

THERMISCHE AKTOREN







THERMISCHE STELLELEMENTE SPIELEN HEUTE IN DER AUTOMOBIL-,
GERÄTE- UND INSTALLATIONSTECHNIK EINE ENTSCHIEDENDE 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.

THERMISCHE AKTOREN IN DER AUTOMOBIL- UND GERÄTETECHNIK

Thermische Stellelemente im Gerätebau und der Installationstechnik sind in der Regel aktive Bauteile, die thermische Energie in mechanische Energie umwandeln. Die mechanische Energie wird zum Ausführen von Stellvorgängen genutzt, wobei derartige Bauteile meistens Temperaturfühler (Sensor) und Stellelement (Aktor) in einem sind. Thermische Stellglieder können mit Thermobimetallen, Dehnstoffen oder Formgedächtnislegierungen hergestellt werden. Um je nach Anwendungsfall das passende Stellelement auswählen zu können, sollten die Unterschiede bekannt sein.

Shape-Memory-Alloys (SMA) bzw. Formgedächtnislegierungen (FGL) eignen sich für thermische Stellelemente besonders gut, da sie Zug-, Druck-, Biegungs- oder Torsionsbewegungen ausführen können.

Formgedächtnis- bzw. Shape-Memory-Effekt

Der Formgedächtniseffekt 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. Abbildung 1 verdeutlicht den Mechanismus dieser Umwandlung.

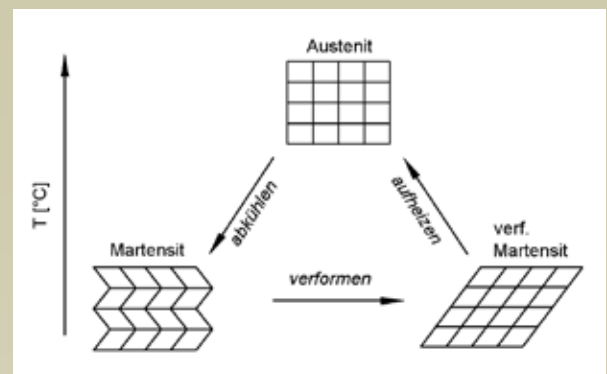


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Formgedächtniseffektes

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 Gefügeumwandlungen beim Erwärmen bzw. beim Abkühlen erfolgen bei unterschiedlichen Temperaturen, das heißt, es wird eine Hystereseschleife durchfahren.

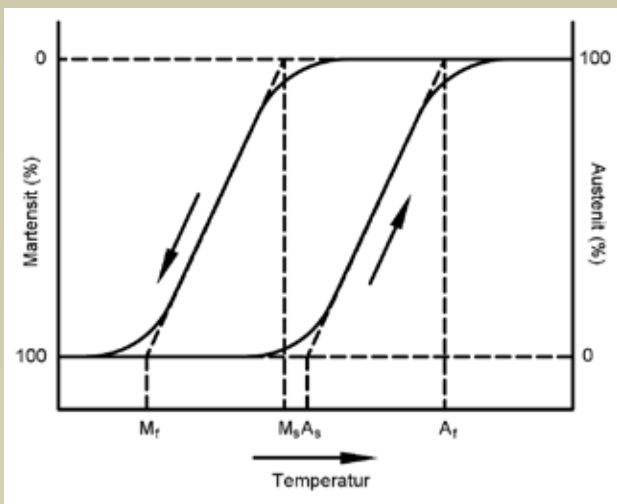


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit des Martensit- und Austenitanteil

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 bzw. Austenit (Abbildung 2).

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 (Abbildung 3).

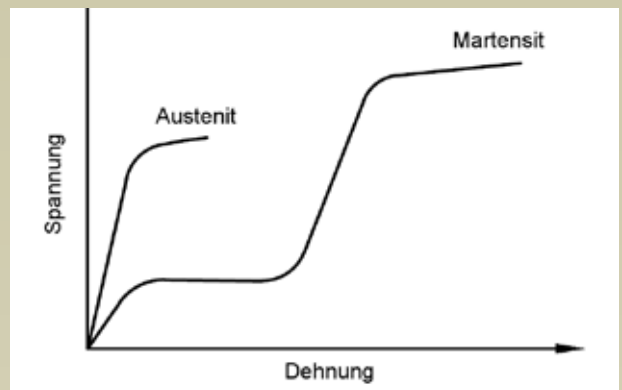


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Charakteristik von Austenit und Martensit

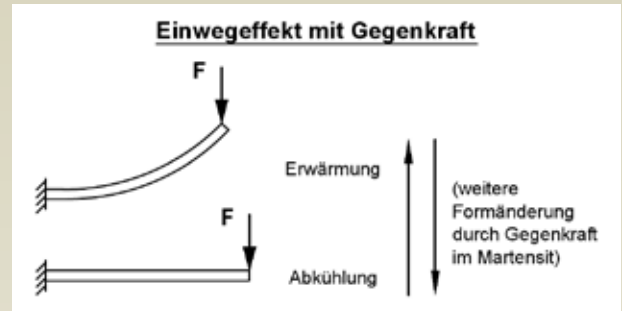
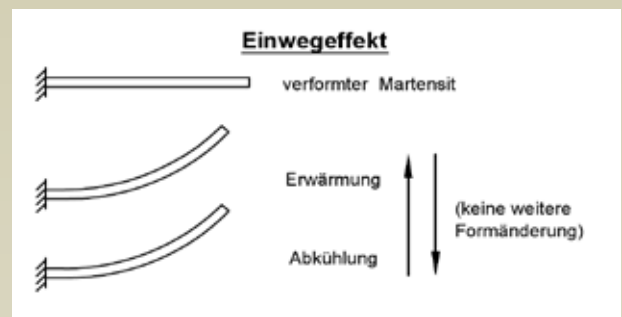


Abbildung 4: Darstellung des Einwegeffekts

Wird ein Stellelement aus einer 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 (Abbildung 4). Mittels einer geeigneten Gegenkraft kann das Stellelement aber im martensitischen Zustand wieder verformt werden.

Bauteile mit Zweieffekt erinnern sich sowohl an eine Hochtemperaturform als auch an eine Niedertemperaturform. Zur Einstellung des Zweieffektes ist eine spezielle Vorbehandlung nötig, bei der eine Versetzungsbewegung eintritt. Beim anschließenden Erwärmen erfolgt dann nur eine teilweise Rückstellung.

Durch den Einfluss der Versetzungen wird erreicht, dass bevorzugte Martensitvarianten gebildet werden, die eine bestimmte Niedertemperaturform hervorrufen (Abbildung 5). Beim Zweieffekt sind allerdings geringere Effektgrößen einstellbar als beim Einwegeffekt, jedoch entfällt die Rückstellkraft.

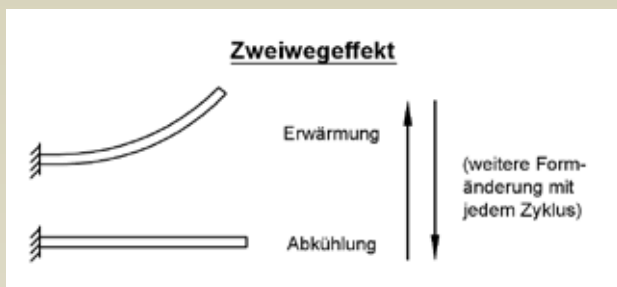


Abbildung 5: Darstellung des Zweieffektes, Erinnerung an Hoch- und Niedertemperaturform

Unterschiedliche Formgedächtnislegierungen

Von einer Vielzahl von Legierungssystemen mit martensitischer Umwandlung haben sich folgende Legierungen für die praktische Anwendung herauskristallisiert. Dazu gehören:

- Binäre NiTi-Legierung
- Ternäre NiTi-Legierungssysteme mit Co, Cr, Cu, Fe oder Nb

Die ternären Legierungen mit Co, Cr, Fe zeichnen sich dabei durch eine Absenkung der Umwandlungstemperaturen im Vergleich zum binären Legierungssystem aus. Mit Cu legiertes NiTi weist eine geringere Hysterese auf. Bei mit Nb legiertem NiTi kann durch besondere Vorbehandlung die Hysterese einmalig auf bis zu 150 K erweitert werden. Dies eignet sich beispielsweise für kryogene Schrumpfelemente, bei denen die aufwendige Tieftemperatur-Lagerung entfallen kann.

Die ursprünglich als vielversprechend erachteten Cu-Basis-Legierungssysteme haben sich bisher in der Praxis nicht durchsetzen können. Gleiches gilt für andere Legierungssysteme mit martensitischer Umwandlung wie beispielsweise Fe-Basis-FGL.

Einfluss der Belastung auf Umwandlungstemperatur und Lebensdauer

Im Einsatzfall entwickeln Stellelemente Kräfte und führen gleichzeitig Bewegungen aus, d.h. sie verrichten Arbeit im physikalischen Sinne. Die Größe der Spannung hat dabei Einfluss auf die Umwandlungstemperatur und die Effektgröße (Abbildung 6). Mit zunehmender Spannung wird bei allen Elementformen die Umwandlungstemperatur erhöht. Die äußere Gegenkraft kann jedoch nicht beliebig erhöht werden, da mit zunehmender Kraft das Ermüdungsverhalten negativ beeinflusst wird (Abbildung 7).

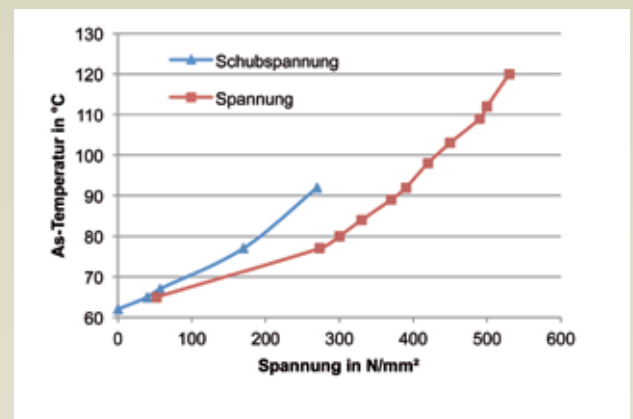


Abbildung 6: Einfluss von Spannung und Schubspannung auf die Umwandlungstemperatur

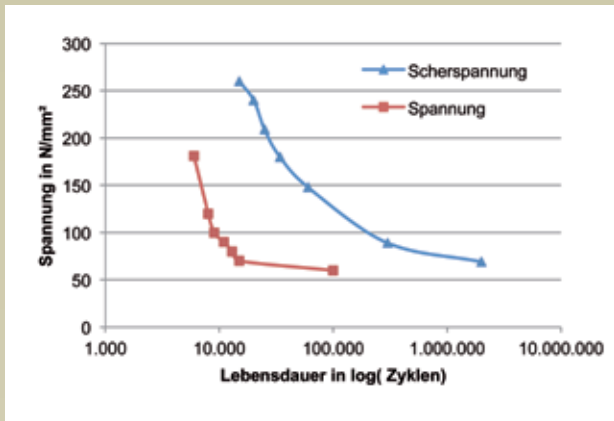


Abbildung 7: Einfluss von Spannung und Schubspannung auf die Lebensdauer

Die in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigten Kennwerte gelten für eine Effektgröße von 2%. Für gerade Drähte werden bei einer Belastung von 70 N/mm² Zyklenzahlen von bis zu 100.000 erreicht. Im Falle von zylindrischen Schraubenfedern sind bei gleicher Belastung Zyklenzahlen von bis zu 1.000.000 möglich.

FGL-Aktorelemente in der Praxis

Typische Anwendungsgebiete für Formgedächtnis-Aktorelemente sind dort gegeben, wo bei Temperaturerhöhung mechanische Arbeit verrichtet werden soll und diese aufgrund ihres großen Arbeitsvermögens platzsparende Problemlösungen ermöglichen. Nachfolgend werden einige dieser Anwendungen beschrieben.

Verriegelungssperre bei Toastern

Toaster bestimmter Bauart besitzen eine bei Raumtemperatur verriegelbare Kunststoffabdeckplatte, die bei Betriebspausen als Staubschutz dient. Bei Erstbenützung ist aufgrund einer elektrischen Abschaltung ein Einschalten des Heizstromes erst nach manuellem Entriegeln und Öffnen des Deckels möglich. Im Betrieb entstehen dann über den Toasterschlitzen Temperaturen bis über 140°C. Wäre bei diesen Temperaturen ein Verschließen und Arretieren durchführbar, würde die Kunststoffabdeckung anschmelzen.

Deshalb verhindert nach Beendigung des Toastvorganges eine durch die Abwärme aktivierte Druckfeder aus einer NiTi-Formgedächtnislegierung (FGL) bei zu frühem Schließen das Einrasten der Abdeckplatte (Abbildung 8a).

Erst wenn die Temperatur soweit abgesunken ist, dass die Kunststoffabdeckung nicht mehr deformiert werden kann, drückt eine Stahlfeder die NiTi-Feder auf Blocklänge zusammen und damit kann die Abdeckplatte wieder verriegelt werden (Abbildung 8b).

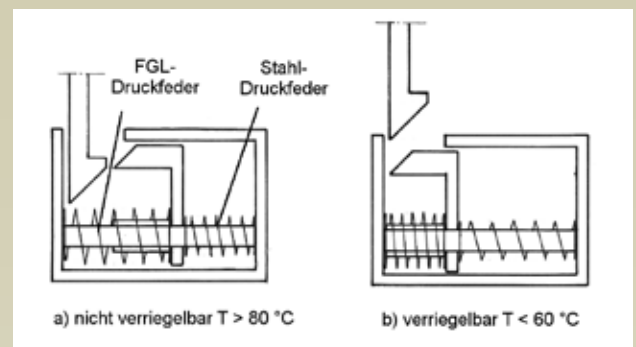


Abbildung 8: Konstruktionsprinzip eines Sperrmechanismus bei Toastern

Verriegelung eines Sterilcontainers

Chirurgische Bestecke werden in Behältern aus Metall eingelegt und in diesen Containern durch Temperatureinwirkung sterilisiert. Zur Verriegelung der Sterilcontainer und um sicherzustellen, dass die Bestecke die Sterilisierungstemperatur erreicht haben, wurde ein spezieller Verschlussmechanismus entwickelt. Bei Erreichen der Sterilisierungstemperatur schiebt eine Druckfeder aus FGL einen Sperrriegel in eine Raststellung, zugleich wird eine Farbmarkierung sichtbar. Der Verschluss des Containers ist verriegelt (Abbildung 9b).

Damit sichergestellt ist, dass die geforderte Temperatur erreicht wurde und der Sterilcontainer seit der Sterilisierung nicht geöffnet wurde, muss vor der Entnahme der Bestecke die Farbmarkierung noch sichtbar sein. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wird zum Öffnen des Behälters der Sperrriegel zurück geschoben und damit die abgekühlte Memoryfeder zusammengedrückt, die Farbmarkierung wird wieder verdeckt und der Behälterdeckel lässt sich öffnen (Abbildung 9a).

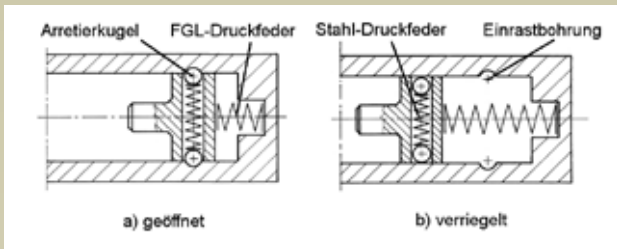


Abbildung 9: Prinzipskizze des Verschlusses eines Sterilcontainers

Verbrühschutz im Sanitärbereich

Zum Schutz der Personen muss bei Nutzung von Duschen etc., der Warmwasserdurchfluss beim Erreichen von ca. 50°C unterbrochen werden, da bei dieser Temperatur das Schmerzempfinden einsetzt. Das Kugelventil ist bei Wasserhähnen im Sieb und bei Duschen im Brausekopf eingebaut. Es besteht aus einer Druckfeder aus FGL und einer Stahl-Gegenfeder (Abbildung 10). Der Einbau dieser Sicherheitsventile ist in einigen US-Bundesstaaten für Hotels und Krankenhäuser vorgeschrieben. Werden Temperaturen über 50°C gewünscht kann die Sperre manuell beseitigt werden.

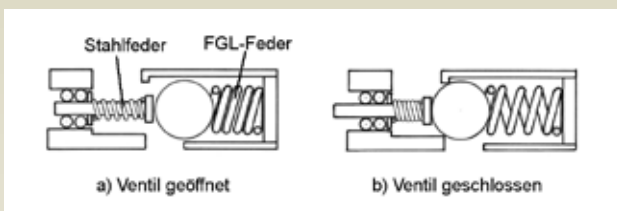


Abbildung 10: Kugelventil eines Verbrühschutzes

Überhitzungsschutz im Wasser-Durchlauferhitzer

In elektrischen Durchlauferhitzern muss aus Sicherheitsgründen bei Erreichen einer kritischen Temperatur die elektrische Heizung abgeschaltet werden. Dies muss sehr schnell erfolgen und gleichzeitig darf kein sofortiges Wiedereinschalten möglich sein. Diese Forderung ist mit einem Biegeelement aus einer CuZnAl-Legierung mit Zweibegeeffekt aufgrund deren guter Wärmeleitfähigkeit erreichbar. Die Wegänderung erfolgt innerhalb eines engen Temperaturintervalls von ca. 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. Nach Abkühlung des CuZnAl-Elements und Rückkehr in den flachen (Martensit-) Zustand kann durch manuelles Zurückstellen der Schnappscheibe der Stromkreis wieder geschlossen werden (Abbildung 11).

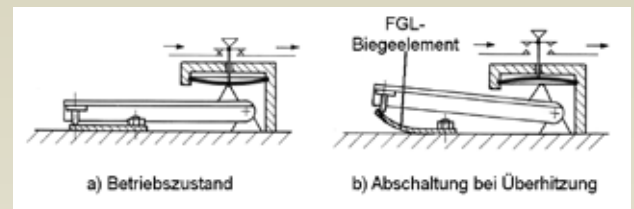


Abbildung 11: Überhitzungsschutz eines Durchlauferhitzers



Klappenöffnung bei Ventilatoren

Die Verschlussklappe in Lamellenform eines Ventilators wird durch ein NiTi-Biegeelement mit Zweivegeeffekt betätigt. Das einseitig eingespannte streifenförmige Element wird durch ein PTC-Element beheizt. Die Bewegung des freien Endes bewirkt ein Öffnen und Schließen der Lamellen. Die Rückstellung kann durch eine Stahlgegenfeder unterstützt werden. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Elementes aus FGL entsteht eine gewollte verzögerte Rückstellbewegung der Lamellen (siehe Abbildung 12).

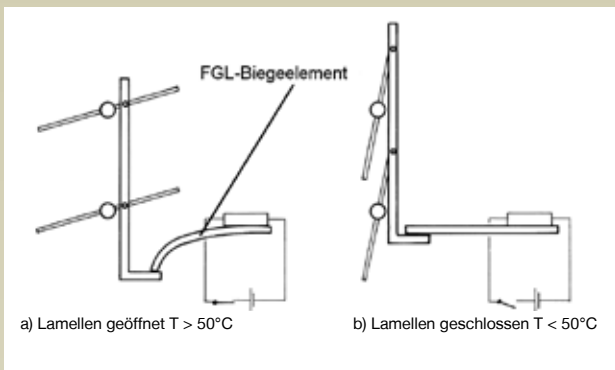


Abbildung 12: Klappenbetätigung bei Ventilatoren

Konventionelle thermischen Stellelemente

Je nach Art der eingesetzten Energieform erfolgt eine Unterscheidung in elektromechanische, hydraulische, pneumatische oder thermische Stellantriebe. Diese Vielfalt von unterschiedlichsten Stellelementen können nur sehr schwierig miteinander verglichen werden. Im Folgenden wird daher nur die Gruppe der thermisch aktiven Aktoren näher beschrieben.

Thermobimetallelemente mit kontinuierlicher Ausbiegung

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 Thermobimetalls. Die Größe dieser thermisch bedingten Ausbiegung ist nach DIN 1715 genormt.

Als Kennwert gilt darin die spezifisch thermische Ausbiegung A bzw. die Krümmung k . Die Ausbiegung zeigt mit steigender Temperatur keinen streng linearen Verlauf, sondern entspricht einer Kurve wie in Abbildung 13 dargestellt.

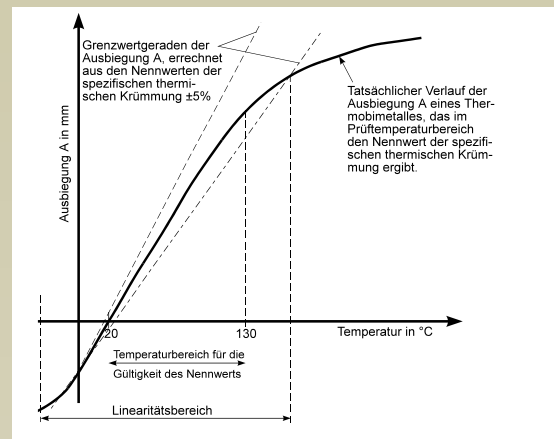


Abbildung 13: Ausbiegung eines Thermobimetalls nach DIN 1715

Der Nennwert der spezifischen thermischen Ausbiegung bzw. 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 $\pm 5\%$ von dem Wert abweicht, der sich aus dem Nennwert der spezifischen Ausbiegung und der Nenndicke errechnet. Außerhalb des Linearitätsbereiches ist in gewissen Grenzen 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 kontinuierlichen Ausbiegung des streifenförmigen Elementes können verschiedene Bauelementformen wie Scheiben, Spiralen und Wendeln hergestellt werden. Da Thermobimetalle bei Erwärmung und Abkühlung Kräfte übertragen können, sind sie in vielen Bereichen als Regelelemente einsetzbar.





Thermobimetallschnappelemente

Teile aus Thermobimetall zeigen beim Erwärmen und Abkühlen im Allgemeinen eine stetige Gestaltänderung. Durch Einbringen von Spannungen z.B. durch entsprechende mechanische Vorwölbung, wird unter Einhaltung bestimmter Grenzbedingungen ein diskontinuierliches Verhalten, ein Schnappeffekt erreicht. Das geometrisch einfachste Schnappelement ist eine kalottenförmig gewölbte kreisrunde Scheibe. Es sind jedoch ebenso komplexere Schnappelementformen machbar.

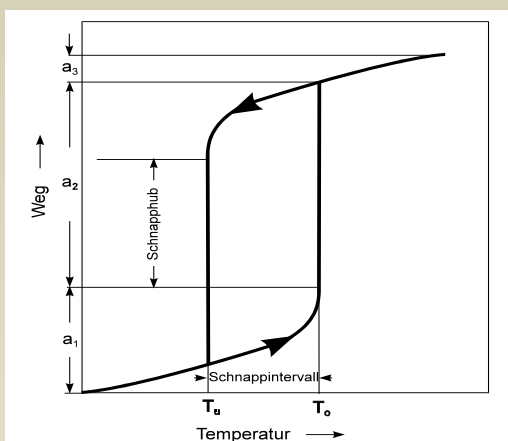


Abbildung 14: Weg-Temperatur-Kennlinie eines Schnappelementes

Wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt ist, wölben sich solche Scheiben bei Temperaturerhöhung zunächst stetig um den Betrag a_1 . Sie erreichen beim oberen Schnappunkt T_o 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 . Bei Abkühlung mit entsprechender Hysterese erfolgt bei der unteren Schnapptemperatur T_u ein Zurückspringen in die Ausgangslage.

Bei der späteren Anwendung einwirkende Kräfte und deren Wirkrichtung beeinflussen selbstverständlich die Kennlinie im Vergleich zur freien Scheibe.

Dehnstoffelemente

Dehnstoffelemente besitzen einen formsteifen, druckfesten Behälter, in dem sich eine Dehnstofffüllung befindet. Die bei Temperaturerhöhung auftretende erhebliche Volumenzunahme wird über einen Kolben zur Arbeitsleistung genutzt. Beim Abkühlen erfolgt die Rückbewegung mit Hilfe einer äußeren Rückstellfeder. Die erforderliche Gegenkraft beträgt ca. 20-30% der maximal zulässigen Belastbarkeit. Die Dehnstoffelemente arbeiten häufig mit linearer Kennlinie.

Vergleich der Eigenschaften von thermischen Stellelementen

Da die thermischen Stellelemente unterschiedlich physikalische Effekte ausnutzen, sind diese nur bedingt untereinander vergleichbar. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der wichtigsten Kennwerte. Bei den dort aufgeführten Werten handelt es sich um Richtwerte. Je nach Anwendungsfall können Sonderelementformen eingesetzt werden, die möglicherweise deutlich abweichende Kennwerte aufweisen.

FGL-Aktorelemente haben ähnlich wie Thermobimetall-Schnappscheiben ein sprungartiges Temperatur-Weg-Verhalten, während Thermobimetall-Streifen und Dehnstoffelemente eine lineare Temperatur-Weg-Charakteristik aufweisen.

Im Vergleich zu Thermobimetallen besitzen Memory-Elemente jedoch ein wesentlich größeres Arbeitsvermögen, dadurch sind oftmals platzsparende Problemlösungen möglich. Zusätzlich haben Memorylegierungen den großen Vorteil, dass aus ihnen Zug-, Druck-, Biegungs- oder Torsionselemente hergestellt werden können.

Bei hohen Anwendungstemperaturen oder hysteresefreiem Regelverhalten ergeben sich mit Thermobimetallen vorteilhafte Konstruktionslösungen. Desweiteren erfolgt bei Thermobimetallen mit entsprechender Arbeitsverrichtung die Rückstellung selbsttätig.

Bei Anwendungen mit sehr hohen Stellkräften und nahezu hysteresefreiem Regelverhalten sind Dehnstoffelemente im Vorteil, jedoch muss ein relativ träges Regelverhalten beachtet werden.

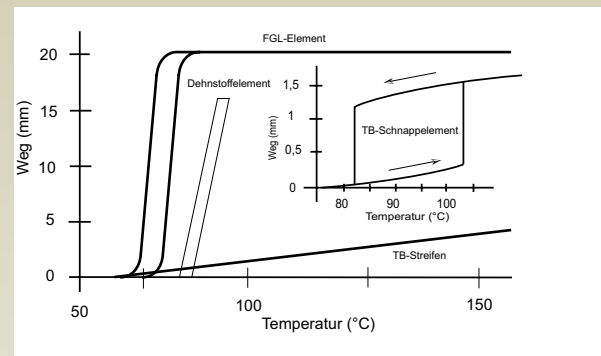


Abbildung 15: Schematische Temperatur-Weg-Kennlinien von thermischen Stellelementen. Abmessung der Elemente: NiTi-Biegeelement: Länge 30 mm; Dicke 1 mm; Thermobimetallstreifen: Länge 30 mm; Dicke 1 mm; Thermobimetallschnappelement: Scheibendurchmesser 40 mm; Dicke 0,35 mm; Dehnstoffelement: Länge 51 mm; Durchmesser 20,5 mm

	FGL-Aktoren	Thermobimetall-Streifen	Thermobimetall-Schnappelemente	Dehnstoffelemente
Temp.-Weg-Abhängigkeit	sprungartig	linear	sprungartig	linear
Max. Einsatztemperaturen	80 °C (120 - 170 °C)	250 - 550 °C	350 °C	ca. 110 °C
Hysterese	15° - 30 °C	keine	6° - 250 °C zur Formgebung einstellbar	gering
Formänderung	thermoelastische Umwandlung	thermische Ausdehnung	thermische Ausdehnung	Volumenausdehnung
Bewegungsarten	Zug, Druck, Torsion, Biegung, Schrumpfung	Biegung, Druck	Hub, Druck	Hub
Arbeitsvermögen	hoch typ. 50 Nmm	gering typ. 5 Nmm	gering typ. 10 Nmm	sehr hoch max. 15.000 Nmm
Rückstellung	Gegenkraft	selbsttätig	selbsttätig	Gegenkraft
Arbeitsverrichtung	nur beim Erwärmen	Erwärmen, Abkühlen	Erwärmen, Abkühlen	nur beim Erwärmen

Tabelle 1: Vergleich thermischer Aktoren

