

# THERMISCHE STELLELEMENTE IN DER GERÄTETECHNIK

*Thermische Stellelemente spielen im Gerätebau und der Installationstechnik heute eine entscheidende Rolle: Sie öffnen Ventilatorklappen, sichern Toaster oder sorgen für Überhitzungsschutz. Um je nach Anwendungsfall das richtige Stellelement auszuwählen, ist es unerlässlich, die genauen Unterschiede zwischen Thermobimetallen, Dehnstoffen und Formgedächtnislegierungen zu kennen.*

**Thermal devices in house-hold appliances.** Actuators in household appliances and installation technologies are essentially thermal devices, which convert thermal energy into mechanical energy. Thermal actuators are made from thermal bimetals, wax actuators, and shape memory alloys. There will be described some applications with shape memory actuators, which are serially produced since several years.

Stellelemente in der Hausgeräte- und Installationstechnik sind in der Regel thermisch aktive Bauteile, die thermische Energie in mechanische Energie umwandeln. Die mechanische Energie wird zum Ausführen von Stellvorgängen ausgenutzt, wobei derartige Bauteile meistens Temperaturfühler und Stellelemente in einem sind. Thermobimetallen, Dehnstoffen oder Formgedächtnislegierungen hergestellt werden.

Formgedächtnislegierungen eignen sich für thermische Stellelemente besonders gut, da sie Zug-, Druck-, Biegungs- oder Torsionsbewegungen ausführen können [1].

## Stellelemente aus Formgedächtnislegierungen

Der Formgedächtnis-Effekt beruht auf einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung, die nur in wenigen Legierungssystemen beobachtet wird. Ursache für diesen außergewöhnlichen Effekt ist eine temperaturabhängige Änderung der Kristallstruktur, wobei die beteiligten Phasen Austenit und Martensit geordnete Gitterstrukturen aufweisen. Bild 1 verdeutlicht den Mechanismus dieser Umwandlung.

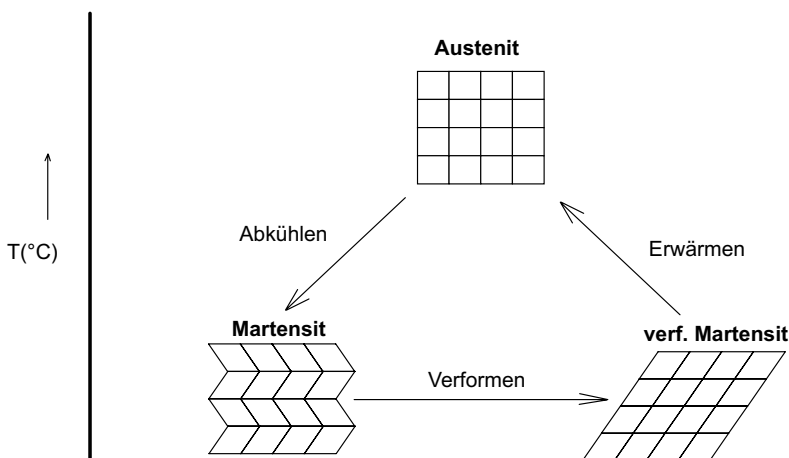
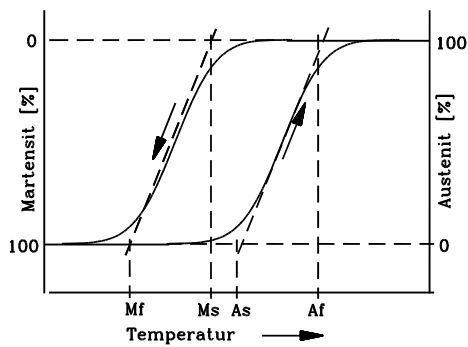


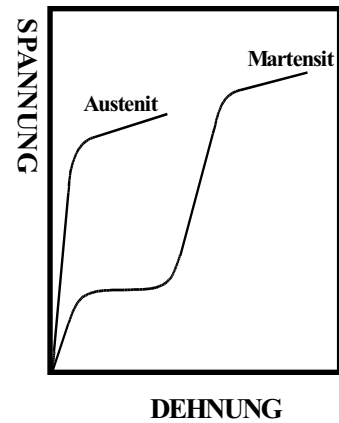
Bild 1  
Der Formgedächtniseffekt geht mit einer Strukturumwandlung einher

Bei hoher Temperatur ist die Legierung austenitisch, bei tieferen Temperaturen martensitisch. Wird ein Bauteil einer martensitischen Formgedächtnislegierung unterhalb einer kritischen Temperatur verformt, so findet nur eine reversible Formänderung durch Verschieben der hochbeweglichen Zwillingsgrenzen statt. Sobald das Bauteil über die Umwandlungstemperatur erwärmt wird, bildet sich Austenit mit der ursprünglich vorhandenen Orientierung, so dass das Bauteil in seine ursprüngliche Form zurückkehrt.

Die Gefügeumwandlung beim Erwärmen oder beim Abkühlen erfolgt bei unterschiedlichen Temperaturen,



**Bild 2**  
Martensit- und Austenitanteile durchlaufen eine Hystereseschleife



**Bild 3**  
Die Phasen Austenit und Martensit bilden charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven.

das heißt, es wird eine Hystereseschleife (Bild 2) durchfahren. Diese Hysterese wird durch die Übergangstemperaturen  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$  und  $M_f$  (Austenit start, Austenit finish, Martensit start, Martensit finish) beschrieben. Je nach Temperatur besteht das Gefüge aus unterschiedlichen Mengen an Martensit und Austenit.

Beide Phasen unterscheiden sich sehr stark in ihren Eigenschaften. Während die Legierung im austenitischen Zustand eine Spannungs-Dehnungs-Charakteristik wie bei konventionellen Legierungen aufweist, erfolgt die Formänderung in martensitischem Zustand zunächst durch Verschiebung der hochbeweglichen Zwillingsgrenzen. Ist diese Verformungsmöglichkeit erschöpft, so weist der Werkstoff im martensitischen Zustand ebenfalls eine konventionelle Spannungs-Dehnungs-Charakteristik mit elastischem und plastischem Bereich auf. (Bild 3)

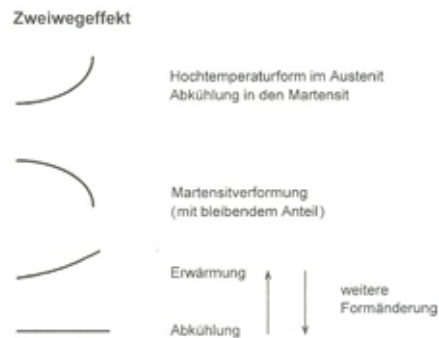
### Der Shape-Memory-Effekt

Wird ein Stellelement aus Formgedächtnislegierung im martensitischen Zustand im Bereich des Martensitplateaus verformt, so findet lediglich ein Verschieben der hochbeweglichen Zwillingsgrenzen statt.

Beim Erwärmen über die  $A_f$ -Temperatur erfolgt die Umwandlung in den Austenit. Damit wird die ursprüngliche Probenform wieder hergestellt. Da eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt, wird hier vom Einwegeffekt gesprochen (Bild 4).



**Bild 4:**  
Beim Einwegeffekt erfolgt eine einmalige Rückstellung



**Bild 5**  
Bauteile mit Zweiwegeeffekt erinnern sich sowohl an eine Hochtemperaturform als auch an eine Niedertemperaturform

Hingegen erinnern sich Bauteile mit Zweiwegeffekt sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Niedertemperaturform. Zur Einstellung des Zweiwegeffektes wird das Stellelement über den Martensitplateau-Bereich hinaus verformt, so dass eine plastische Verformung mit Versetzungsbewegung eintritt. Beim anschließenden Erwärmen erfolgt nur eine teilweise Rückstellung und zwar um den Betrag der Martensitplateau-Länge.

Durch den Einfluss der Versetzungen wurden jedoch erreicht, dass bevorzugte Martensitvarianten gebildet werden, die eine bestimmte Niedertemperaturform hervorrufen. Beim Zweiwegeffekt sind geringere Effektgrößen einstellbar als beim Einwegeffekt, jedoch kann die Rückstellkraft eingespart werden.

## Unterschiedliche Formgedächtnislegierungen

Kommerziell verfügbar sind zurzeit drei Legierungsgruppen:

- NiTi-Legierungen
- CuZnAl-Legierungen
- CuAlNi-Legierungen

Gemessen an der Zahl der Anwendungen haben die NiTi-Legierungen die größte Bedeutung erlangt. Die kostengünstigere Cu-Basis-Legierungen haben allerdings in letzter Zeit an Bedeutung zugenommen. Einen Überblick über Umwandlungstemperaturen, Hysteresen und Zyklenzahlen gibt Diagramm 1.

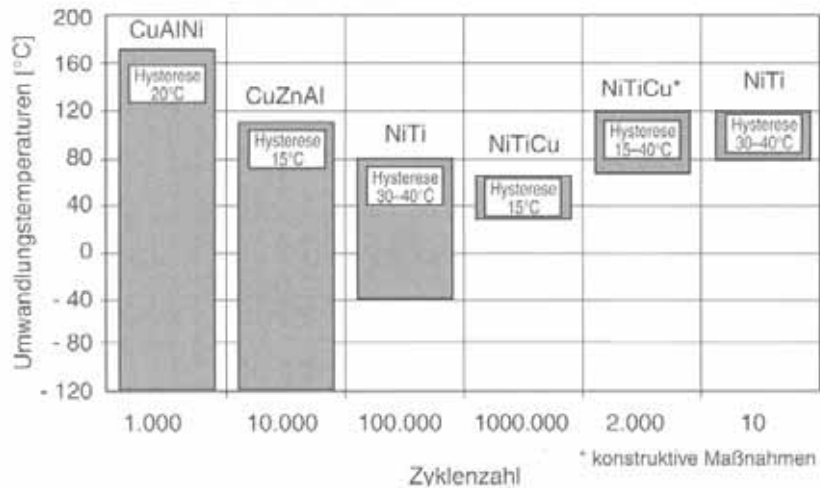


Diagramm 1

Umwandlungstemperaturen, Hysteresen und Zyklenzahlen von Cu-Basis- und NiTi-Formgedächtnislegierungen

## Einflüsse auf Umwandlungstemperatur und Lebensdauer

Im Einsatzfall entwickeln Stellelemente Kräfte und führen gleichzeitig Bewegungen aus, das heißt, sie verrichten Arbeit im physikalischen Sinne. Die Spannungseinwirkung ist dabei nicht ohne Einfluss auf die Umwandlungstemperatur und die Effektgröße.

Mit zunehmender Spannung wird bei allen Elementformen die Umwandlungstemperatur erhöht [2]. Die äußere Gegenkraft kann jedoch nicht beliebig erhöht werden, da mit zunehmender Kraft das Ermüdungsverhalten negativ beeinflusst wird.

Die Diagramme (Bild 6 und 7) gelten für eine Effektgröße von 2 Prozent. Für gerade Drähte werden bei einer Belastung von 70 N/mm<sup>2</sup> Zyklenzahlen von 100 000 erreicht. Im Falle von zylindrischen Schraubenfedern sind bei gleicher Belastung Zyklenzahlen von 1 000 000 möglich.

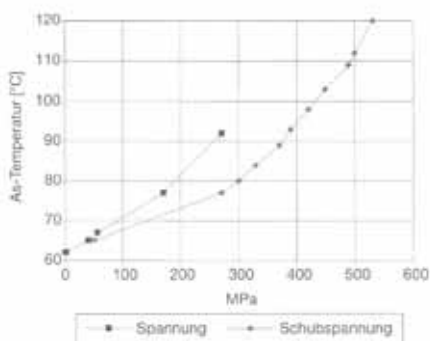


Bild 6

Einfluss der Schubspannung auf die Umwandlungstemperatur von NiTi-Schraubenfedern

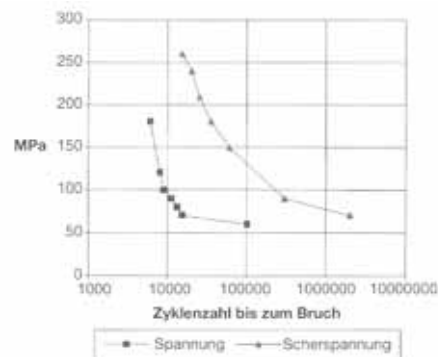


Bild 7

Einfluss von Spannung und Schubspannung auf die Lebensdauer

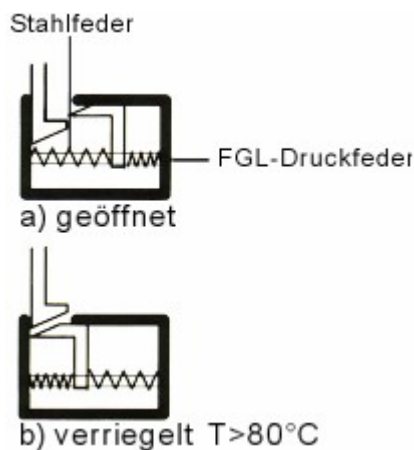
## Memory - Stallelemente in der Praxis

### Sicherheitselemente bei Toastern

Toaster bestimmter Bauart besitzen eine Kunststoffabdeckplatte, die bei Betriebspausen als Staubschutz dient. Nach Inbetriebnahme entstehen über den Toastschlitzen Temperaturen über  $140^{\circ}\text{C}$ . Bei dieser Temperatur würde die Kunststoffabdeckung anschmelzen. Deshalb verhindert nach Beendigung des Toastvorganges ein Sperrmechanismus das Einrasten der Abdeckplatte. Erst wenn die Temperatur soweit abgesunken ist, dass die Kunststoffabdeckung durch Temperatureinwirkung nicht mehr deformiert werden kann, lässt sich der Toaster verschließen. Eine Druckfeder aus Formgedächtnislegierung (FGL) wird durch die Abwärme aktiviert und verhindert ein Einrasten der Kunststoffabdeckung.

Nach dem Abkühlen drückt eine Stahlfeder die NiTi-Feder auf Blocklage zusammen und gibt damit die Einrastöffnung frei. Die Kunststoffabdeckung kann verriegelt werden.

Bild 8  
Konstruktionsprinzip eines Sperrmechanismus bei Toastern



### Temperaturabhängige Verriegelung eines Sterilcontainers

Chirurgische Bestecke werden durch Temperatureinwirkung sterilisiert. Um sicherzustellen, dass die Bestecke die Sterilisierungstemperatur erreicht haben, wurde ein spezieller Verschlussmechanismus entwickelt. Nach Erreichen der Sterilisierungstemperatur schiebt eine Druckfeder aus FGL einen Sperrriegel, der eine Farbmarkierung ausweist, in eine Raststellung. Der Verschluss des Containers ist verriegelt. Vor der Entnahme der Bestecke muss die Farbmarkierung noch sichtbar sein. Damit ist sichergestellt, dass der Sterilcontainer seit der Sterilisierung nicht geöffnet wurde. Zum Öffnen des Behälters wird die abgekühlte Memoryfeder von Hand zusammengedrückt, die Farbmarkierung verschwindet und der Behälterdeckel lässt sich öffnen [3].

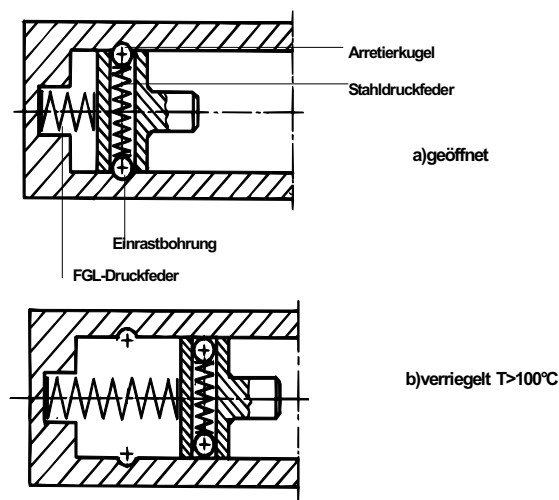


Bild 9  
Prinzipskizze des Verschlusses eines Sterilcontainers

## Verbrühschutz im Brausekopf

Der Warmwasserdurchfluss wird beim Erreichen von rund 50°C unterbrochen, da bei dieser Temperatur das Schmerzempfinden einsetzt. Das Kugelventil ist bei Wasserhähnen im Sieb und beim Duschen im Brausekopf eingebaut. Es besteht aus einer Stahlgegenfeder und einer Druckfeder aus FGL. Der Einbau dieser Sicherheitsventile ist einigen US-Bundesstaaten für Hotels und Krankenhäuser vorgeschrieben. Bei Temperaturen über 50°C kann die Sperre manuell beseitigt werden [4].

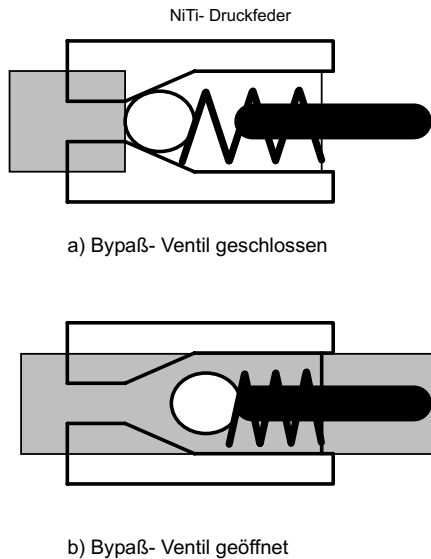
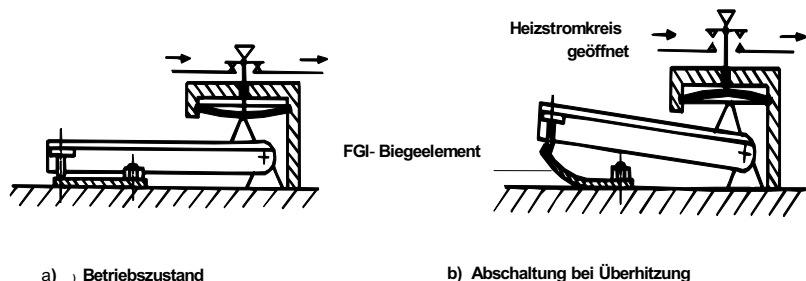


Bild 10  
Kugelventil eines Verbrühschutzes

## Überhitzungsschutz eines Durchlauferhitzers

Elektrische Durchlauferhitzer müssen aus Sicherheitsgründen bei Erreichen einer kritischen Temperatur ihre elektrische Heizung abschalten können. Gleichzeitig muss ein sofortiges Wiedereinschalten vermieden werden. Diese Forderung kann mit Hilfe eines CuZnAl-Biegeelementes mit Zweiwegeffekt gelöst werden. Die Wegänderung erfolgt innerhalb eines engen Temperaturintervalls von 60-65°C. Der im Betriebszustand flache Biegestreifen aus FGL biegt sich beim Erreichen einer Temperatur von 65°C aus und aktiviert eine Schnappscheibe, die den Heizstrom unterbricht. Die Unterbrechung dauert so lange, bis infolge Abkühlung das CuZnAl-Element in den Martensitzustand zurückgekehrt ist. Erst danach kann die Schnappscheibe manuell zurückgestellt werden. Bei diesem Anwendungsfall wurde eine CuZnAl-Legierung eingesetzt, da diese eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt und nur eine geringe Zyklenzahl gefordert wird.

Bild 11  
Überhitzungsschutz eines Durchlauferhitzers



## Klappentätigkeit bei Ventilatoren

Die Verschlussklappe des Ventilators wird durch ein NiTi-Biegeelement mit Zweiwegeffekt betätigt. Das Element wird durch ein PTC-Element beheizt. Die Bewegung des freien Endes wird durch Hebelwirkung übertragen und bewirkt ein Öffnen und

Schließen der Lamellen. Die Rückstellung wird durch eine Stahlgegenfeder unterstützt. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Elementes aus FGL entsteht eine verzögerte Rückstellbewegung der Lamellen.

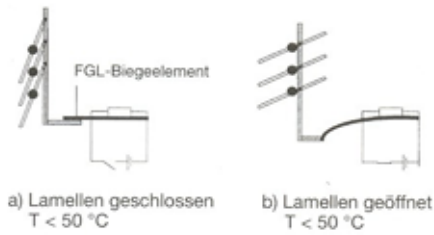


Bild 12

Klappenbestätigung bei Ventilatoren

### Elektrische Kontaktierung bei einem Blindenschriftlesegerät

Bei einem Blindenschriftlesegerät werden elektrische Signale in mechanische Bewegung umgewandelt. Der Blinde ertastet diese Bewegungen. Aufgrund von verschiedenen Bewegungen erhält der Benutzer genügend Informationen, so dass der Text verstanden werden kann. Die bisherige Kontaktierung erfolgte mit CuBe-Kontakten. Aufgrund der geringeren Elastizität von konventionellen Werkstoffen und der Bewegungen des Piezokristalles kam es immer wieder zu Kontaktstörungen. Bei superelastischen NiTi-Kontakten steht eine sehr viel größere elastische Wegentfaltung bei konstanter Kraft zur Verfügung, so dass eine sichere Kontaktierung gewährleistet werden kann. Die Montage der NiTi-Kontakte erfolgt in mehreren Schritten. Das vorgewölbte NiTi-Element wird bei minus 30°C flachgedrückt und dann im kalten Zustand in die vorgesehene Kontaktierstelle eingeschoben. Danach wird beim Erreichen der Raumtemperatur selbsttätig die Kontaktkraft entwickelt [5].

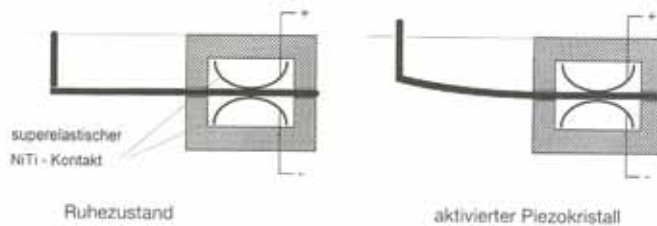


Bild 13

Superelastische NiTi-Kontakte

### Konventionelle thermische Stellelemente

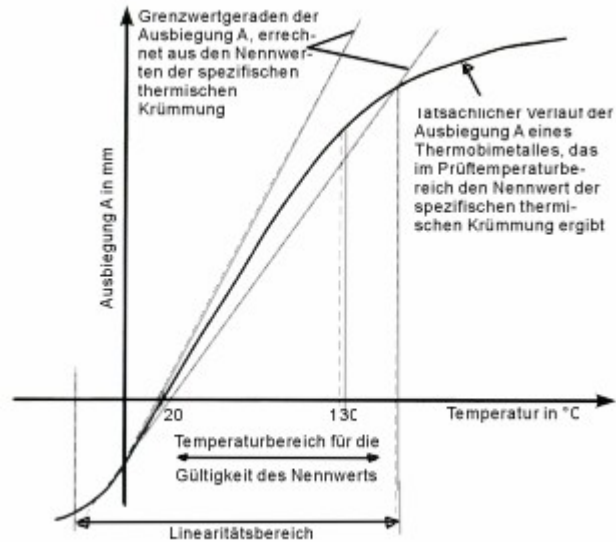
Zu den konventionellen thermischen Stellelementen gehören:

- Thermobimetalle
- Thermobimetallschnappelemente
- Dehnstoffelemente

### Thermobimetalle

Thermobimetalle sind Schichtverbundwerkstoffe, die aus mindestens zwei Komponenten mit unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten bestehen. Da sich bei Erwärmung die eine Komponente stärker ausdehnt als die andere, entsteht eine temperaturabhängige Krümmung des Thermobimetalles. Diese thermisch bedingte Ausbiegung ist nach DIN 1715 genormt. Als Kennwert wird darin die spezifisch thermische Krümmung  $k$  eingeführt. Die spezifisch thermische Krümmung zeigt mit steigender Temperatur keinen streng linearen Verlauf, sondern entspricht einer Kurve wie in Bild 14 dargestellt.

Bild 14  
Schematische Darstellung der Ausbiegekurve eines Thermobimetalls

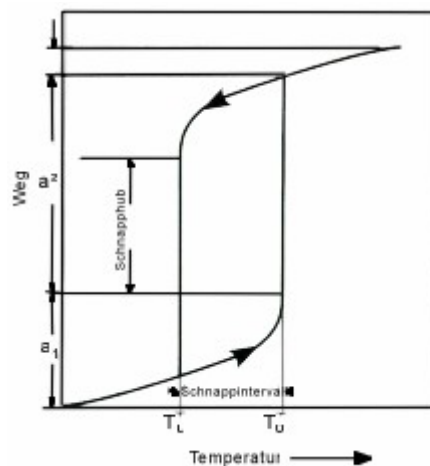


Der Nennwert der spezifischen thermischen Krümmung wird für den Temperaturbereich von 20 bis 130°C angegeben. Als Linearitätsbereich wird der Temperaturbereich definiert, in dem die thermische Ausbiegung nicht mehr als  $\pm 5$  Prozent von der Ausbiegung abweicht, die sich aus dem Nennwert der spezifischen Krümmung und der Nenndicke errechnet. Außerhalb des Linearitätsbereiches ist in gewissen Grenzen noch eine abnehmende, für viele Anwendungsfälle aber noch ausreichende Ausbiegung vorhanden. Deshalb geht der Anwendungsbereich in vielen Fällen über den Linearitätsbereich hinaus- Beruhend auf der temperaturabhängigen Ausbiegung des streifenförmigen Verbundwerkstoffes können verschiedene Bauelementformen wie Streifen, Scheiben, Spiralen und Wendeln hergestellt werden [6].

### Thermobimetallschnappelemente

Teile aus Thermobimetall zeigen beim Erwärmen und Abkühlen im Allgemeinen eine stetige Gestaltsänderung. Durch entsprechende mechanische Vorwölbung kann unter Einhaltung bestimmter Grenzbedingungen ein Schnappeffekt erreicht werden. Beispiel: eine kalottenförmig gewölbte kreisrunde Scheibe.

Bild 15  
Weg-Temperatur-Kennlinie eines Schnappelementes



Wie in Bild 15 schematisch dargestellt ist, wölben sich solche Scheiben bei Temperaturerhöhung zunächst stetig um den Betrag  $a_1$ . Sie erreichen beim oberen Schnapppunkt  $T_0$  einen instabilen Spannungszustand und springen in eine entgegengesetzt gewölbte Form um. Dabei wird der Weg  $a_2$  zurückgelegt. Mit zunehmender Temperatur wölbt sich die Scheibe um den Betrag  $a_3$  [6].

## Dehnstoffelemente

Dehnstoffelemente besitzen einen formsteifen, druckfesten Behälter, in dem sich eine Dehnstofffüllung befindet. Bei Temperaturerhöhung schmilzt dieser Dehnstoff. Die beim Schmelzvorgang auftretende erhebliche Volumenzunahme wird über einen Kolben zur Arbeitsleistung genutzt. Beim Abkühlen erfolgt die Rückbewegung mit Hilfe einer äußeren Rückstellfeder. Die erforderliche Gegenkraft beträgt rund 20 bis 30 Prozent der maximal zulässigen Belastbarkeit. Die Dehnstoffelemente arbeiten häufig mit linearer Kennlinie (Bild 10) [7].

## Vergleich zwischen den Stellelementen

Da die thermischen Stellelemente unterschiedlich physikalische Effekte ausnutzen, sind sie schwierig miteinander zu vergleichen. In der Tabelle 1 wird der Versuch unternommen, die wichtigsten Kennwerte zu vergleichen.

Bei den in dieser Tabelle aufgeführten Werten handelt es sich um Richtwerte. Je nach Anwendungsfall können Sonderformen eingesetzt werden, die möglicherweise größere Kennwerte aufweisen. Memoryelemente haben wie Thermobimetall-Schnapscheiben ein sprunghaftes Temperatur-Weg-Verhalten, während Thermobimetall-Streifen und Dehnstoffelemente eine lineare Temperatur - Weg -Charakteristik aufweisen.

Gegenüber Thermobimetallen können Memory-Elemente jedoch eine wesentlich größere Formänderung ausführen, während die Kraftentwicklung vergleichbar ist. Zusätzlich haben Memorylegierungen den großen Vorteil, dass aus ihnen Zug-, Druck-, Biegungs- oder Torsionselemente hergestellt werden können. Aufgrund des hohen Arbeitsvermögens von Memoryelementen werden so oftmals platzsparende Problemlösungen erstellt. Bei hohen Anwendungstemperaturen oder hysteresefreiem Regelverhalten ergeben Thermobimetalle vorteilhafte Konstruktionslösungen. Das gleiche gilt im wesentlichen für Thermobimetallschnappelemente, wobei jedoch nur ein begrenzter Schnapphub von maximal 1 mm zur Verfügung steht. Bei Anwendungen mit sehr hohen Stellkräften und nahezu hysteresefreiem Regelverhalten sind Dehnstoffelemente im Vorteil, jedoch muss ein relativ träges Regelverhalten beachtet werden.

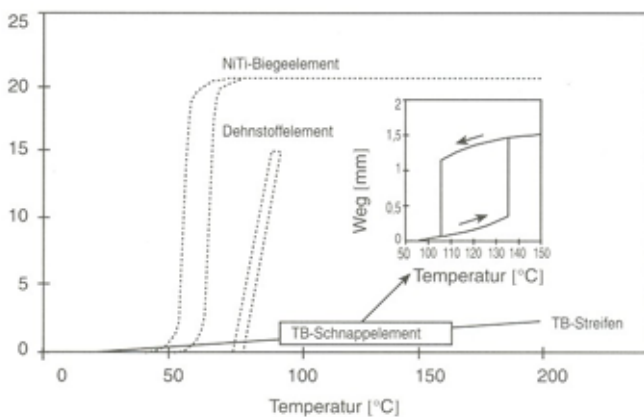


Bild 16

Schematische Temperatur-Weg-Kennlinien von thermischen Stellelementen  
 Abmessung der Elemente:  
 NiTi-Biegeelement: Länge 30 mm; Dicke 1 mm;  
 Thermobimetallstreifen: Länge 30 mm; Dicke 1 mm;  
 Thermobimetallschnappelement: Scheibendurchmesser 40 mm; Dicke 0,35 mm;  
 Dehnstoffelement: Länge 51 mm.

Tabelle 1 Vergleich zwischen Memory- und konventionellen Stellelementen

	FG-Stellelemente		Thermobimetall		Dehnstoffelemente
			Streifen	Schnappelement	
Temp.-Weg-Abhängigkeit	sprunghaft		linear	sprunghaft	(linear)
max. Einsatztemperaturen	80°C (120°C-170°C)		250°C-550°C	350°C	ca. 110°C
Hysterese	15°C-30°C		keine	6°C-250°C	gering
Formänderung	thermoelastische Umwandlung		thermische Ausdehnung	thermische Ausdehnung	Volumenausdehnung
Bewegungsarten	Zug, Druck, Torsion, Biegung, Schrumpfung		Biegung	Hub	Hub
Arbeitsvermögen	hoch typ. Wert 50 Nmm		gering typ. Wert 5 Nmm	gering typ. Wert 10 Nmm	sehr hoch max. 15 000 Nmm
Rückstellung	(Gegenkraft)		selbsttätig	selbsttätig	Gegenkraft
Arbeitsverrichtung	Nur beim Erwärmen		Erwärmen, Abkühlen	Erwärmen, Abkühlen	nur beim Erwärmen

## Literatur

- 1 P. Tautzenberger, D. Stöckel: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 81 (1986)12, 703-708
- 2 P. Tautzenberger, H.-P. Kehrer, H. Nußkern, H. H. Kocher: ICOMAT 1992
- 3 H.-P. Kehrer, H. Nußkern: Metall 46 (1992) 7, S. 675
- 4 D. Stöckel: Raychem Informationen
- 5 H.-P. Kehrer, H. Nußkern: ACTUATOR 1994
- 6 Rau, G.: Thermobimetalle, Firmenschrift 1989
- 7 Behr-Thomson: Dehnstoff-Arbeits-element, Firmenschrift

## Der Autor dieses Beitrags

Dipl.-Ing. (FH) Hans Nußkern, Jahrgang 1953, studierte an der FH Aalen Werkstoffkunde und Oberflächentechnik. Danach war er sieben Jahre Leiter der Werkstoffprüfung und Umweltschutzbeauftragter bei der De-gussa Präzisionstechnik, Werk Birkenfeld. Seit 1987 ist er Entwicklungsingenieur bei der Firma G. RAU GmbH & Co., Pforzheim.