



We are Nitinol.™

## Anwendungen von Formgedächtnislegierungen in der Technik

Tautzenberger, Stoeckel

ZwF 81, 12  
pp. 703-708

1986

Dr. P. Tautzenberger und Prof. Dr. D. Stöckel\*, Pforzheim

# Anwendung von Formgedächtnis-Legierungen in der Technik

Nach einer einleitenden Darstellung des Formgedächtnis-Effekts werden zwei Arten dieses Effekts, nämlich Einweg- und Zweiwegeeffekt, erläutert. Aus der Vielzahl bekannter Formgedächtnis-Legierungen werden NiTi, Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni als technisch anwendbare Legierungsgruppen beschrieben. Es werden Anwendungsgrenzen und Stabilität des Gedächtnis-Effekts sowie eine Reihe von Anwendungen behandelt.

## 1 Einleitung

Formgedächtnis-Legierungen zeigen aufgrund einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung nach geeigneter Behandlung eine temperaturabhängige Gestaltsänderung.

Bei einer thermoelastischen martensitischen 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].

Wird eine Formgedächtnis- oder Memory-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.

Der Mechanismus des Formgedächtniseffektes ist in vereinfachter Weise in Bild 1 dargestellt. Bild 1 a zeigt einen Einkristall einer Formgedächtnislegierung in der Hochtemperaturphase, der sich beim Abkühlen in eine verzwilligte Martensitstruktur (Niedertemperaturphase) ohne makroskopische Formänderung umwandelt (Bild 1 b). Durch Einwirkung einer ausreichenden Spannung erfolgt eine bleibende Verformung durch Verschieben der hochbeweglichen Zwillingsgrenzen (Bild 1 c). Beim Erwärmen über eine bestimmte Temperatur entsteht aufgrund der Reversibilität der thermoelastischen martensitischen Umwandlung die Hochtemperaturphase mit der ursprünglichen Kristallorientierung, womit zwangsläufig eine Formrückkehr verbunden ist (Bild 1 d) [3].

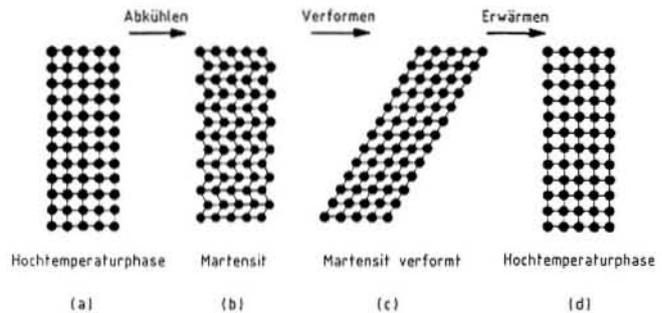


Bild 1. Schematische Darstellung des Formgedächtnis-Effektes

turphase mit der ursprünglichen Kristallorientierung, womit zwangsläufig eine Formrückkehr verbunden ist (Bild 1 d) [3].

## 2 Arten des Gedächtnis-Effektes

### 2.1 Einwegeeffekt

Nimmt man entsprechend Bild 2 einen geraden Draht aus einer Formgedächtnis-Legierung im martensitischen Zustand (Bild 2 a) und biegt ihn so weit, daß zwar reversible Martensitverformung durch Verschieben von hochbeweglichen inneren Grenzflächen wie Zwillingsgrenzen oder Grenzflächen zwischen benachbarten Martensitvarianten stattfindet, jedoch noch keine irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung auftritt (Bild 2 b), so erfolgt bei Erwärmung eine Umwandlung in die Hochtemperaturphase, mit der die Einstellung der ursprünglichen Probenform einhergeht (Bild 2 c). Wesentlich ist hierbei, daß eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt (Bild 2 d). Daher wird der in Bild 2 dargestellte Vorgang Einwegeffekt genannt.

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  $-150^\circ\text{C}$  und  $+150^\circ\text{C}$  liegen. Innerhalb dieses Bereiches können beliebige  $A_s$ -Werte durch die Legierungszusammensetzung gezielt ein-

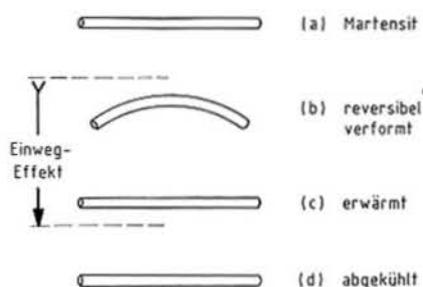


Bild 2. Schematische Darstellung des Einwegeffektes

\* Jetzt: Menlo Park, Kalifornien.

Tabelle 1. Eigenschaften technisch anwendbarer Memory-Legierungen

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

\* nur kurzzeitige Überhitzung

gestellt werden. Dabei liegt eine äußerst starke Abhängigkeit vor, so daß je nach Legierungssystem bereits eine Änderung der Legierungszusammensetzung von etwa 0,1% eine Verschiebung der A<sub>s</sub>-Temperatur um 10 K bewirkt. Richtwerte für die maximalen A<sub>s</sub>-Temperaturen sowie die Größe des Einwegeffektes technisch anwendbarer Legierungsgruppen sind in Tabelle 1 aufgeführt [4].

### 2.2 Zweiwegeffekt

Unterwirft man entsprechend Bild 3 einen geraden Draht im martensitischen Zustand (Bild 3 a) einer starken Biegeverformung (Bild 3 b) und erwärmt ihn anschließend, so entsteht die Hochtemperaturphase, und es bildet sich eine bestimmte Hochtemperaturform (Bild 3 c). Wird der Draht danach abgekühlt, so tritt wieder Martensit auf, wobei sich eine bestimmte Niedertemperaturform einstellt (Bild 3 d). Bei der Durchführung von Temperaturzyklen werden dann jeweils die Formen (c) und (d) eingenommen, das heißt, die Probe „erinnert“ sich sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Niedertemperaturform. Dieser Formänderungsvorgang wird als Zweiwegeffekt bezeichnet und bleibt über hohe Zyklenzahlen erhalten. Durch die hohe Biegeverformung (Bild 3 b) 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

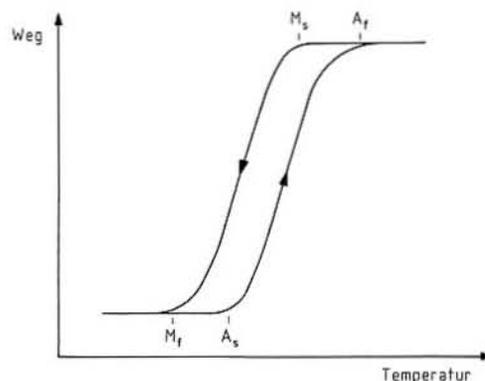
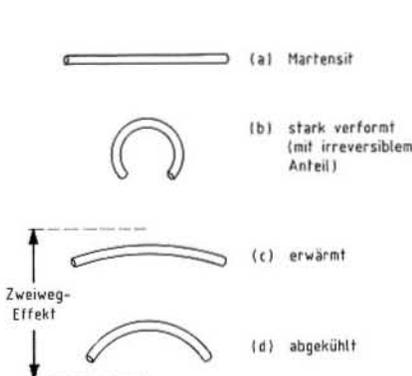


Bild 3 (links). Schematische Darstellung des Zweiwegeffektes

Bild 4 (rechts). Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweiwegeffekt. A<sub>s</sub> und A<sub>f</sub>: Temperatur, bei der die Bildung der Hochtemperaturphase beim Erwärmen beginnt bzw. beendet ist. M<sub>s</sub> und M<sub>f</sub>: Temperatur, bei der die Martensitbildung beim Abkühlen beginnt bzw. beendet ist

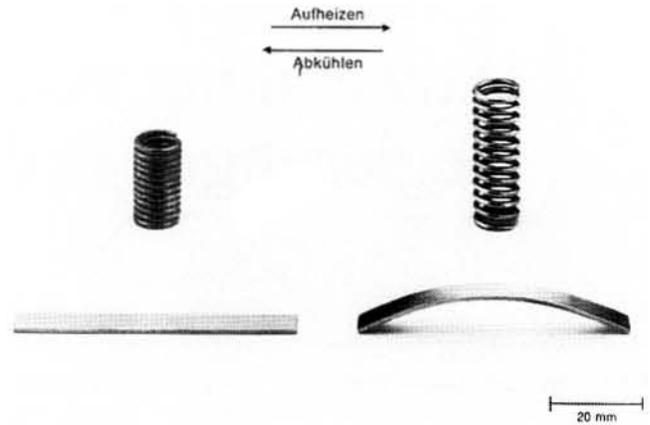


Bild 5. Druckfeder und Biegestreifen mit Zweiwegeffekt aus einer Cu-Zn-Al-Legierung (A<sub>s</sub> ≈ 65°C, A<sub>f</sub> ≈ 80°C, M<sub>s</sub> ≈ 65°C, M<sub>f</sub> ≈ 50°C)

Spannungsfeldes der Versetzungen bevorzugte Martensitvarianten, welche die Entstehung einer bestimmten Niedertemperaturform bewirken [3].

Die Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweiwegeffekt ist schematisch in Bild 4 dargestellt. Ähnlich wie beim Einwegeffekt beginnt auch hier die Formänderung bei Erwärmung erst bei der sogenannten A<sub>s</sub>-Temperatur. Bei weiterem Aufheizen erfolgt dann die gesamte Formänderung in einem kleinen Temperaturintervall (zum Beispiel 10–20 K). Die Temperatur-Weg-Abhängigkeit weist eine Hysterese auf, deren Größe durch geeignete Maßnahmen beeinflusst werden kann.

Die Maximalwerte des Zweiwegeffektes technisch anwendbarer Legierungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Zwei Beispiele für Elemente mit Zweiwegeffekt sind in Bild 5 zu sehen.

### 3 Technisch anwendbare Memory-Legierungen

In der Fachliteratur wird über eine Vielzahl von Formgedächtnis-Legierungen berichtet [3]. Für technische Anwendungen sind bislang jedoch erst die drei Legierungsgruppen NiTi, Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni geeignet. Einige physikalische und mechanische Eigenschaften sowie die Memory-Daten dieser Legierungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Die aufgeführten Eigenschaften hängen unter anderem von der Legierungszusammensetzung und der Kristallstruktur ab und wurden daher als Wertespannen oder Maximalwerte angegeben.

Als Prototyp der technisch anwendbaren Formgedächtnis-Legierungen gilt die intermetallische Verbindung NiTi mit einem Nickelgehalt von etwa 50 Atom-% bzw. 55 Gew.-%. Unter dem Namen Nitinol wurde dieser Werkstoff Anfang der sechziger Jahre in den USA entwickelt [5]. Nickel-Titan weist in der Hochtemperaturphase bei Temperaturen unterhalb 900 °C eine geordnete B2-Struktur auf, die beim Abkühlen in eine verzerrte orthorhombische Martensitstruktur, ähnlich B19, übergeht.

Für die Variation der Umwandlungs- oder Schalttemperatur  $A_s$  durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung steht bei dieser intermetallischen Verbindung lediglich ein schmaler Homogenitätsbereich zur Verfügung, wobei die maximal erreichbare  $A_s$ -Temperatur etwa 100–120 °C beträgt. Die extrem starke Konzentrationsabhängigkeit der  $A_s$ -Temperatur kann durch Zulegieren von Drittelementen wie Cu abgeschwächt werden.

Nickel-Titan zeichnet sich durch einen besonders großen Einweg- und Zweivegeeffekt, eine relativ hohe Überhitzbarkeit sowie eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus. Als Nachteile gelten vor allem die schlechte Zerspanbarkeit und der hohe Preis.

Als zweite Generation der Memory-Legierungen wurden die wesentlich billigeren Kupferbasis-Legierungen Cu-Zn-Al entwickelt [2], die zur Gruppe der  $\beta$ -Phase-Legierungen gehören und neben Kupfer etwa 15–28 Gew.-% Zink sowie 4–8 Gew.-% Aluminium beinhalten. Bei hohen Temperaturen haben diese Legierungen eine ungeordnete kubisch raumzentrierte Struktur. Unterhalb bestimmter Temperaturen tritt in der Hochtemperaturphase die B2- oder DO<sub>3</sub>-Überstruktur auf, die sich bei weiterem Abkühlen in Martensit mit monokliner 9R- bzw. 18R-Struktur umwandelt [6].

Cu-Zn-Al-Legierungen weisen einen breiten Homogenitätsbereich auf, so daß die Umwandlungstemperatur über weite Bereiche variiert werden kann. Aus Gründen der thermischen Instabilität darf jedoch die  $A_s$ -Temperatur je nach Anwendungsfall etwa 100–120 °C nicht überschreiten. Neben der geringen Überhitzbarkeit stellt bei diesen Legierungen auch die eingeschränkte Korrosionsbeständigkeit einen wesentlichen Nachteil dar.

Vor einigen Jahren wurden die Kupferbasis-Legierungen Cu-Al-Ni entwickelt [7], mit denen erhöhte Schalttemperaturen und hohe Überhitzbarkeit erreicht werden können (siehe Tabelle 1). Diese Legierungen beinhalten neben Kupfer etwa 13–14 Gew.-% Aluminium sowie 3–4 Gew.-% Nickel und weisen im Hochtemperaturzustand unterhalb bestimmter Temperaturwerte eine DO<sub>3</sub>-Überstruktur auf. Bei weiterem Abkühlen entsteht je nach Legierungszusammensetzung die Martensitphase mit 2H- oder 18R-Struktur [3, 7].

Deutliche Nachteile stellen bei diesen Legierungen die geringe Duktilität, die schlechte Zerspanbarkeit sowie die stark eingeschränkte Effektstabilität dar.

#### 4 Anwendungsgrenzen und Stabilität des Memory-Effektes

In Tabelle 1 wurden die maximalen  $A_s$ -Temperaturen und Effektgrößen sowie die Überhitzbarkeit technisch anwendbarer Formgedächtnis-Legierungen zusammengefaßt.

Bei manchen Anwendungen werden die Memory-Bauteile über die  $A_T$ -Temperatur hinaus erwärmt. Die in Tabelle 1 aufgeführten Grenzwerte für die Überhitzung gelten für sehr kurze Zeiten. Bereits nach wenigen Minuten tritt bei diesen Temperaturen eine Beeinträchtigung des Formgedächtniseffektes auf. Dabei kann eine Verminderung des Weges sowie eine Verschiebung der Nullpunktlage und der Schalttemperatur erfolgen.

Tabelle 2. Stabilität des Memory-Effektes

Legierungsgruppe	Zahl der thermischen Zyklen	Verminderung der Effektgröße
NiTi	100000	praktisch kein Abbau
Cu-Zn-Al	10000	ca. 10%
Cu-Al-Ni	1000	ca. 10%

Darüber hinaus wird die Stabilität des Zweivege-Memoryeffektes von der Größe des genutzten Arbeitsvermögens, das heißt vom Produkt aus Weg und Kraft beeinflusst. Hierbei ist zu beachten, daß die maximal mögliche Größe des Zweivegeeffektes gemäß Tabelle 1 im Hinblick auf eine möglichst hohe Effektstabilität nicht voll ausgeschöpft werden sollte. Auch die vom Memory-Element zu bewältigende Kraft sollte bestimmte Werte nicht überschreiten, da andernfalls irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung und damit eine Effektbeeinträchtigung erfolgt. Die maximal zulässige Last beziehungsweise Spannung für eine bestimmte Effektstabilität hängt insbesondere von den Betriebstemperaturen ab, so daß konkrete Angaben nur in Verbindung mit dem jeweiligen Anwendungsfall gemacht werden können. Dabei liegen die zulässigen Spannungen bei Nickel-Titan deutlich höher als bei den Kupferbasis-Legierungen. Als grobe Anhaltswerte für die Stabilität des Memory-Effektes können die in Tabelle 2 genannten Daten angesehen werden, wobei sich die verschiedenen Parameter wie Effektgröße, Spannung, Temperaturbereich und Überhitzung in angemessenen Grenzen halten müssen.

Die tatsächliche Stabilität und die Funktionstüchtigkeit der Memory-Bauteile für einen gegebenen Anwendungsfall müssen direkt im entsprechenden Gerät unter anwendungsspezifischen Bedingungen erprobt werden. Gemäß Tabelle 2 weisen die Kupferbasis-Legierungen eine starke Einschränkung der Effektstabilität auf. Dennoch gibt es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, bei denen bestimmte Eigenschaften der Kupferbasis-Legierungen vorteilhaft sind, wie beispielsweise die erhöhte Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe.

Durch Beaufschlagung von Memory-Elementen mit tiefen Temperaturen, beispielsweise bis in die Nähe des absoluten Nullpunktes, wird der Memory-Effekt praktisch nicht beeinträchtigt, da in diesem Temperaturbereich in der Regel keine Gefüge- oder Strukturveränderungen stattfinden.

Die Schalt- oder  $A_s$ -Temperatur von Formgedächtnis-Legierungen wird durch die Legierungszusammensetzung vorgegeben. Dabei liegt eine äußerst starke Abhängigkeit vor, so daß je nach Legierungssystem bereits eine Änderung der Legierungszusammensetzung von etwa 0,1% eine Verschiebung der  $A_s$ -Temperatur um 10 K bewirkt. Die Streuung der  $A_s$ -Temperatur innerhalb einer Charge ist bei Anwendung optimaler Herstellungstechniken in der Regel nicht größer als  $\pm 1$  K. Schwieriger hingegen ist die Einengung der  $A_s$ -Streuung von Charge zu Charge. Hier ist bei angemessenem Herstellungsaufwand mit einer  $A_s$ -Streuung bis zu  $\pm 5$  K zu rechnen.

#### 5 Anwendungen von Bauteilen aus Formgedächtnis-Legierungen

Bauteile mit Memory-Effekt zeichnen sich durch folgende Besonderheiten aus:

- Vollständige Arbeitsverrichtung in einem kleinen Temperaturintervall
- Große Arbeitsleistung pro Volumeneinheit
- Möglichkeit zur Durchführung verschiedener Bewegungsarten (Verlängerung, Verkürzung, Biegung, Torsion)

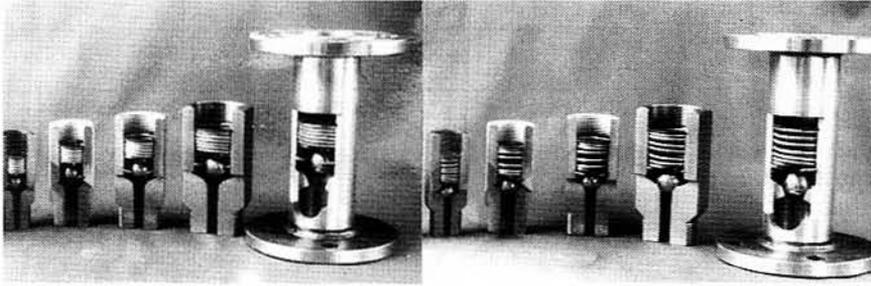


Bild 6. Thermo-Ventile mit Memory-Druckfedern a) (links) geöffnet, b) (rechts) geschlossen (Werkbild Proteus, Belgien)

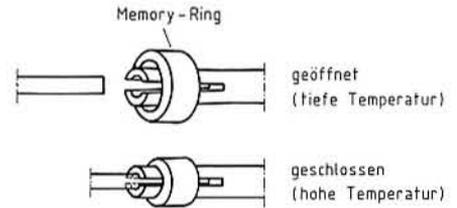
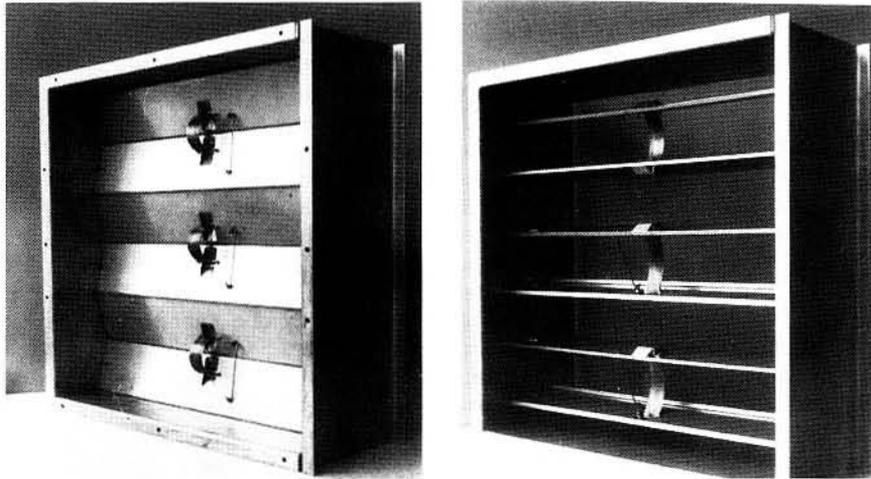


Bild 8. Stecker mit Zweigweg-Memory-Ring

Bild 7. Lüftungsclappe mit Memory-Biegestreifen a) (links) geschlossen, b) (rechts) geöffnet (Werkbild Proteus, Belgien)

- Der Formänderungseffekt kann auf bestimmte Elementbereiche beschränkt werden.

Die ersten Anwendungen von Memory-Bauteilen beruhen auf dem Einwegeffekt. Hierzu zählen beispielsweise Verbindungselemente wie Schrupfingre und Klammern. In den letzten Jahren sind verschiedene Anwendungen bekannt geworden, bei denen Elemente mit Zweigweffekt verwendet werden: Thermoventile für die Elektrotechnik, Thermostatventile für Heizungen, Lüfterkupplungen für Motoren, Drosselvorrichtungen für Einspritzpumpen u. a. [8].

Im folgenden werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Memory-Bauteilen mit Zweigweffekt näher erläutert. Dabei handelt es sich teils um bereits realisierte Anwendungen und teils um mögliche, jedoch derzeit noch nicht durchgeführte Einsätze.

In Bild 6 sind Beispiele für Thermo-Ventile zu sehen, die die Zufuhr brennbarer Fluida (zum Beispiel Gas) bei Erreichen einer kritischen Umgebungstemperatur unterbrechen.

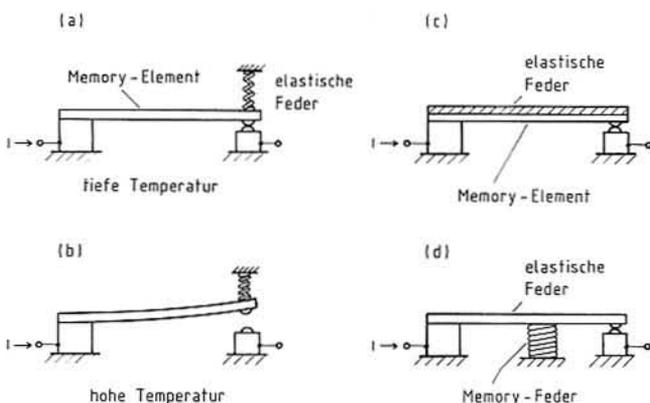


Bild 9. Thermische Schutzschalter mit Memory-Elementen

Dies geschieht mittels einer Memory-Druckfeder mit Zweigweffekt, die bei einer bestimmten Temperatur eine Stahlkugel durch einen Federring aus Stahl schiebt und somit das Ventil schließt. Eine selbsttätige Rückstellung der Kugel wird durch den Federring verhindert. Zum Öffnen des Ventiles kann die Kugel bei Normaltemperatur mit Hilfe eines Stiftes manuell in ihre ursprüngliche Lage geschoben werden.

Bild 7 zeigt eine Lüftungsclappe, bei der als thermische Steuerelemente Memory-Biegestreifen mit Zweigweffekt eingebaut sind.

Beim Überschreiten einer bestimmten Temperatur ändern die Memory-Streifen ihre Form und öffnen die Clappe, bei sinkender Temperatur hingegen wird sie wieder geschlossen.

In Bild 8 ist die Anwendung des Zweigweffektes bei einem Steckverbinder schematisch dargestellt. Die Buchse besteht aus einem gewöhnlichen Werkstoff und hat zwei Zinken, die eine Aufweitung aufweisen [9]. Ein Memory-Ring mit Zweigweffekt ermöglicht ein einfaches und zuverlässiges Schließen und Lösen der Verbindung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Eine andere Anwendungsmöglichkeit für den Zweigweffekt betrifft das Gebiet der thermischen Schutzschalter, die einen elektrischen Stromkreis im Falle von Überstrom unterbrechen. Die Bilder 9 a 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. In Bild 9 c ist eine Konzeption dargestellt, bei der das Memory-Element und die elastische Feder in einem Bauteil integriert sind.

Bild 9 d zeigt einen thermischen Schutzschalter mit einer Zweigweg-Memoryfeder, die nicht durch den elektrischen

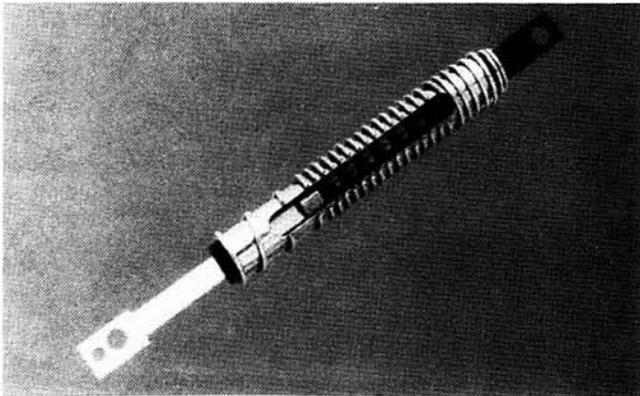


Bild 10a. Memory-Stellelement mit Sicht auf die Nickel-Titan-Feder im Inneren

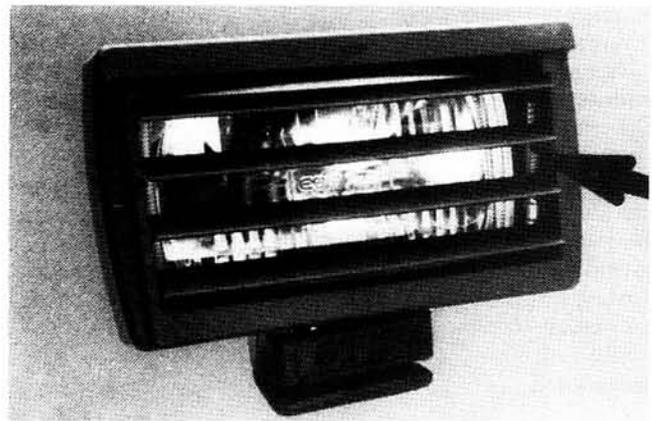


Bild 10b. Nebelscheinwerfer mit Steinschlag-Schutzlamellen, betätigt mit Memory-Stellelement (Werkbilder Raychem)

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 [8]. 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.

Elemente mit Zweivegeeffekt zeigen einen reversiblen Formänderungseffekt ohne äußere Hilfsmaßnahmen. Darüber hinaus kann man eine reversible Formänderung auch dadurch bewirken, daß man den Einwegeeffekt mit Hilfe einer äußeren Kraft stets von neuem erzeugt. Dies wird anhand des Stellelementes in Bild 10a erläutert. Im Inneren des Stellelementes befindet sich eine Zugfeder aus Nickel-Titan, die bei hoher Temperatur im Blockzustand vorliegt, das heißt die Windungen berühren einander. Ohne äußere Zugbelastung tritt jedoch keine temperaturabhängige Formänderung auf. Bei tiefer Temperatur, bei der die weiche martensitische Phase vorliegt, verlängert sich die Memory-Feder durch Einwirkung einer äußeren Zugkraft. Beim anschließenden Erwärmen läuft der entsprechende Einwegeeffekt ab, wobei die Feder sich wieder auf den Blockzustand zusammenzieht und dabei Arbeit leistet. Bei der Durchführung weiterer Temperaturzyklen in Verbindung mit einer äußeren Zugbelastung wiederholt sich die reversible Formänderung jeweils in gleicher Weise. Die hier beschriebene Methode zur Erzeugung einer reversiblen temperaturabhängigen Formänderung kann bei bestimmten Anwendungsfällen eine preisgünstigere Lösung darstellen

als die Herstellung von Elementen, die den eigentlichen Zweivege-Memoryeffekt zeigen (siehe Bild 5).

In Bild 10b ist ein Nebelscheinwerfer dargestellt, dessen Steinschlag-Schutzlamellen mit einem Stellelement gemäß Bild 10a betätigt werden. Die Nickel-Titan-Feder liegt in Serie mit der Glühlampe und wird durch den hindurchfließenden elektrischen Strom beheizt, so daß sehr kurze Reaktionszeiten möglich sind. Für den Fall, daß die Bewegung der Schutzlamellen verhindert wird, hat das Stellelement in Bild 10a eine Stahlfeder, welche die Nickel-Titan-Feder vor einer Überlastung schützt. Selbstverständlich sind für verschiedene Anwendungen auch wesentlich einfachere Konzeptionen denkbar, wodurch dann entsprechende Preisvorteile erzielt werden können.

Bild 11a zeigt einen IC-Stecksockel für eine lösbare Steckverbindung, bei der die IC-Beinchen sicher gehalten werden und beim Auswechseln keinem Beschädigungsrisiko unterliegen. Bild 11b zeigt einen Stecksockelkontakt A, der aus einem hochleitfähigen Federwerkstoff besteht. Er wird von einem rechteckigen Klemmring B aus Nickel-Titan umschlossen. Unter dem Einfluß der Federkraft des Kontaktteiles zeigt der Memory-Ring eine reversible temperaturabhängige Formänderung, wie sie bereits anhand von Bild 10a erläutert wurde. Bei normaler Betriebstemperatur wird das IC-Beinchen C sicher gehalten, während sich der Kontaktpalt bei definierter Kälteeinwirkung vergrößert, so daß das Beinchen herausgenommen werden kann.

## 6 Ausblick

Formgedächtnis-Legierungen stellen eine vergleichsweise junge Werkstoffgruppe dar, deren außergewöhnliche Eigen-

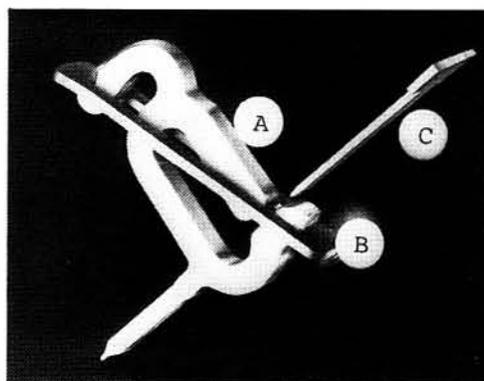
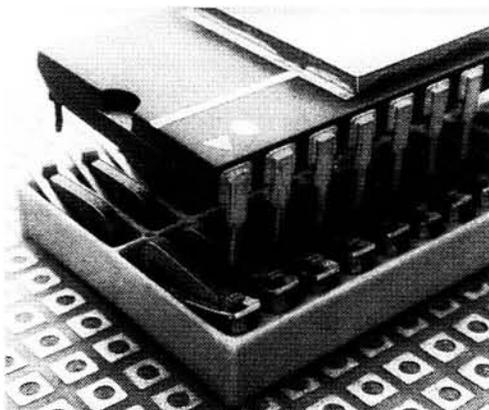


Bild 11a (links). Sicherheitsstecksockel für IC-Bausteine

Bild 11b (rechts). Stecksockelkontakt mit Memory-Ring (Werkbilder Raychem)

schaften auf einer thermoeleastischen martensitischen Phasenumwandlung beruhen.

Aufgrund der komplexen werkstofftechnischen Materie sind für die Einführung von Bauteilen aus Formgedächtnis-Legierungen in die Technik intensive Gespräche zwischen Hersteller und Anwender erforderlich. Die derzeitigen Entwicklungen deuten darauf hin, daß in den nächsten Jahren eine rasche Zunahme der bislang geringen Zahl von Anwendungsfällen erfolgen wird. Der Erfolg hängt unter anderem davon ab, inwieweit die Hersteller die Anwendungsgrenzen der Legierungen aufweiten und die Bauteile preiswert herstellen werden können.

#### Anmerkung

Die vorliegende Arbeit basiert auf einem Vortrag, den Herr Dr. P. Tautzenberger am 2. 5. 1985 auf einer DGM-Fachkonferenz über die martensitische Phasenumwandlung an der Ruhr-Universität Bochum gehalten hat.

#### Die Autoren dieses Beitrags

Dr. rer. nat. P. Tautzenberger, Jahrgang 1951, studierte Metallkunde an der Universität Stuttgart, wo er 1980 promovierte. Danach war er zwei Jahre Werkstoffingenieur bei der Daim-

ler-Benz AG, Stuttgart. 1982 wurde er Entwicklungsingenieur bei der G. Rau GmbH & Co., Pforzheim, wo er heute Leiter der Forschung und Entwicklung ist.

Prof. Dr. rer. nat. D. Stöckel, Jahrgang 1944, studierte Hüttenkunde an der Technischen Universität Berlin und Metallkunde an der Universität Stuttgart, wo er 1972 promovierte. Er war von 1969-1985 bei der G. Rau GmbH & Co., Pforzheim; ab 1972 als Leiter der Forschung und Entwicklung und ab 1978 als Prokurist Neue Technologien. 1981 wurde er Honorarprofessor an der FH Aalen, 1985 ging er zur Raychem Corp., Menlo Park, Kalifornien.

#### Literatur

1. J. Perkins: Mat. Sci. Eng. 51 (1981) 181-192.
2. L. Delaey, E. Aernoudt, J. Roos: METALL 31 (1977) 1325-1331.
3. K. Otsuka, K. Shimizu: Proc. of Int. Summer Course on Martensitic Transformations, Katholieke Universiteit Leuven (1982) 81.
4. P. Tautzenberger, D. Stöckel: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 78 (1983) 10, 486-488.
5. W. J. Buehler, J. V. Gilfrich, R. C. Wiley: J. Appl. Phys. 34 (1963) 1475.
6. L. Delaey, A. Deruyttere, E. Aernoudt, J. R. Roos: INCRA REPORT 1978.
7. T. W. Duerig, J. Albrecht, G. H. Gessinger: Journal of Metals 34 (1982) (12) 14.
8. C. M. Wayman: J. Met. 32 (1980) 9, 129.
9. F. W. L. Hill: General Engineer 93 (1982) 3, 63.

1361 A