

---

# Formgedächtnislegierungen: Charakteristika und Potentiale in optischen und feinwerktechnischen Anwendungen

Dr. Alexander Czechowicz<sup>1</sup> und Dr. Sven Langbein<sup>2</sup>

## 1. Einleitung

Feinwerktechnische Systeme, ganz egal ob in der Medizintechnik, in der Luftfahrttechnik oder in optischen bzw. messtechnischen Systemen, verlangen nach immer kleineren Antrieben. Die Miniaturisierbarkeit herkömmlicher Antriebe, wie beispielsweise Elektromotoren, hat jedoch ihre Grenzen erreicht. Nicht nur der fertigungstechnische Aufwand, sondern auch die Leistungsfähigkeit dieser Antriebe stellen in Bezug auf die Miniaturisierung enorme Probleme dar. Um den Anforderungen kleiner und leistungsstarker Antriebssysteme gerecht zu werden, ist der Einsatz neuer Aktorprinzipien häufig eine Lösung. Insbesondere die Einfachheit eines Antriebes auf der Basis von Multifunktionswerkstoffen kann sich positiv auf die Kosten und Baugröße von feinmechanischen Antriebs- und Sensorsystemen auswirken. Eine Alternative zu herkömmlichen Antrieben stellen in diesem Sinne Formgedächtnislegierungen (FGL) dar. Neben der kleinen Baugröße und des einfachen Aufbaus bieten FGL noch den Vorteil des geringen Gewichtes, der Reinraumtauglichkeit und der sehr guten

---

1 Dr.-Ing. Alexander Czechowicz,  
Zentrum für angewandte Formgedächtnistechnik (ZAF)  
Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW)  
Papenberger Straße 49, D-42859 Remscheid  
2 Dr. Sven Langbein, FG-Innovation GmbH, D-44801 Bochum

elektromagnetischen Verträglichkeit. Für den Einsatz in der Feinwerktechnik bietet diese Antriebstechnologie deshalb optimale Voraussetzungen.

## 2. Was sind Formgedächtnislegierungen?

Formgedächtnislegierungen, kurz FGL, sind Materialien, die ein einzigartiges Verhalten zeigen. FGL können sich nach einer Verformung an ihre zuvor eingeprägte Ursprungsform erinnern. Die Ausgangsform wird dabei vorab durch einen Glühprozess eingeprägt. Der bekannteste Werkstoff ist hierbei eine Nickel-Titan-Legierung mit einem Nickelanteil zwischen 49,5 – 51,0 at%. Eine diffusionslose Phasenumwandlung von der Tieftemperaturphase (Martensit) in die Hochtemperaturphase (Austenit) bildet die Grundlage für das Verhalten von Formgedächtnislegierungen. Während dieser, in Analogie zur Stahlhärtung bezeichneten, martensitischen Transformation ändert sich weder die chemische Zusammensetzung der Legierung noch die Nahordnung der Atome. Die Phasentransformation ist reversibel und zeitunabhängig, da lediglich eine Verzerrung des Atomgitters und keine Umordnung der Atome erfolgt [1]. Die Transformation von Martensit in Austenit ist dabei eine Funktion der am Material anliegenden mechanischen Spannung und der Temperatur. Bild 1 zeigt schematisch die Charakteristik der Phasentransformation.

Durch die Umwandlung von Austenit (a) in Martensit, entsteht im spannungsfreien Zustand ein verzwillingtes Martensitgefüge (b). Legt man daraufhin eine äußere Kraft an, so erfolgt eine Verschiebung der sogenannten Zwillingsgrenzen, was eine äußerlich wahrnehmbare Verformung zur Folge hat (c). Dieser als Entzwilligung bezeichnete Vorgang setzt hochbewegliche Grenzflächen des Martensitgefüges voraus, die charakteristisch für Formgedächtnislegierungen sind. Da in Polykristallen die Martensitgruppen mit unterschiedlichen räumlichen Ausrichtungen vorliegen, kann die Verformung des Martensits in jede beliebige Raumrichtung erfolgen. Zudem können auch verschiedene Verformungsmechanismen, wie Biegung, Torsion oder Zug/Druck, zur Entzwilligung genutzt werden [2].

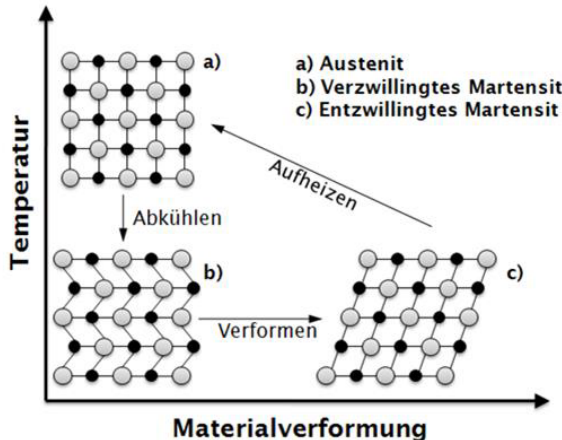


Bild 1. Schematische Darstellung der Phasentransformation von Formgedächtnislegierungen [3]

Durch Aufheizen wird das Atomgitter wieder in das austenitische Gefüge überführt. Da das Austenitgitter keine Verformungen zulässt, stellt sich das entzwilligte Martensitgitter während der Umwandlung wieder zurück, was äußerlich als Rückverformung bzw. Formgedächtnis wahrgenommen wird. Die Phasentransformation findet dabei nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern innerhalb eines Temperaturintervalls statt.

## 2.1 Formgedächtnislegierungen als Feinwerkantriebe – Nutzung des thermischen FG-Effektes

In Bezug auf FGL kann man zwischen zwei Effekten unterscheiden, dem thermischen und dem mechanischen (pseudoelastischen) Formgedächtniseffekt. Beide Effekte zeigen eine deutliche Änderung des elektrischen Widerstandes im Einsatz, weswegen Formgedächtniselemente über eine integrierte Sensorik verfügen. Diese kann u.a. zur Zustandsüberwachung, Positionsregelung oder Parametereinstellung genutzt werden. Der thermische Effekt findet in der Aktorik Anwendung und ist dadurch gekennzeichnet, dass beispielsweise ein FG-Element im kalten Zustand durch eine Last

verformt wird. Die verwendeten Formen von FG-Elementen im Bereich der Aktorik reichen von einfachen Zugdrähten, über Zug- und Druckfedern bis hin zu komplexen Strukturen. Die Verformung dieser Elemente bleibt solange erhalten, bis das FG-Element über eine bestimmte Schalltemperatur erwärmt wird und wieder seine Ausgangsform annimmt. Ab dieser Austenit-Start Temperatur ( $A_s$ ) beginnt das Material mit einer annähernd zur Temperatur proportionalen Umwandlung von der kalten und relativ weichen Phase (Martensit) in die Warmphase (Austenit). Die Umwandlung ist nach Erreichen der Austenit-Finish Temperatur ( $A_F$ ) abgeschlossen. Die Umwandlung ist zudem hysteresebehaftet. Die entsprechenden Martensit-Start und -Finish Temperaturen ( $M_s$ ,  $M_F$ ) liegen deshalb tiefer als die authentischen Temperaturen. Die Phasenumwandlung ist außerdem reversibel, wenn makroskopische Grenzdehnungen nicht überschritten werden. Derartige Dehnungen sind legierungsabhängig und liegen bei NiTi bei ca. 8%. Während der Martensit-Austenit-Umwandlung kann das FG-Element eine relativ hohe mechanische Arbeit leisten.

Ein Formgedächtnisdraht von 2 mm Durchmesser und 1 m Länge ist beispielsweise in der Lage ein Gewicht von über 100 kg um 5 cm anzuheben [3]. Der Draht wiegt dabei lediglich 30 g. Ein vergleichbarer Hubmagnet würde ca. 4 kg wiegen, um diese Leistung zu erbringen. Formgedächtnislegierungen besitzen in diesem Zusammenhang die höchste Energiedichte aller bekannten Aktorprinzipien.

Limitiert ist die Dynamik des zyklisch einsetzbaren thermischen Effektes durch die Abkühlgeschwindigkeit des FG-Elementes. Diese ist abhängig von der Differenz zwischen der FG-Elementtemperatur und der Umgebungstemperatur, sowie von der Art der Wärmeübertragung. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der maximalen Martensit-Finish Temperatur von  $+80^\circ\text{C}$ . Daher beschränkt sich der Einsatzbereich der FG-Aktoren heutzutage auf diese Temperatur für zyklisch arbeitende elektrische Applikationen.

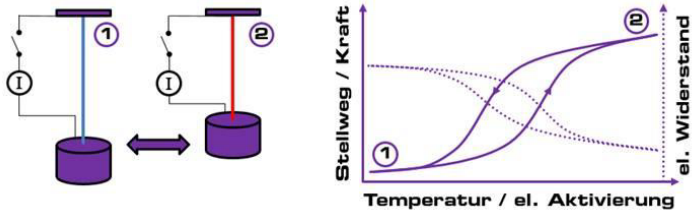


Bild 2. Umwandlungscharakteristik von FGL mit intrinsischem Sensoreffekt, links im Bild: FG-Draht unter Last, rechts im Bild: die dazugehörigen Kennlinien

Wie in Bild 2 gezeigt, beginnt die Stellwegauslösung hysteresebehaftet, sodass die sogenannte Austenit-Start-Temperatur ( $A_S$ ) deutlich höher liegt und bis zu  $120^\circ\text{C}$  betragen kann. Damit liegt der Einsatzbereich von FG-Aktoren für Einweg-Auslösungen (z.B. Sicherheitsentriegelungen) erheblich höher.

Zur Realisierung von extern steuer- oder regelbaren Aktorsystemen wird die Erwärmung der FG-Elemente meistens direkt auf der Grundlage der Joule'schen Wärme durch elektrischen Strom realisiert. Alternativ können auch indirekte Heizsysteme verwendet werden. Bei autark arbeitenden Systemen erfolgt sie durch das Umgebungsmedium. Durch die Änderung der Temperatur des FG-Elementes infolge einer Wärmezufuhr ändert sich dazu linear dessen Gefügezustand. Mehr noch, während der Umwandlung ändert sich auch der elektrische Widerstand so deutlich, dass man diesen Effekt als Sensorgröße für geregelte Systeme verwenden kann.

Bei einem konstanten Stromimpuls ist die Änderung der Widerstandscharakteristik als Spannungsabfall erkennbar. Damit können FG-Aktoren über den Zeitverlauf dynamisch geregelt werden. Die Höhe des Stromimpulses beeinflusst dabei die Aktivierungsdynamik, während die Deaktivierung maßgeblich von der Umgebungstemperatur, dem Umgebungsmedium und dem Aktorvolumen beeinflusst wird. In Bild 3 sind zur Illustration zwei unterschiedliche Versuche zusammengefasst. Bei einem hohen, aber kurzem Stromimpuls, erreicht der FG-Aktordraht seine maximale

Kontraktion deutlich schneller, als bei einem Versuch mit einem geringeren Auslösestrom. Für den zweiten, langsameren Versuch, ist zudem die Widerstandskurve aufgeführt. Diese kann zur Detektion der aktuellen Stellposition eines FG-Aktors verwendet werden. Wird der FG-Aktor bestromt, so kommt es nach einer temperaturbedingten Erhöhung des elektrischen Widerstandes zu einem dominanten Absinken des Widerstandes, was durch die Phasenumwandlung verursacht wird. Nach Erreichen der maximalen Kontraktion, also nach Abschluss der Phasenumwandlung, indiziert ein erneuter Anstieg des Widerstandes (ein Widerstands-Peak) ein rein austenitisches Gefüge. Während der Rückumwandlung ist ebenfalls eine annähernd lineare Widerstandskennlinie erkennbar, die eine Positionsdetektion während der Rückstellung ermöglicht. Die Widerstandsänderung kann bis zu 30% des Initialwertes betragen.

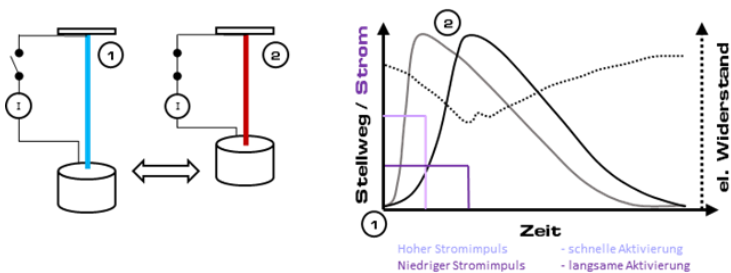


Bild 3. Charakteristische Dynamik von Formgedächtnisaktoren

---

Der Einsatz von Formgedächtnisaktoren kann, wie bereits erwähnt, auch durch direkte thermische Aktivierung über das umgebende Medium erfolgen. Bild 4 (links) zeigt dazu das Aufbauprinzip eines thermischen Formgedächtnisventils. Im unteren Ventiltteil ist eine Formgedächtnis-Druckfeder eingebaut, die einen Ventilstößel gegen eine konventionelle Stahldruckfeder bewegt, sobald das unten anliegende Medium erwärmt wird. Rechts in Bild 4 sind die dazugehörigen thermischen Kennlinien dargestellt. Auch diese Aktoren können elektrisch aktiviert werden. Dies kann z.B. als redundante Funktion genutzt werden. Eine besondere Umwandlungsstufe wird weiterhin in sogenannten R-Phasen Formgedächtnislegierungen genutzt.