhalten.

2 Einweg- und Zweiwegeeffekt

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so findet lediglich reversible Martensitverformung statt. Beim Erwärmen erfolgt eine Umwandlung in die Hochtemperaturphase,

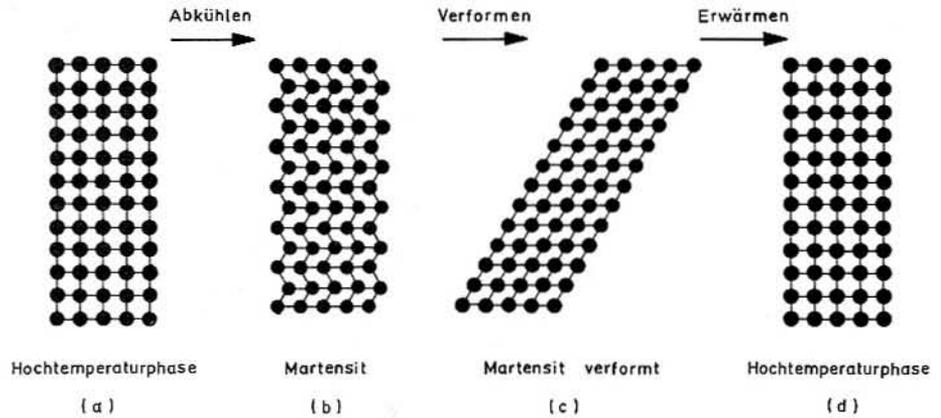


Abb. 1. Schematische Darstellung des Formgedächtniseffektes.

mit der die Einstellung der ursprünglichen Probenform einhergeht. Da eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt, spricht man hier vom sogenannten Einwegeffekt. Die Induzierung dieses Einwegeffektes kann nahezu beliebig oft wiederholt werden, sofern die jeweilige Martensitverformung klein ist. Bei etwas höheren Verformungen ist infolge irreversibler Anteile allmählich mit einer unvollständigen Formrückkehr zu rechnen.

Beim Erwärmen eines Elementes mit Einwegeffekt erfolgt zunächst keine Bewegung. Erst beim Erreichen der sogenannten A_s -Temperatur beginnt die Formänderung, wobei die gesamte Effektfaltung in einem kleinen Temperaturbereich, zum Beispiel 10 bis 20 K, erfolgt. Die A_s -Temperatur kann je nach Legierungssystem zwischen etwa -150°C und $+150^\circ\text{C}$ liegen. Innerhalb dieses Bereiches können beliebige A_s -Werte durch die Legierungszusammensetzung gezielt eingestellt werden. Richtwerte für die maximalen A_s -Temperaturen sowie die Größe des Einweg-

effektes technisch anwendbarer Legierungsgruppen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Überschreitet die Verformung einer Memory-Legierung im martensitischen Zustand einen bestimmten Betrag, so tritt neben reversibler Martensitverformung auch irreversible plastische Verformung auf, wobei eine bestimmte Versetzungsstruktur erzeugt wird. Bei Erwärmung wird zunächst der reversible Anteil der Martensitverformung rückgängig gemacht, wodurch eine Formänderung in Richtung der Ausgangsform stattfindet. Beim Abkühlen bilden sich unter dem Einfluß des Spannungsfeldes der Versetzungen bevorzugte Martensitvarianten, welche die Entstehung einer bestimmten Niedertemperaturform bewirken. Somit „erinnert“ sich die Probe sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Niedertemperaturform. Dieser Formänderungsvorgang wird als Zweiwegeeffekt bezeichnet und bleibt über hohe Zyklenzahlen erhalten [2].

Die Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweiwegeeffekt ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Ähnlich wie beim Einwegeffekt beginnt auch hier die Formänderung bei Erwärmung erst bei der sogenannten A_s -Temperatur. Bei weiterem Aufheizen erfolgt dann die gesamte Formänderung in einem kleinen Temperaturintervall (zum Beispiel 20 K). Die Temperatur-Weg-Abhängigkeit weist eine Hysterese auf, deren Größe durch geeignete Maßnahmen beeinflusst werden kann.

Die Maximalwerte des Zweiwegeeffektes technisch anwendbarer Legierungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Auf die Möglichkeit der gezielten Einstellung von A_s -Temperaturen sowie auf die maximalen A_s -Werte wurde bereits hingewiesen. Zwei Beispiele für Elemente mit Zweiwegeeffekt sind in Abb. 3 zu sehen.

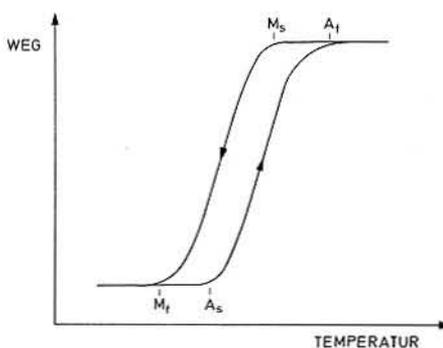


Abb. 2. Temperatur-Weg-Kennlinie eines Memory-Elementes mit Zweiwegeeffekt. A_s und A_f : Temperatur, bei der die Formänderung beim Erwärmen beginnt bzw. beendet ist. M_s und M_f : Temperatur, bei der die Formänderung beim Abkühlen beginnt bzw. beendet ist.

Tabelle 1: Eigenschaften technisch anwendbarer Memory-Legierungen.

	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Dichte (g/cm ³)	6,4 – 6,5	7,8 – 8,0	7,1 – 7,2
Elektrische Leitfähigkeit (10 ⁶ $\frac{S}{m}$)	1 – 1,5	8 – 13	7 – 9
Zugfestigkeit (N/mm ²)	800 – 1000	400 – 700	700 – 800
Bruchdehnung (%)	40 – 50	10 – 15	5 – 6
Maximale A _s -Temperatur (°C)	120	120	170
Maximaler Einwegeffekt (%)	8	4	5
Maximaler Zweiwegeffekt (%)	5	1*)	1,2
Überhitzbarkeit bis (°C)	400	160	300

*) 1 % bedeutet bei einem einseitig eingespannten Biegeelement mit einer Dicke von 1 mm und einer freien Länge von 50 mm eine Ausbiegung von annähernd 25 mm am freien Ende.

Bauteile mit Zweiwegeffekt dürfen nur in begrenztem Maße überhitzt werden (Tab. 1). Starke Überhitzungen führen zu Gefügeveränderungen, wodurch in bestimmten Fällen eine Effektverminderung sowie eine Verschiebung des Nullpunktes und der Schalttemperatur auftreten kann. Eine Beeinträchtigung des Formgedächtniseffektes ist auch dann zu erwarten, wenn ein Element sehr hohen Spannungen ausgesetzt wird, so daß irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung erfolgt. Bauteile mit Memory-Effekt haben aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ein großes praxisbezogenes Interesse hervorgerufen. Für technische Anwendungen sind bislang jedoch erst die drei Legierungsgruppen NiTi, Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni geeignet.

Als Prototyp der technisch anwendbaren Formgedächtnislegierungen gilt Nickel-Titan mit annähernd stöchiometrischer Zusammensetzung. Unter dem Namen Nitinol wurde dieser Werkstoff vor rund 20 Jahren in den USA entwickelt [3]. Nickel-Titan zeichnet sich unter anderem durch einen besonders großen Ein- und Zweiwegeffekt, eine relativ hohe Überhitzbarkeit sowie eine her-

vorragende Korrosionsbeständigkeit aus. Als Nachteile gelten vor allem die schlechte Zerspanbarkeit sowie der hohe Preis.

Als zweite Generation der Memory-Legierungen wurden in den letzten Jahren die wesentlich billigeren Kupferbasislegierungen Cu-Zn-Al entwickelt [4], die jedoch eine schlechtere Korrosionsbeständigkeit und eine geringe Überhitzbarkeit aufweisen.

Vor etwa zwei Jahren wurden die Kupferbasislegierungen Cu-Al-Ni entwickelt [5], mit denen erhöhte Schalttemperaturen und hohe Überhitzbarkeit erreicht werden können. Nachteile stellen hier die geringe Duktilität sowie die schlechte Zerspanbarkeit dar.

Einige physikalische und mechanische Eigenschaften sowie die Memory-Daten der drei Legierungsgruppen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Die aufgeführten Eigenschaften hängen von verschiedenen Einflußgrößen ab und wurden daher durch Wertespanspannen oder Maximalwerte angegeben.

Bauteile aus Formgedächtnislegierungen können den Einweg- oder den Zweiwegeffekt aufweisen und zeichnen sich durch folgende Besonderheiten aus:

- Große Arbeitsleistung pro Volumeneinheit.
- Vollständige Arbeitsverrichtung in einem kleinen Temperaturintervall.
- Möglichkeit zur Durchführung verschiedener Bewegungsarten (Zug, Druck, Biegung, Torsion).
- Der Formänderungseffekt kann auf bestimmte Elementbereiche beschränkt werden.

In Abb. 4 sind Beispiele möglicher Ausführungsformen von Memory-Elementen dargestellt.

Die ersten Anwendungen von Memory-Bauteilen beruhen auf dem Einwegeffekt. Hierzu zählen beispielsweise Verbindungselemente wie Schrumpfringe und Klammern. In den letzten Jahren sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten bekannt geworden, bei denen Elemente mit Zweiwegeffekt verwendet werden: Thermostalter für die Elektrotechnik, Thermostatventile für Heizungen, Lüfterkupplungen für Motoren, Drosselvorrichtungen für Einspritzpumpen u. a. [6].

Abb. 5 zeigt in schematischer Darstellung die Anwendung des Zweiwegeffektes bei einem Steckverbinder. Es handelt sich hierbei um den sogenannten Crycon-Stecker, der sowohl die Eigenschaften einer permanenten als auch einer lösbaren Verbindung in sich vereint [7]. Die Buchse besteht aus einem gewöhnlichen Werkstoff und hat zwei Zinken, die eine Aufweitung aufweisen. Ein Memory-Ring mit Zweiwegeffekt ermöglicht ein einfaches und zuverlässiges Schließen und Lösen der Verbindung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Eine andere Anwendungsmöglichkeit für den Zweiwegeffekt betrifft das Gebiet der thermischen Schutzschalter, die einen elektrischen Stromkreis im Falle von Überstrom unterbrechen. Die

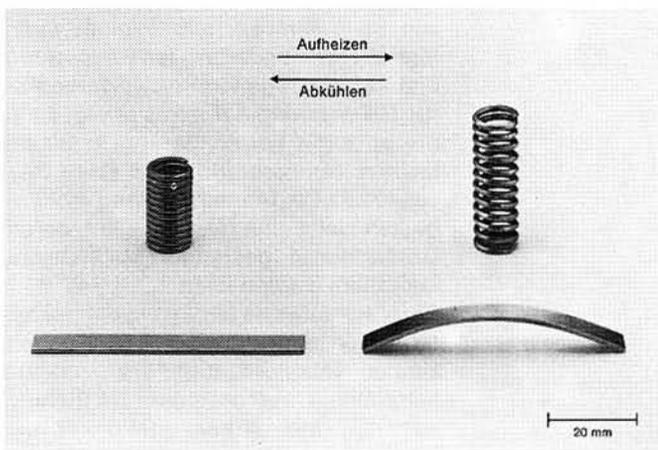


Abb. 3. Druckfeder und Biegestreifen mit Zweiwegeffekt aus einer Cu-Zn-Al-Legierung (A_s ≈ 65°C, A_i ≈ 80°C, M_s ≈ 65°C, M_i ≈ 50°C).

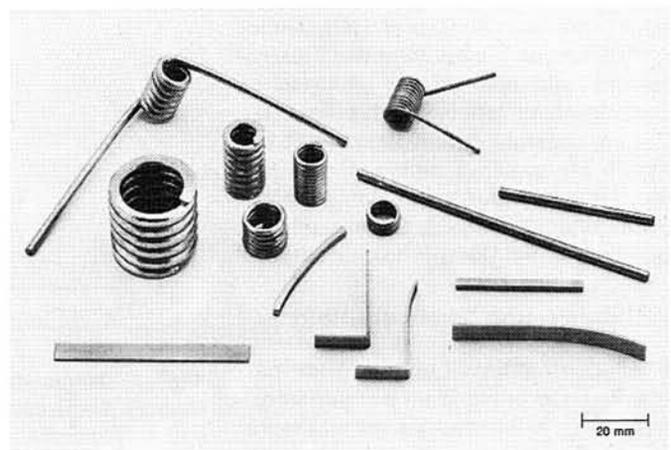


Abb. 4. Beispiele möglicher Ausführungsformen von Memory-Elementen (dargestellt sind sogenannte MEMOTAL-Elemente aus dem Hause G. RAU GmbH & Co., Pforzheim).

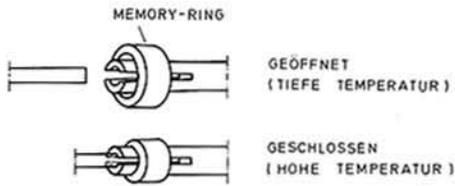


Abb. 5. Stecker mit Zweiweg-Memoryring (sogenanntes Cryocon-Prinzip nach [7]).

Abb. 6a und b zeigen schematisch einen derartigen Schalter. Hier dient ein Memory-Element als Kontaktträger, während eine elastische Gegenfeder für den nötigen Kontaktdruck sorgt. Im Falle einer Überhitzung biegt sich das Memory-Element aus und unterbricht den Stromkreis. Sobald die Störung beseitigt ist und die Temperatur absinkt, wird der Stromkreis wieder geschlossen.

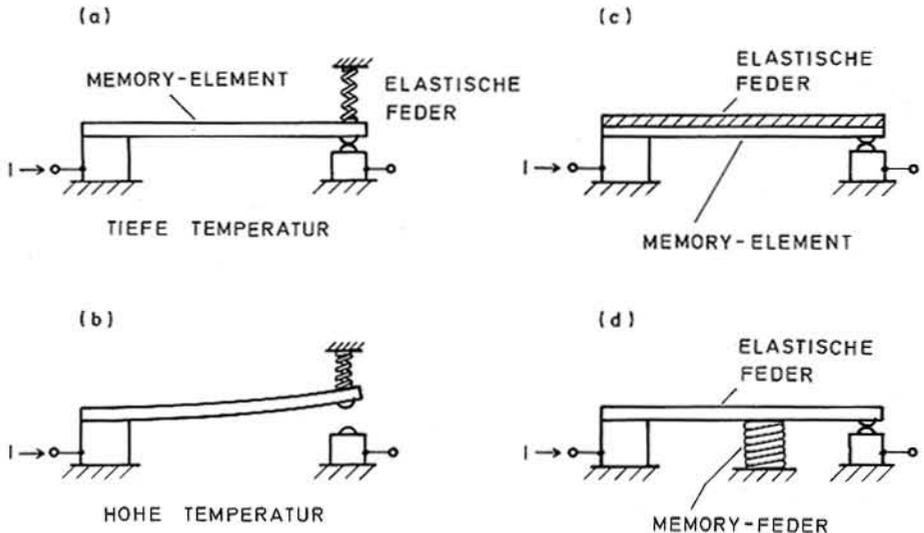


Abb. 6. Thermische Schutzschalter mit Memory-Elementen.

In Abb. 6c ist eine Konzeption dargestellt, bei der das Memory-Element und die elastische Feder in einem Bauteil integriert sind.

Abb. 6d zeigt einen thermischen Schutzschalter mit einer Zweiweg-Memoryfeder, die nicht durch den elektrischen Strom, sondern durch das Umgebungsmedium erwärmt wird. Aufgrund der großen Formänderung des Memory-Elementes in einem engen und genau definierten Temperaturintervall kann hier auf Justierarbeiten verzichtet werden. Ein solcher Schalter kann beispielsweise in einem elektrischen Teekessel den Stromkreis unterbrechen, sobald das Wasser kocht [6].

Des Weiteren sind Temperatur-Indikatoren mit Memory-Elementen denkbar, die beispielsweise auf Starkstromkontakten montiert werden können und auf optischem Wege Übertemperaturen anzeigen, die auf einen Anstieg des Kontaktwiderstandes zurückzuführen sind.

3 Superelastizität

Bei einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung kann die Martensitbildung nicht nur durch thermische, sondern auch durch mechanische Triebkräfte bewirkt werden. Wird eine Formgedächtnislegierung im Hochtemperaturzustand mit einer Spannung beaufschlagt, so entstehen Martensitplatten, die mit zunehmender Spannung wachsen und bei Spannungsabnahme genau in umgekehrter Weise verschwinden [1]. Abb. 7 zeigt schematisch die Spannungs-Dehnungskurve bei Raumtemperatur für eine Formgedächtnislegierung im Hochtemperaturzustand sowie für eine gewöhnliche Legierung ohne thermoelastische martensitische Umwandlung. Während die gewöhnliche Legierung eine elastische Dehnung von etwa 0,2%

aufweist, kehrt die Formgedächtnislegierung selbst nach einer Dehnung von 1,5% bei Wegnahme der Spannung zur ursprünglichen Länge zurück. Nach einer linear-elastischen Verformung der Hochtemperaturphase folgt ein nicht-linearer elastischer Bereich, der auf eine spannungsinduzierte Phasenumwandlung zurückzuführen ist. Dieses Verhalten wird als Pseudoelastizität oder Superelastizität bezeichnet. Neben

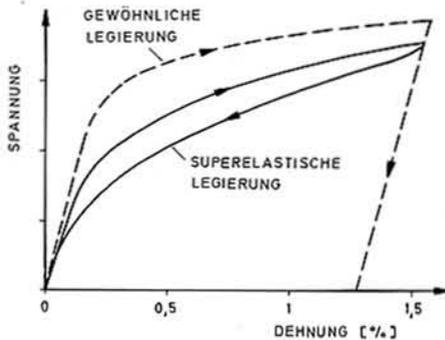


Abb. 7. Spannungs-Dehnungskurven einer superelastischen Memory-Legierung und einer gewöhnlichen Legierung.

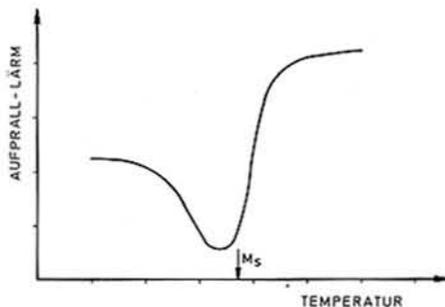


Abb. 8. Aufprall-Lärm in Abhängigkeit von der Temperatur für eine Cu-Zn-Al-Platte (M_s : Temperatur, bei der die Martensitbildung beim Abkühlen einer Legierung im Hochtemperaturzustand einsetzt) [8].

spannungsinduzierter Martensitbildung kann auch die spannungsbedingte Umorientierung von Martensit zu superelastischem Verhalten führen.

Die Spannungs-Dehnungskurve in Abb. 7 kennzeichnet sich durch eine Hysterese sowie eine sehr ausgeprägte Temperaturabhängigkeit, da Spannung und Temperatur gleichwertige Einflußgrößen hinsichtlich der thermoelastischen martensitischen Umwandlung darstellen. Bei der zyklischen Beanspruchung von Formgedächtnislegierungen mit Dehnungsamplituden von beispielsweise 1% erfolgt die Probenverformung über eine reversible Phasenumwandlung oder Umorientierung von Martensit. Daher weisen diese Legierungen wesentlich bessere Ermüdungseigenschaften auf als entsprechende Werkstoffe ohne thermoelastische martensitische Umwandlung [4].

Superelastische Werkstoffe könnten natürlich überall dort Bedeutung erlangen, wo extrem hohe Dehnungswerte gefragt sind. Eine derartige Anwendungsmöglichkeit besteht beispielsweise auf dem Gebiet von Kontaktfedern mit minimalen Abmessungen.

4 Dämpfung

Formgedächtnislegierungen weisen verschiedene hochbewegliche Grenzflächen auf wie Zwillingsgrenzen in einzelnen Martensitvarianten, Grenzflächen zwischen benachbarten Martensitvarianten sowie zwischen Martensit und Hochtemperaturphase. Die Bewegung dieser Grenzflächen unter dem Einfluß einer Wechselbelastung bewirkt eine hohe innere Reibung und damit ein hohes Dämpfungsvermögen. Der wichtigste Parameter hinsichtlich des Dämpfungsvermögens von Form-

gedächtnislegierungen ist die Temperatur. Abb. 8 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Aufprall-Lärms für eine Platte aus einer Formgedächtnislegierung, auf die beispielsweise eine Metallkugel prallt. Im Hochtemperaturzustand ist die Dämpfung gering und wird durch Versetzungsbewegung erzeugt. Beim Abkühlen bis in die Nähe der sogenannten M_s -Temperatur entsteht spannungsinduzierter Martensit mit hochbeweglichen Grenzflächen, und das Dämpfungsvermögen nimmt stark zu. Knapp unterhalb der M_s -Temperatur liegt ein Dämpfungsmaximum vor, jedoch ist bei tieferen Temperaturen noch immer ein hohes Dämpfungsvermögen vorhanden [8]. Neben der Temperatur beeinflusst auch die Amplitude der Wechselbelastung das Dämpfungsvermögen in starkem Maße, hingegen hat die Frequenz praktisch keinen Einfluß auf die Dämpfung. Aufgrund ihres hohen Dämpfungsvermögens können Formgedächtnislegierungen beispielsweise zur Verminderung von schädlichen Vibrationen und

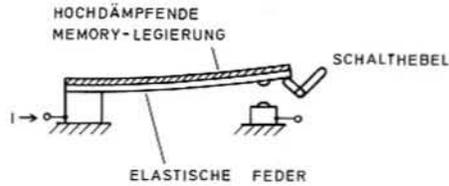


Abb. 9. Schema eines elektrischen Schalters mit einer hochdämpfenden Memory-Legierung.

Geräuschen bei Trägern oder anderen Bauteilen in elektrischen Schaltgeräten eingesetzt werden. Abb. 9 zeigt das Schema eines Schalters, bei dem die Kontaktfeder zwecks Vermeidung von Prellvorgängen mit einer geeigneten Formgedächtnislegierung plattiert ist. Ferner könnte der Kontaktträger bzw. die Kontaktfeder selbst aus einer hochdämpfenden Formgedächtnislegierung hergestellt werden. Darüber hinaus kann die Konzeption aus Abb. 9 zur Verminderung von Geräuschen bei Starkstrom-Schaltern verwendet werden, die in

vielen Fällen aufgrund hoher Kontaktbeschleunigung große Schaltgeräusche erzeugen.

Literatur

1. Perkins, J.: Mat. Sci. Eng. 51 (1981), 181–192.
2. Otsuka, K., Shimizu, K.: Proc. of Int. Summer Course on Martensitic Transformations, Katholieke Universiteit Leuven (1982), 81.
3. Jackson, C. M., Wagner, H. J., Wasilewski, R. J.: NASA Report, SP 5110 (1972), 1–86.
4. Delaey, L., Aernoudt, E., Roos, J.: METALL 31 (1977), 1325–1331.
5. Duerig, T. W., Albrecht, J., Gessinger, G. H.: Journal of Metals 34 (12) (1982), 14–20.
6. Wayman, C. M.: J. Met. 32 (9) (1980), 129–137.
7. Hill, F. W. L.: General Engineer 93 (3) (1982), 63–73.
8. Dejonghe, W., Delaey, L., De Batist, R., Van Humbeeck, J.: Metal Science 11 (1977), 523–530.