

## **Aktoren aus Formgedächtnislegierungen**

Stoeckel

VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik  
Fachbeilage Mikroperipherik  
me Band 6, Heft 6

1992

# AKTOREN AUS FORMGEDÄCHTNIS-LEGIERUNGEN

Bestimmte metallische Materialien kehren nach einer plastischen Verformung in ihre ursprüngliche Gestalt zurück, wenn man sie erwärmt. Die selben Materialien können in einem bestimmten Temperaturbereich bis annähernd zehn Prozent gedehnt werden und kehren bei Entlastung ebenfalls in ihre Ausgangsform zurück. Diese Effekte werden Shape Memory (thermisches Formgedächtnis) bzw. Superelastizität (elastisches Formgedächtnis) genannt. Beide Effekte sind das Ergebnis einer als thermoelastische, martensitische Umwandlung bekannten Phasenumwandlung. Shape Memory und superelastische Legierungen reagieren auf Temperaturänderungen oder mechanische Belastung auf ungewöhnliche Weise und werden daher auch als „intelligente“ Werkstoffe (Smart Materials) bezeichnet. Im folgenden wird auf den Shape-Memory-Aspekt der martensitischen Umwandlung eingegangen, der für thermische und elektrische Aktoren genutzt werden kann.

## Formgedächtnislegierungen

Der Formgedächtniseffekt als Ergebnis einer martensitischen Phasenumwandlung ist seit Mitte der fünfziger Jahre bekannt, als er in Kupferbasislegierungen entdeckt wurde. Inzwischen wurde der Formgedächtniseffekt in mehreren Legierungssystemen gefunden, wobei die Nickel-Titan-Legierungen, die zu Beginn der sechziger Jahre von Wissenschaftlern am Naval Ordnance Laboratory/USA entwickelt wurden, die heute technisch bedeutsamsten Formgedächtnislegierungen sind. Sie weisen den größten Formgedächtniseffekt sowie ausgezeichnete mechanische und Herstellungseigenschaften auf.

Legierungen auf Kupferbasis, wie Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni, sind zwar ebenfalls kommerziell erhältlich, haben jedoch wegen ihrer Sprödigkeit und mangelnden Stabilität trotz geringerer Kosten keine nennenswerte Verbreitung gefunden. In jüngster Zeit wurden in Veröffentlichungen vermehrt Legierungen auf Eisenbasis propagiert. Es wird jedoch noch lange dauern, bis die mit diesen Legierungen verbundenen Probleme wie mangelnde Effektgröße und mangelnde Duktilität beseitigt sind.

Die Umwandlungstemperatur einer Formgedächtnislegierung ist durch die chemische Zusammensetzung der Legierung gegeben. Ni-Ti- und Cu-Zn-Al-Legierungen können Umwandlungs- oder „Schalt“-Temperaturen zwischen  $-100^{\circ}\text{C}$  und  $+100^{\circ}\text{C}$  aufweisen, Cu-Al-Ni-Legierungen sogar bis  $+200^{\circ}\text{C}$ . Allerdings sind letztere bei zyklischer Beanspruchung nicht stabil. Höhere Umwandlungstemperaturen bis  $200^{\circ}\text{C}$  können auch mit Ni-Ti-Pd-Legierungen erzielt werden. Diese Legierungen sind jedoch teuer und bisher nicht kommerziell erhältlich. Durch sie könnte der Anwendungsbereich der Shape-Memory-Technologie wesentlich erweitert werden.

## Shape-Memory-Effekt

In Bild 1 ist der prinzipielle Mechanismus des Formgedächtniseffektes bzw. der thermoelastischen martensitischen Umwandlung schematisch dargestellt. Die bei hoher Temperatur stabile kubische Phase „Austenit“ wandelt sich bei der Abkühlung unter die Umwandlungstemperatur in „verzwillingten Martensit“ um. Dieser kann durch „Entzwilligen“ bis zu etwa acht Prozent verformt werden. Bei Erwärmung wandelt sich der verformte Martensit in Austenit um, und die Probe geht in ihre ursprüngliche Gestalt zurück.

Die beiden Phasen Austenit und Martensit zeigen vor allem im Festigkeitsverhalten charakteristische Unterschiede. Während das Spannungs/Dehnungs-Diagramm des Austenits dem konventioneller Legierungen gleicht (Bild 2), ist das des Martensits unterhalb der Umwandlungstemperatur recht ungewöhnlich. Es ist gekennzeichnet durch das sogenannte Martensitplateau, einen Bereich mit sehr geringer Verfestigung. Wird eine Probe im martensitischen Zustand bis maximal acht Prozent verformt, so bleibt sie nach Entlasten im verformten Zustand, von geringer elastischer Rückfederung abgesehen. Bei Erwärmung über die Umwandlungstemperatur kann diese Verformung wieder rückgängig gemacht werden.

Wird die Probe über das Martensitplateau hinaus belastet, so wird sie nach Überschreiten einer „wahren“ Streckgrenze durch konventionelle Mechanismen bleibend verformt. Diese Verformung kann nicht rückgängig gemacht werden. Der Festigkeitsunterschied zwischen Martensit im Plateaubereich und Austenit ist beträchtlich, abhängig vom Legierungstyp bis zu einem Faktor zehn, und bildet die Basis für die konstruktive Auslegung von Shape-Memory-Aktoren.

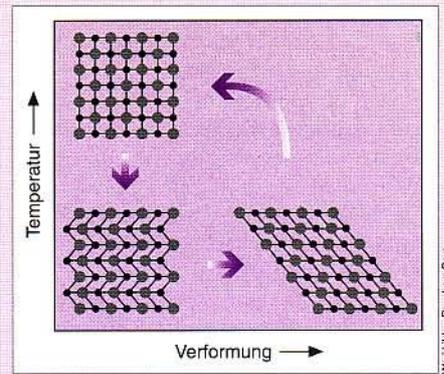


Bild 1: Martensitische Umwandlung und Formgedächtniseffekt

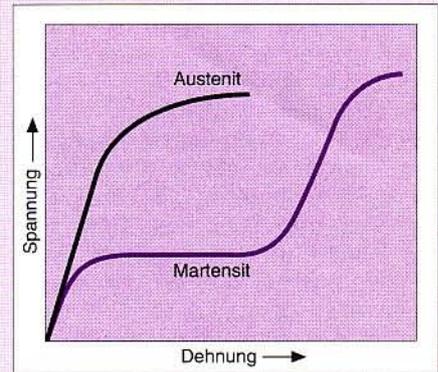


Bild 2: Spannungs-/Dehnungsverhalten von Martensit und Austenit

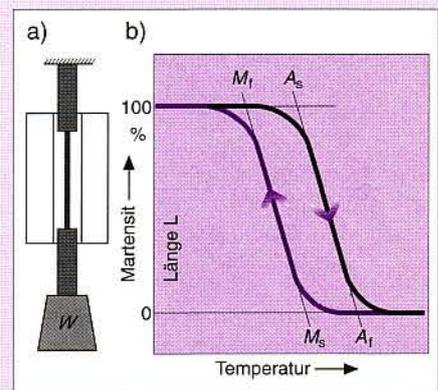


Bild 3: Temperaturhysterese des Formgedächtniseffektes: a) Formgedächtnismetalldraht mit konstantem Gewicht, b) Längenverhalten des Drahtes als Funktion der Temperatur

Wie in Bild 3 gezeigt, sind die beiden Phasen bei unterschiedlichen Temperaturen stabil, wobei bei der Umwandlung zwischen Hochtemperatur (Austenit)- und Niedertemperaturphase (Martensit) eine Hysterese durchlaufen wird. Diese Hysterese ist gekennzeichnet durch die für den Werkstoff typischen Temperaturen  $A_s$  (Austenit-Start),  $A_f$  (Austenit-Finish),  $M_s$  (Martensit-Start) und  $M_f$  (Martensit-Finish). Abhängig von der Zusammensetzung der Legierungen liegen diese Temperaturen zwischen ca.  $-100^{\circ}\text{C}$  und  $+100^{\circ}\text{C}$ . Die Breite der Hysterese beträgt bei binären Standard-Legierungen ca. 30 K bis 50 K, kann jedoch durch Legierungszusätze und thermomechanische Verfahren auf ca. 7 K bis 15 K verringert oder bis ca. 150 K erweitert werden.

Die für die vollständige Umwandlung von einer Phase in die andere erforderliche Temperaturdifferenz, also die Neigung der Hystereseschleife, kann durch spezielle Behandlung beeinflusst werden. Für Anwendungen, bei denen eine Funktion bei Erreichen oder Überschreiten einer bestimmten Temperatur verlangt wird, ist im allgemeinen eine möglichst rechteckige Hysterese erwünscht. Soll der Aktor jedoch zu Regelungszwecken eingesetzt werden, kann durch geänderte thermomechanische Behandlung eine geneigte Hystereseschleife eingestellt werden.

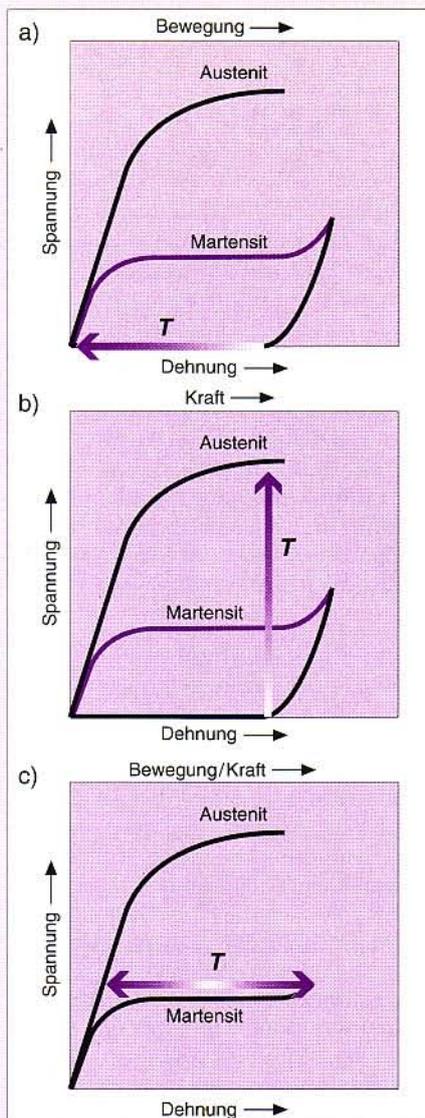
Die Neigung der Hystereseschleife ist jedoch nicht nur vom Legierungstyp und der thermomechanischen Behandlung abhängig, sondern auch von der Art der Belastung des Aktors im Anwendungsfall. Arbeitet zum Beispiel ein aus einem geraden Draht bestehender Aktor gegen ein konstantes Gewicht, findet der Übergang von Martensit zu Austenit in einem sehr engen Temperaturbereich von ca. 5 K statt. Arbeitet der Aktor jedoch gegen eine Federkraft, dauert die Umwandlung länger. Die Temperaturdifferenz zwischen  $A_s$  und  $A_f$  ist nun abhängig von der Federrate der Gegenfeder.

### Konstruktive Auslegung

Der Formgedächtniseffekt kann zur Erzeugung von Bewegung und/oder Kraft genutzt werden. Alle Nutzungsarten können im Spannungs/Dehnungs-Diagramm am Beispiel eines auf Zug beanspruchten Aktordrahtes einfach dargestellt werden (Bild 4). Wird der an einem Ende befestigte Draht bei Raumtemperatur gedehnt, bleibt er bei Entlastung im gedehnten Zustand, bis die Temperatur erhöht wird. Bei Überschreiten der Umwandlungstemperatur geht der Draht auf seine Ausgangslänge zurück. Da bei der Umwandlung keine Kraft einwirkt, wird dieser Fall „freies Formgedächtnis“ genannt. Abkühlen unter die Umwandlungstemperatur bewirkt keine sichtbare Formänderung.

Wird der Draht jedoch nach der Belastung daran gehindert, bei Erwärmung in seine Ausgangslage zurückzukehren, so baut sich eine der unterdrückten Dehnung entsprechende Spannung auf. Dieses „unterdrückte Formgedächtnis“ und die dabei auftretenden erheblichen Kräfte werden in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt.

Kann der Draht die Gegenkraft überwinden, wird Arbeit verrichtet. Bei Erwärmung hebt der Draht zum Beispiel ein Gewicht über eine gewisse Distanz. Bei der Abkühlung kann dieses Gewicht den nun martensitisch „weich werdenden“ Draht wieder verlängern und damit den Mechanismus



**Bild 4: Verhalten von Formgedächtnismetalldrähten: a) freies Formgedächtnis, b) unterdrücktes Formgedächtnis, c) Arbeitsverrichtung im Spannungs/Dehnungs-Diagramm**

zurückstellen. Diese Art der Verwendung wird als „Zweiwegeeffekt mit externer Rückstellung“ bezeichnet. Unter bestimmten Voraussetzungen können Formgedächtnislegierungen auch einen „echten Zweiwegeeffekt“ aufweisen, das heißt sie können sich sowohl an eine Niedrigtemperaturform als auch an eine Hochtemperaturform „erinnern“, ohne daß eine externe Kraft angreift. Wegen der geringeren Effektgröße und der schwierigen Induzierung wird der Zweiwegeeffekt jedoch seltener genutzt.

In den meisten Fällen arbeitet der Aktor gegen eine Gegenkraft, etwa ein konstantes Gewicht, eine Federkraft, Öl- oder Luftdruck, oder einen Rückstellmechanismus. Abhängig von der Art dieser Gegenkraft können unterschiedliche Kraft/Weg-Charakteristiken erreicht werden. So ist die Kraft bei einem konstanten Gegengewicht immer konstant. Bei einer Feder als Gegenkraft ergibt sich dagegen eine mit zunehmender Verkürzung des Drahtes linear ansteigende Kraft.

Arbeiten hingegen zwei sich verkürzende Formgedächtnisdrähte gegeneinander, so ergeben sich sowohl am Anfang als auch am Ende des möglichen Stellweges große Kräfte, da der jeweils inaktive Draht gedehnt wird. Im Bereich mittlerer Stellwege sind die Kräfte aufgrund des eingebauten Spiels annähernd gleich Null.

In Bild 5 sind zwei Möglichkeiten der Rückstellung mit abnehmender Gegenkraft gezeigt. In Bild 5a erzeugt der Haltemagnet eine hohe statische Kraft, die rasch abnimmt, sobald der Magnet von der Haltebasis getrennt wird. Eine abnehmende Kraft kann auch durch Änderung des Hebelarmes bewirkt werden (Bild 5b). Abnehmende Gegenspannungen wirken sich sehr positiv auf die Stabilität des Aktors bei zyklischer Beanspruchung aus.

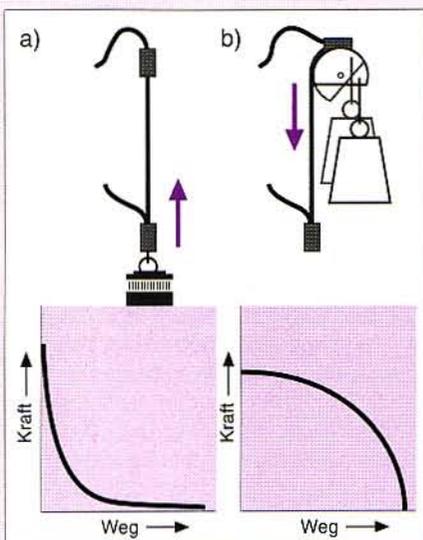
Unter optimalen Bedingungen können im unbelasteten Zustand Dehnungen bis zu acht Prozent rückgängig gemacht werden. Im allgemeinen werden die Aktoren jedoch zur Arbeitsverrichtung eingesetzt, sie arbeiten daher nicht lastfrei. Die nutzbare Dehnung, das heißt der Hub des Shape-Memory-Aktorelementes, ist daher wesentlich geringer. Dies gilt auch für die nutzbare Spannung. Während für Einmalvorgänge mit der Streckgrenze des Austenits gerechnet werden kann, müssen bei zyklischer Beanspruchung deutlich niedrigere Spannungen zugrunde gelegt werden. Die Daten in Tabelle 1 können als Anhaltswerte betrachtet werden.

Der Shape-Memory-Effekt ist nicht auf die Kontraktion gerader Drähte beschränkt. Es lassen sich vielmehr nahezu beliebige Bewegungsarten verwirklichen. Häufig genutzte Varianten sind:

- Gerade Zugdrähte (hohe Kraft, geringer Hub)
- Tellerfedern (hohe Kraft, geringer Hub)
- Zug- oder Druckfedern (großer Hub, geringere Kraft)
- Blattfedern (mäßiger Hub, geringe Kraft)

### Anwendungsmöglichkeiten

Auf dem Formgedächtniseffekt basierende Aktoren reagieren auf eine Temperaturänderung mit einer Änderung ihrer Gestalt. Die Temperaturänderung kann dabei durch Änderung der Umgebungstemperatur oder durch elektrische Beheizung des Shape-Memory-Elementes hervorgerufen sein. Im ersten Fall ist das Element ein Sensor-Aktor (thermisches Stellelement), im zweiten Fall erfolgt ein Stellvorgang „auf Befehl“. Thermische wie elektrische Shape-Memory-Aktoren zeichnen sich durch geringe Komplexität, geringes Gewicht, geringe Größe, große Kraft und großen Hub, das heißt



**Bild 5: Rückstellmechanismen: a) bei rasch abnehmender Gegenkraft, b) bei linear abnehmender Gegenkraft**

Zahl der Zyklen	Maximale Dehnung	Maximale Spannung
1 00	4 %	275 MPa
10 000	2 %	140 MPa
100 000 +	1 %	70 MPa

**Tabelle 1: Abhängigkeit der maximalen Dehnung und der maximal nutzbaren Spannung von der Zahl der Zyklen**

großes Arbeitsvermögen, aus. Aktoren mit Kräften im Bereich von Mega-Newton können ebenso realisiert werden wie in Mikrosystemtechnik hergestellte integrierte Schalt- oder Ventilelemente.

Thermische Aktoren (Sensor-Aktoren) werden hauptsächlich für thermische Kompensation, thermisch ausgelöste Stellvorgänge und thermische Überlastsicherung eingesetzt. Shape-Memory-Aktoren lassen sich aufgrund ihrer Gestalt häufig ohne nennenswerte Änderungen in bestehende Konstruktionen integrieren, wohingegen konventionelle Aktoren, wie Thermobimetalle oder Wachselemente, weitreichende Konstruktionsänderungen erforderlich machen würden.

So können Überdruckventile, zum Beispiel Ölkühler-Bypass-Ventile, durch den Austausch der Stahlfeder durch eine Shape-Memory-Feder dahingehend verändert werden, daß sie sowohl auf Temperaturänderung als auch auf Überdruck reagieren (Bild 6). Dieses Ventil läßt bei tiefen Temperaturen das kalte Öl am Kühler vorbei, bis die Arbeitstemperatur des zu kühlenden Gerätes erreicht ist. Im Normalbetrieb (bei hoher Temperatur) reagiert das Ventil auf Überdruck. Da das auslösende Element in vielen Fällen direkt im Durchflußbereich angeordnet ist, ohne den Fluß zu behindern, werden kurze Ansprechzeiten ermöglicht. Dies ist beispielsweise bei Verbrühschutzventilen wichtig. Weitere interes-



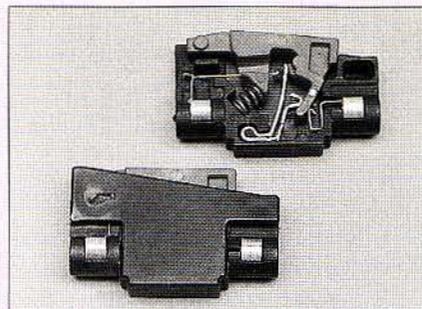
**Bild 6: Ölkühler-Bypass-Ventil**

sante Einsatzgebiete sind thermische Regelschieber in den Bereichen Hydraulik, Viskositäts-Kompensation, Brandschutz oder Klima- und Belüftungsanlagen.

Elektrische Shape-Memory-Stellelemente können Magnetantriebe oder motorische Antriebe in Einsatzfeldern ersetzen, wo geräuschloses Stellen, geringe Einbaumaße oder Einfachheit der Konstruktion notwendig sind (Bild 7). Durch Regeln des Heizstromes können auch komplexere Stellvorgänge gesteuert werden. Interessante Anwendungen bahnen sich im Bereich der sogenannten „Smart Materials“ an. Dünne Ni-Ti-Drähte werden in faserverstärkte Verbundwerkstoffe integriert und können die Gestalt des Bauteiles bei Bedarf verändern. Dadurch soll zum Beispiel die Tragflächenkontur eines Flugzeuges den jeweiligen Flugbedingungen angepaßt werden können. Zu den „Smart Structures“ zählt auch der Entwurf eines Dämpfungssystems für die Antennen von Raumflugkörpern, speziell des Space Shuttles.

Bei allen elektrischen Stellelementen ist zu beachten, daß der Shape-Memory-Effekt ein rein thermischer Effekt ist und somit immer ausgelöst wird, wenn die Umwandlungstemperatur überschritten wird. Die relativ niedrigen Umwandlungstemperaturen von ca. 70°C bis 100°C der heute zur Verfügung stehenden Formgedächtnislegierungen schränken die Anwendbarkeit elektrischer Shape-Memory-Aktoren stark ein. Es besteht die Gefahr der Selbstauslösung bzw. die Schwierigkeit oder gar Unmöglichkeit der Rückstellung bei hoher Umgebungstemperatur.

Die eingangs erwähnten Ni-Ti-Pd-Legierungen mit Umwandlungstemperaturen um 200°C könnten hier zu einem Durchbruch führen. Ein weiterer limitierender Faktor ist die Ansprechzeit der elektrischen Shape-Memory-Aktoren. Während die Aufheizzeit über die Höhe des Stromes beeinflusst werden kann, sind die Abkühlzeiten nahezu unbeeinflussbar und können je nach Masse des Bauteiles Sekunden bis Minuten betragen. Dies schließt alle Anwendungen mit kurzen Zyklusintervallen, wie zum Beispiel in der Robotik, aus.



**Bild 7: Mikroüberlastschalter**

### Zusammenfassung

Obwohl der Shape-Memory-Effekt seit über 30 Jahren bekannt ist, ist eine Vielzahl von Aktoranwendungen erst während der letzten drei Jahre auf dem Markt erschienen. Dies liegt teilweise daran, daß die wenigen Legierungshersteller technologische Einzelheiten streng geheim gehalten haben und damit keine technischen Daten für die Legierungen zur Verfügung standen. Heute wird die Diskussion weit offener geführt, es werden Lehrgänge über das Konstruieren mit Formgedächtnislegierungen angeboten, und mehr Anbieter der Legierungen konkurrieren um potentielle Anwender.

Die derzeit kommerziell erhältlichen Legierungen eignen sich besonders für eine Vielzahl thermischer Stell- und Regelungsaufgaben, wie Kompensation, Übertemperaturschutz usw. Thermische Formgedächtnisaktoren vereinen Sensor- und Aktorfunktion und stellen eine Konkurrenz zu Thermobimetallen und Wachselementen dar. Ihre wesentlichen Vorteile sind Einfachheit der Konstruktion, geringe Einbaumaße und geringes Gewicht sowie großes Arbeitsvermögen.

Elektrische Formgedächtnisaktoren führen eine Stellaufgabe auf Befehl aus. Sie bedeuten eine gewisse Konkurrenz für Elektromagnete, Schrittschaltmotoren und einige thermoelektrische Aktoren. Ihre Vorteile sind geräuschloses Arbeiten, wiederum hohes Arbeitsvermögen sowie die geringe Leistungsaufnahme. Dagegen sind die wesentlichen Nachteile bei diesen Aktoren der begrenzte Arbeitstemperaturbereich und die langen Reaktionszeiten ohne Zwangskühlung.

Die steigende Anzahl von Anbietern sowohl der Legierungen als auch einbaufertiger Komponenten, der Nachweis zuverlässigen Betriebs in Schlüsselbereichen wie der Automobilindustrie und im Flugzeugbau sowie die Verfügbarkeit technischer Daten und Konstruktionsvorschläge lassen eine beträchtliche Zunahme von Aktoranwendungen auf Shape-Memory-Basis in den nächsten Jahren erwarten.

**Dieter Stöckel**

Prof. Dr. rer. nat. Dieter Stöckel ist technischer Marketingleiter der Raychem Corp., Menlo Park/USA.