

2 Grundlagen der Formgedächtnistechnik

2.1 Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen

Formgedächtnislegierungen (FGL) werden den so genannten „intelligenten“ Materialien zugeordnet, da sie neben der Aktorfunktion auch eine Sensorfunktion erfüllen können und somit die Realisierung einfacher und kompakter Bauelemente mit multifunktionalen Eigenschaften ermöglichen. Der Formgedächtniseffekt resultiert aus einer kristallographisch reversiblen Martensit-Austenit-Phasenumwandlung. Unter den derzeit bekannten Aktorprinzipien zeigt der Formgedächtniseffekt die höchsten Energiedichten, die bei NiTi-Legierungen in der Größenordnung von 10 J/cm^3 liegen [2-1]. Der Begriff Formgedächtnis steht für die ungewöhnliche Eigenschaft der Gestalterinnerung, die in bestimmten Legierungen thermisch oder mechanisch ausgelöst werden kann. Nach einer starken Deformation sind Legierungen mit Formgedächtnis in der Lage, sich in eine zuvor eingeprägte Gestalt zurück zu verformen. Die Basis für den Formgedächtniseffekt ist die martensitische Umwandlung, die unabhängig von der Abkühlgeschwindigkeit und damit unabhängig von Zeit und Diffusionsprozessen abläuft. Bei der martensitischen Umwandlung wandelt die Hochtemperaturphase Austenit (β -Phase) bei tiefer Temperatur in Martensit (α -Phase) um. Die Reversibilität dieser besonderen Austenit-Martensit-Umwandlung ist die wichtigste Voraussetzung für das Auftreten von Formgedächtniseffekten. Grundlage dafür bildet die Vererbung der kristallinen Ordnung, bei dem aus der β -Phase durch Scherung entstandenen martensitischen Zustand. Das heißt, Nachbarschaftsverhältnisse im Atomverbund werden nicht verändert. Diese Umwandlung wird deshalb auch als thermoelastische Umwandlung bezeichnet. Wird nun der Formgedächtniskristall im martensitischen Zustand unterhalb einer Grenzdehnung mechanisch verformt, bleiben nächste Nachbarn weiterhin im Atomverbund nächste Nachbarn. Erfolgt beim thermischen Effekt durch Erwärmung die Rückumwandlung von Martensit in Austenit, so bildet sich die Verformung aufgrund der Symmetrie des Austenitgitters, die nur eine Möglichkeit zur Anordnung der Atome zulässt, wieder zurück [2-2; 2-3]. Bild 2.1 zeigt den Vorgang der Umwandlung und die entsprechenden Umwandlungstemperaturen.

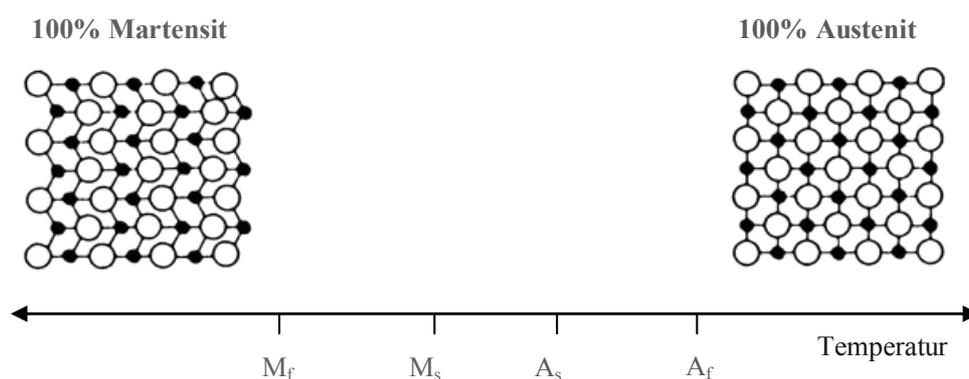


Bild 2.1: Umwandlung anhand des Temperaturstrahls

- A_s (Austenit-Start-Temperatur): Umwandlung Martensit \rightarrow Austenit beginnt
- A_f (Austenit-Finish-Temperatur): Umwandlung Martensit \rightarrow Austenit endet
- M_s (Martensit-Start-Temperatur): Umwandlung Austenit \rightarrow Martensit beginnt
- M_f (Martensit-Finish-Temperatur): Umwandlung Austenit \rightarrow Martensit endet

Eine Besonderheit, die mit dem Martensitverformung einhergeht, sind die großen scheinbar plastischen Formänderungen, welche auf einer so genannten Entzwilligung verschiedener Martensitvarianten beruhen. Hierbei kann die martensitische Probe, ohne die besagte Änderung von Nachbarschaftsverhältnissen im Atomverbund, bis zu 8 % pseudoplastisch verformt werden. „Pseudoplastisch“ bedeutet in diesem Fall, dass die plastische Verformung der Formgedächtnislegierung im Gegensatz zu herkömmlichen plastischen Materialverformungen durch das Erhöhen der Temperatur und der damit verbundenen kristallinen Phasenumwandlung reversibel wird. Jedoch ist nicht nur die Größe der Verformbarkeit, sondern auch das damit einhergehende Spannungsplateau besonders interessant. Das heißt während der Verformung nimmt die mechanische Spannung kaum zu. Die Bewegung der Zwillingsgrenzen setzt also nur einen sehr geringen mechanischen Widerstand entgegen. Kristallfehler, wie Versetzungen, können jedoch dieses Verhalten beeinträchtigen und zu größeren Plateausteigungen führen.

Die zweite Besonderheit bei FGL ist das ungewöhnliche Verformungsverhalten des Austenits zwischen der Austenit-Finish-Temperatur A_f und der kritischen Temperatur M_d . In diesem Temperaturbereich ist der mechanische Effekt bzw. die so genannte Pseudoelastizität (auch bekannt als Superelastizität) zu beobachten. Hierbei erfolgt eine Umwandlung von Austenit zu Martensit nicht durch thermische sondern durch mechanische Triebkräfte, beispielsweise durch das Beaufschlagen mit einer äußeren Last und der daraus resultierenden inneren mechanischen Spannung. Die äußere Last sorgt aber nicht nur für die Umwandlung, sondern auch für eine Verformung des Martensits. Wird die mechanische Spannung wieder zurückgenommen, erfolgt eine Rückumwandlung des Martensits in Austenit und damit genauso wie beim thermischen Effekt eine Rückverformung. Dieser Effekt bewirkt im Vergleich zu Stählen eine sehr stark erhöhte quasi elastische (pseudoelastische) Verformbarkeit. Oberhalb der kritischen Temperatur M_d verhält sich der Austenit wieder konventionell und es wird kein Martensit mehr induziert [2-2; 2-4]. Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Formgedächtnislegierungen ist in Abhängigkeit von der Temperatur zusammenfassend in Bild 2.2 dargestellt.

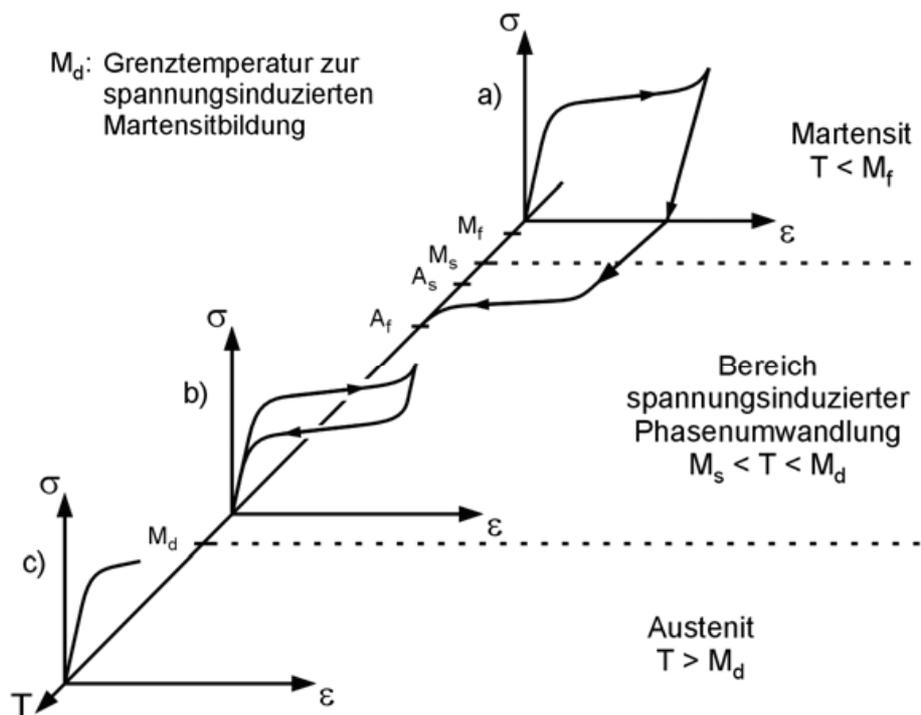


Bild 2.2: Temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungsverhalten von FGL [2-4]

2.2 Formgedächtniseffekte

Eine Übersicht der nutzbaren FG-Effekte mit beispielhaften Anwendungen ist in Bild 2.3 dargestellt. Eine detailliertere Erläuterung der einzelnen Effekte erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

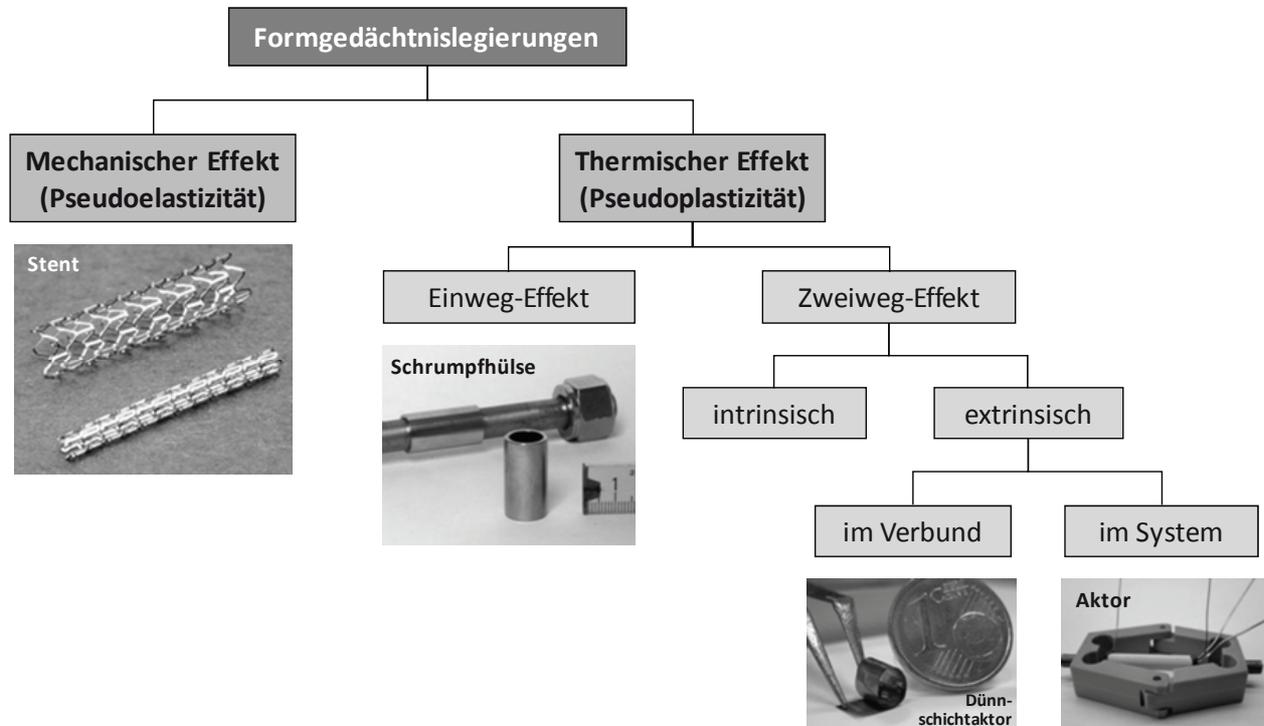


Bild 2.3: Schematische Unterteilung der FG-Effekte und Zuordnung von Anwendungen

2.2.1 Einwegeffekt (EWE)

Der Einwegeffekt beruht auf der pseudoplastischen Verformung im martensitischen Zustand und der im Vergleich zum Austenit geringen Festigkeit des Martensits. Durch das Anlegen einer mechanischen Spannung lässt sich das Kristallgitter im martensitischen Zustand leicht umorientieren und entzwilligen. Dies geschieht dabei in Richtung der äußeren oder inneren Spannung und aufgrund der hochbeweglichen Zwillingsgrenzflächen im Metallgitter. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm stellt sich dieser Bereich durch ein Plateau dar (Martensitplateau). Die Formänderung beim Martensit ist bleibend. Wird die Temperatur jedoch über A_s und weiter bis A_f erhöht, so stellen sich während der Umwandlung die ursprüngliche Kristallorientierung des Austenits und damit die ursprüngliche Form der Probe wieder ein. Kühlt das Material daraufhin im spannungsfreien Zustand wieder bis M_f ab, so erfolgt zwar eine kristalline Umwandlung von Austenit in Martensit, aber keine äußere Formänderung. Man spricht vom so genannten Einwegeffekt. Gekennzeichnet ist der Einwegeffekt somit durch die einmalige Formänderung einer zuvor im Martensit pseudo-plastisch verformten Probe beim Aufheizen. Sowohl während der Umwandlung als auch im austenitischen Zustand wirken beim Einwegeffekt keine äußeren Kräfte auf die Formgedächtnislegierung ein. Dieser Effekt eignet sich zur Anwendung in Verbindungselementen wie beispielsweise Schrumpfhülsen. Dargestellt ist der Mechanismus des Einwegeffektes in Bild 2.4 [2-2; 2-4].

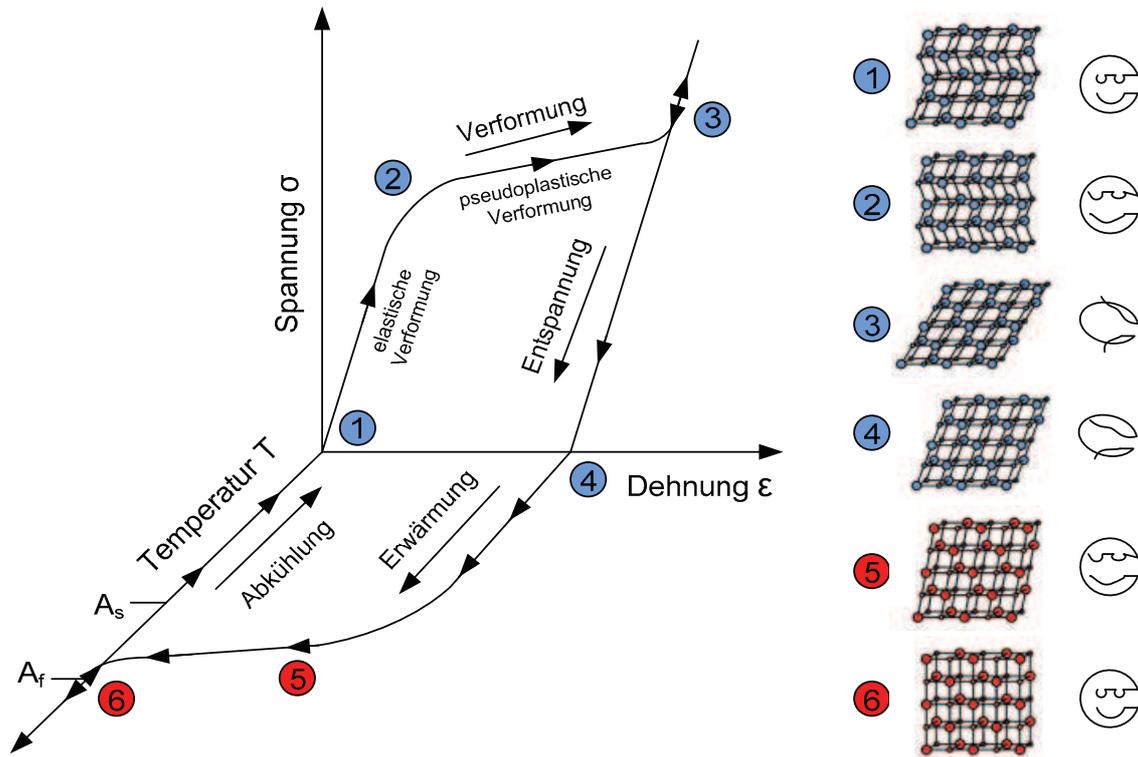


Bild 2.4: Verhalten beim Einwegeffekt

2.2.2 Zweiwegeffekt (ZWE)

Generell ist das Durchlaufen der martensitischen Umwandlung, also der Rückumwandlung, nicht mit einer äußeren Formänderung verknüpft. Erst aus der Auswahl bestimmter Kristallvarianten resultiert eine Formänderung des Martensits beim Abkühlen. Die Auswahl kann dabei durch innere Spannungsfelder (intrinsisch) oder durch Verformung mit Hilfe einer äußeren Kraft (extrinsisch) erfolgen. Die reversible Formänderung sowohl beim Aufheizen als auch beim nachfolgenden Abkühlen wird demnach als Zweiwegeffekt bezeichnet. Bei diesem Effekt „erinnern“ sich Formgedächtnisbauteile sowohl an ihre Hochtemperatur- als auch an ihre Niedertemperaturform. Der „intrinsische Zweiwegeffekt“ resultiert aus dem Einprägen bzw. Stabilisieren bevorzugter Martensitvarianten durch so genannte Trainingsprozesse, bei denen Versetzungsstrukturen generiert werden. Bei der Austenit-Martensit-Umwandlung kann jedoch keine nennenswerte mechanische Arbeit geleistet werden, weshalb dieser Effekt in technischen Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Beim so genannten „extrinsischen Zweiwegeffekt“ erhält man die reversible Formänderung im Prinzip dadurch, dass der Einwegeffekt durch eine äußere, verformende Kraft immer wieder von neuem auftritt (Bild 2.5). Diese von außen wirkende, verformende Kraft kann durch eine Last oder eine Gegenfeder aufgebracht werden und muss groß genug sein, um den Martensit im Plateaubereich zu verformen. Die Kraft darf jedoch nicht zu groß sein, um die Arbeitsleistung nicht unnötig zu verringern [2-2; 2-4]. Dieser extrinsische Effekt eignet sich beispielsweise zur Anwendung in Aktoren. Die Bauweise mit einer Gegenfeder aus Stahl stellt dabei ein weit verbreitetes Lösungsprinzip dar.

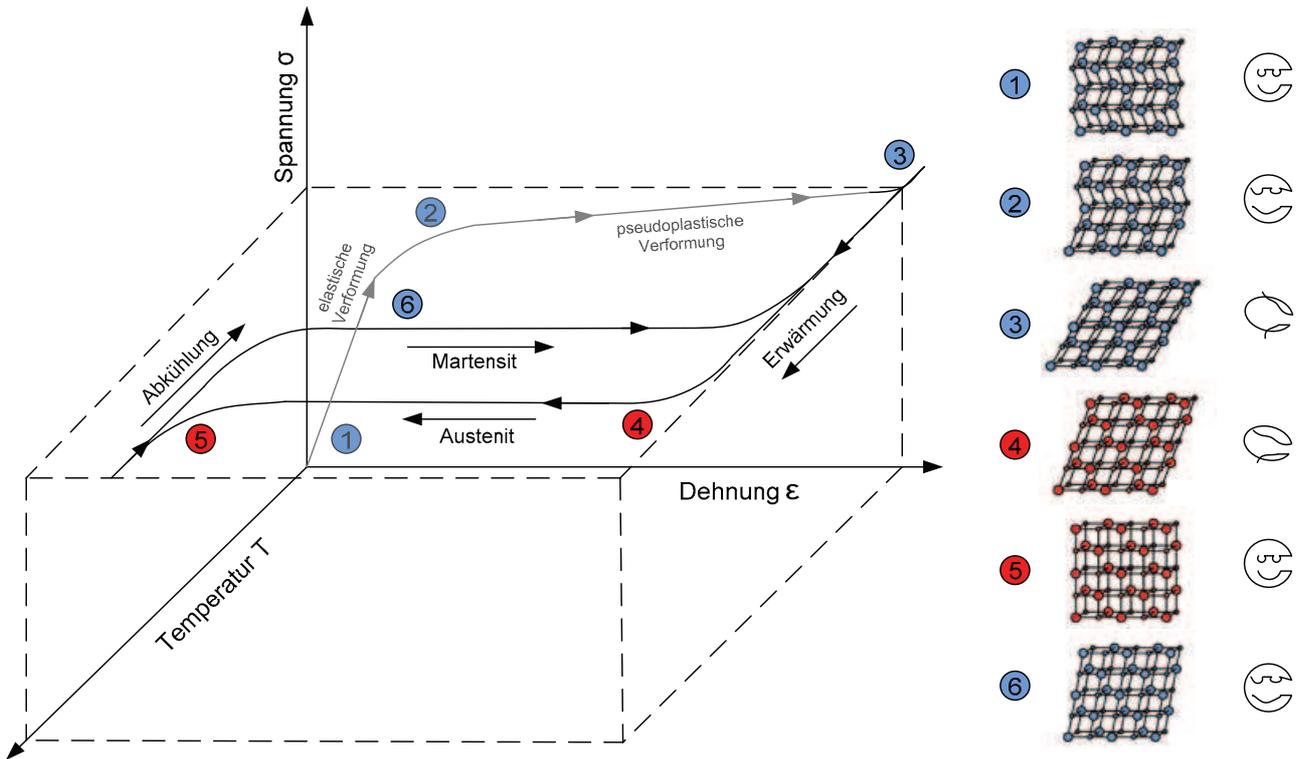


Bild 2.5: Verhalten beim Zweirichtungseffekt

2.2.3 Pseudoelastizität

Dieser Effekt beruht auf der Umwandlung von Austenit in Martensit durch mechanische Triebkräfte und der Bildung von so genannten spannungsinduzierten Martensit in einem Temperaturbereich zwischen A_f und M_d . Dargestellt ist der Mechanismus der Pseudoelastizität in Bild 2.6.

Durch bestimmte Legierungszusammensetzungen erreicht man auch, dass die austenitischen Umwandlungstemperaturen auf ein Intervall unterhalb der Raumtemperatur fallen, wodurch der Effekt der Pseudoelastizität nutzbar wird. Bei der Pseudoelastizität können bei nahezu gleichbleibender Spannung (pseudoelastische Plateauspannung) Dehnungen von maximal 8% erreicht werden. Dieser pseudoelastische Bereich ist dem Bereich der konventionellen elastischen Verformung nachgelagert. Wird nach erfolgter Verformung, d. h. nach der Entzwilligung des spannungsinduzierten Martensits, die martensitbildende Kraft wieder weggenommen, so vollzieht sich eine Rückumwandlung von Martensit in Austenit und damit eine Rückverformung. Charakteristisch ist hierbei wiederum ein Spannungsplateau (Austenitplateau). Diese Eigenschaft erlaubt somit die Herstellung von Federelementen, die näherungsweise eine vom Weg unabhängige konstante Kraft ausüben. Die Pseudoelastizität eignet sich für Produkte, die ein hohes elastisches Verformungsvermögen besitzen sollten, wie Festkörpergelenke, Brillengestelle, Stents. Der Einsatz dieses Effektes erfolgt heute noch vorwiegend in medizintechnischen Anwendungen. Aufgrund der hysteresebefahenen Umwandlung ist auch eine sehr gute Eignung dieses Effektes für Dämpfungselemente vorhanden [2-2; 2-4].

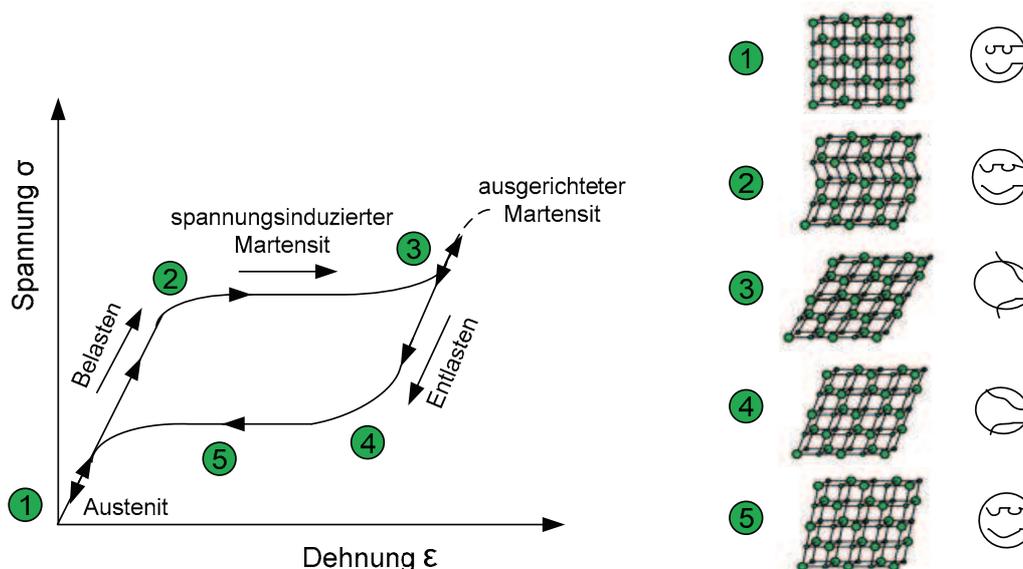


Bild 2.6: Verhalten beim pseudoelastischen Effekt

2.3 Legierungstypen

Alle Legierungssysteme mit einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung sind grundsätzlich für den Einsatz als Formgedächtnislegierung denkbar. Aufgrund nachteiliger mechanischer Eigenschaften sind jedoch viele dieser Legierungen von geringer technischer Bedeutung. Vergleichsweise am besten für Formgedächtnisanwendungen sind Legierungen auf NiTi-, Cu- oder Fe-Basis geeignet. Wie der Vergleich von verschiedenen Legierungen in Tabelle 2.1 zeigt, nimmt die Größe der nutzbaren Formgedächtniseffekte in der Reihenfolge NiTi-Basis, Cu-Basis, Fe-Basis ab [2-5]. Von den genannten FGL lassen sich wiederum auch nur einige für Haltelemente mit Einwegeffekt oder Stellelemente mit Zweiwegeffekt technisch nutzen. Die meisten erfüllen die nachfolgend aufgeführten notwendigen Anforderungen nicht.

Generelle Anforderungen:

- hohe pseudoplastische Dehnung
- geringer Verformungswiderstand des Martensitgefüges
- hohe Festigkeit des Austenitgefüges
- gute Bearbeitbarkeit des Werkstoffes.

Anforderungen für Stellelemente:

- gute Langzeitstabilität des Formgedächtniseffektes
- hoher Umsetzungsgrad der elektrischen Energie in mechanische Arbeit
- hohe Umwandlungstemperaturen.

Um den Forderungen in Bezug auf eine Verwendung als Stellelement so gut wie möglich gerecht zu werden, empfiehlt sich bei den heute kommerziell verfügbaren Werkstoffen nur die Verwendung von NiTi-Legierungen. Diese besitzen nicht nur den größten Formgedächtniseffekt, sondern weisen auch eine hohe Langzeitstabilität und damit Lebensdauer auf [2-2]. Nur mit NiTi-Legierungen lassen sich Arbeitszyklen bis zu einer Million und mehr realisieren. Um

solche hohen Zyklen zu erreichen, ist jedoch eine detaillierte Auslegung der Formgedächtnisbauteile unumgänglich.

Tabelle 2.1: Technisch nutzbare Formgedächtnislegierungen [2-5]

Eigenschaften	NiTi	CuZnAl	CuAlNi	FeNiCoTi	FeMnSi
Umwandlungs-temp. [°C]	-50...100	-100...100	80...200	-150...300	50...250
max. Einweg-effekt [%]	8	5	5	1,5	2,0
max. Zweiweg-effekt [%]	6	1	1	0,5	0,3
max. Pseudo-elasticität [%]	8	2	2	1,5	1,5
Nachteil	schlechte Zer-spanbarkeit, hohe Kosten	Entmischung, Grobkorn-bildung	schlechte Kalt-umformbarkeit	Stabilität und Effekt gering	Stabilität und Effekt gering
Vorteil	max. Effekte, höchste Stabilität, korrosions-beständig	niedrige Kosten, gute Umform-barkeit	niedrige Kosten	niedrige Kosten, gute Umform-barkeit	niedrige Kosten, gute Umform-barkeit

2.3.1 Einfluss des Nickelgehaltes bei einer binären NiTi-Legierung

Die Phasenumwandlungstemperatur (PUT) wird extrem vom Verhältnis der Legierungszusammensetzung bestimmt. Eine Änderung um 0,1 % des Verhältnisses Nickel zu Titan bewirkt im entsprechenden Zusammensetzungsintervall bereits eine Verschiebung der A_s -Temperatur um fast 10 °C (siehe Bild 2.7).

Der graue Bereich steht hierbei für binäre, pseudoelastische Nickel-Titan-Legierungen. Da die meisten technischen Anwendungen die Ansteuerung der PUT mit einer maximalen Abweichung von ± 5 °C fordern, bedeutet das, dass die Legierungszusammensetzung auf $\pm 0,05$ % genau eingestellt werden muss [2-6]. Dies stellt hohe technische Anforderungen an den Schmelzprozess bzw. die dafür verwendeten Anlagen. Teilweise muss das Material mehrfach umgeschmolzen werden, um eine homogene Zusammensetzung im Gussblock gewährleisten zu können.

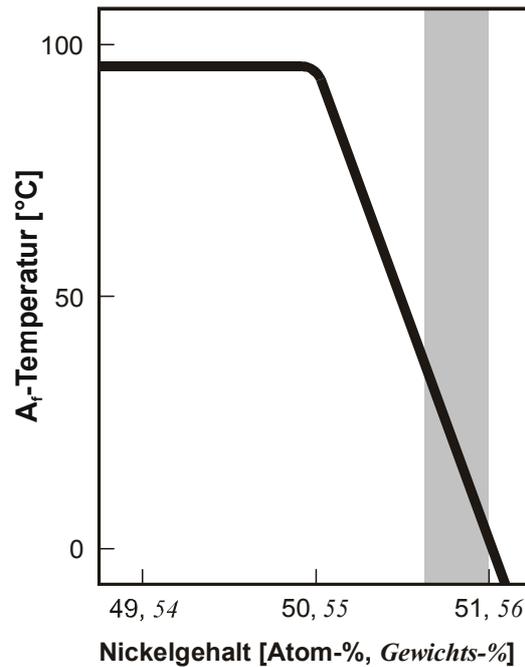


Bild 2.7: Einfluss des Nickelgehaltes auf die A_f -Temperatur [6-40]

2.3.2 Einfluss ternärer Elemente bei einer NiTi-Legierung

Mit der Beimischung anderer Elemente zu NiTi-Legierungen lassen sich einerseits FG-Effekt-ausprägungen, wie die Phasenumwandlungstemperatur (PUT) oder die Hysterese, andererseits mechanische Eigenschaften, wie Festigkeit und Sprödigkeit, beeinflussen. Für ternäre Legierungen, d. h. NiTi-Legierungen mit Beimischung eines anderen Elementes, eignet sich vor allem Kupfer. NiTiCu-Legierungen besitzen ein sehr ausgeglichenes Eigenschaftsprofil mit ausgeprägtem FG-Effekt, eine geringe Hysterese und eine unter Aspekten der Steuerung und Regelung interessante Widerstandskennlinie. Der Effekt ist zudem über eine hohe Zyklenzahl stabil. Ab Cu-Gehalten oberhalb von 10 At.-% tritt jedoch eine merkliche Zähigkeitsabnahme ein. Allerdings sind die Umwandlungstemperaturen nicht sehr hoch, so dass ein Einsatz z. B. in der Automobiltechnik bislang nicht erreicht werden konnte. Dennoch konnte sich NiTiCu mit Cu-Gehalten zwischen 5 und 10 At.-% aufgrund ihres akzeptablen Preises und ihres homogenen Eigenschaftsprofils für Anwendungen als Aktorlegierung bei geringen Umgebungstemperaturen etablieren [2-7; 2-8]. Tabelle 2.2 zeigt qualitativ den Einfluss weiterer Legierungselemente auf NiTi-Legierungen.

Tabelle 2.2: Einfluss von Legierungselementen auf NiTi-Legierungen

Merkmal	C	O	N	H	Cu	Cr	Co	Fe	V	Nb
PUT	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	→
Festigkeit	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑
Sprödigkeit	↓	↓	↓	↓	→	↓	↓	↑	↓	→

2.4 Fertigung von Formgedächtnisbauteilen

In diesem Kapitel wird die Fertigung von FG-Bauteilen aus Halbzeugen, wie Blechen, Stäben, Targets oder Pulver erläutert. Die generelle Herstellung von FG-Rohmaterial durch Erschmelzung wird im Rahmen dieses Buches nicht näher vorgestellt. Die Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen und Bauteilen haben jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften eines Bauteiles und bedürfen deshalb einer detaillierteren Betrachtung. In der Tabelle 2.3 werden mögliche Verfahren zur Herstellung von FG-Bauteilen aus Rohmaterial oder Halbzeugen aufgeführt und grob bewertet.

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der Herstellungsverfahren von FG-Bauteilen

	Beschichtung	Umformung/ Strukturierung	Urformung
Prinzip	Aufbringen einer fest haftenden Schicht	Formänderung durch Verformung oder Trennen	Verschmelzung von Pulverpartikeln
Verfahren	PVD (CVD, Galvanik Aufdampfen)	Drahtziehen/ Federwickeln Scheren/Stanzen Lasertrennen EDM, Ätzen u.a.	Sintern selektives Lasersintern selektives Laserschmelzen
Vor-/Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> + sichere Funktionsweise + Legierungszusammensetz. zusätzlich einstellbar + keine Rückstellvorrichtung notwendig (bei Verbundsystemen) + mechanische Eigenschaften einstellbar - aufwändiges Verfahren, evtl. Masken notwendig - zur Zeit nur für Mikroaktoriik anwendbar - Strukturgestalt durch Sputterverfahren begrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> + Stand der Technik + sichere Funktionsweise + Mikro-/Makroaktoriik geeignet + einfache und günstige Halbzeugherstellung + diverse Halbzeughersteller am Markt vorhanden - mech. Eigenschaften nur über Wärmebehandlung einstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> + Legierungszusammensetz. zusätzlich einstellbar + endkonturnahe Herstellung + Mikro-/Makroaktoriik geeignet + große Gestaltungsfreiheit + mechanische Eigenschaften einstellbar - aufwändiges Verfahren - Einfluss der Porosität auf die mech. Eigenschaften - anfällig für Verunreinigungen

2.4.1 Verfahren zur Beschichtung

Ein Verfahren zur Herstellung von FG-Elementen, besonders in der Mikro- und Nanotechnik, ist das Beschichten eines Substrates mit einem Formgedächtnismaterial. Der thermische oder mechanische Effekt lässt sich bei derartigen Dünnschichtverbund-Bauteilen durch eine Kristallisation der amorph abgeschiedenen FG-Schicht erreichen. Das zentrale Verfahren, das zur Herstellung von FG-Schichten verwendet wird, ist das Sputterverfahren (auch Kathodenzerstäubung genannt). Das Sputterverfahren zählt zur Gruppe der PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition). Beim Sputterverfahren wird zwischen den zu beschichtenden Substraten und der Sputterkathode aus der zu zerstäubenden Legierung ein Plasma gezündet. Die für das Plasma

verantwortliche elektrische Spannung beschleunigt die Ionen in Richtung der Sputterkathode (Target aus einer FGL) und schlägt dort Atome heraus, die sich auf dem gegenüberliegenden Substrat abscheiden. Zur Herstellung der Formgedächtnisschichten eignet sich besonders das Verfahren des so genannten Magnetronsputters. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie dem Ionenstrahlsputtern oder dem ECR-Sputtern, sorgt hier das Magnetfeld eines Permanentmagneten hinter der Kathode für eine Vergrößerung der Laufbahnen der beschleunigten Elektronen im Plasma. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Stöße und damit wiederum die Anzahl ionisierter Atome im Arbeitsgas. Aufgrund der hohen Innendichte ist die erzielte Abscheiderate im Vergleich zu den anderen Kathodenzerstäubungsverfahren deutlich höher und damit die Herstellungszeit kürzer [2-7].

Weitere Möglichkeiten der Beschichtungstechnik sind neben der Galvanik und den CVD-Verfahren (Chemical Vapor Deposition) die gängigen Verfahren nach DIN 8580. Diese Verfahren sind jedoch nicht oder nur mit sehr großem Aufwand zu realisieren und spielen deshalb nur eine untergeordnete Rolle, weshalb sie hier nicht weiter beschrieben werden.

2.4.2 Verfahren zur Umformung

Die Umformung stellt das derzeit wichtigste Fertigungsverfahren von FG-Bauteilen dar. Insbesondere aus gegossenen Blöcken oder Stäben werden Bleche gewalzt oder Drähte gezogen. Die Drähte werden häufig noch zu Federn gewickelt. Es ist jedoch bekannt, dass FGL eine schlechte Umformbarkeit besitzen. Maximale Umformgrade sind stark von den Prozessen und den Prozesstemperaturen abhängig und erfordern deshalb ein tiefgehendes Wissen. Weiterhin besitzen FG-Werkstoffe verschiedene Phasen, die unterschiedliche Verarbeitungseigenschaften besitzen. Die Sensibilität der Materialeigenschaften auf äußere Einflüsse ist dabei der Grund für die Komplexität von Umformprozessen. Zum Beispiel beeinflussen Faktoren, wie Kräfte, Verformungen und Temperaturen signifikant die funktionalen Eigenschaften von FG-Elementen. Die Sensibilität der FGL hat dabei den Nachteil, dass die Prozessparameter der Fertigung sehr genau eingestellt werden müssen. Als Vorteil ist jedoch zu verzeichnen, dass gerade durch diese Sensibilität die Eigenschaften des Bauteiles genau auf seine Anwendung angepasst werden kann. Sind die für die Eigenschaftsabsicherung und -anpassung kritischen Materialparameter identifiziert und dessen Auswirkungen bei Veränderung der Prozessparameter bekannt, können FG-Halbzeuge mit kundenindividuell angepassten Eigenschaften hergestellt werden.

Drahtziehen

Die häufigsten Anwendungen aus FG-Material werden mit FG-Drähten realisiert. Der Grund hierfür liegt in der Verfügbarkeit und den geringen Kosten von FG-Drahtmaterial im Gegensatz zu anderen Halbzeugformen. Die Qualität der Drähte hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, die Vielfalt an Drahtgeometrien und die Verfügbarkeit ergeben sich aus dem Drahtzugprozess. Da dieser Prozess im Laufe der Zeit sehr weit perfektioniert wurde, sind heutzutage sehr hochwertige Drähte mit speziellen Eigenschaften am Markt erhältlich. Zu nennen sind hierbei Drähte mit einer hohen Effektstabilität, welche sich insbesondere zur Anwendung in Aktoren eignen.

Federnwickeln

Da die Schraubenfeder aufgrund der Blockeigenschaften und der einfachen Systemanbindung eine sehr interessante Bauform darstellt, ist auch das Federnwickeln ein häufig vorzufindender Herstellungsprozess. Da das Federnwickeln als Formeinprägungsprozess betrachtet werden muss, ist hierfür jedoch ein Wärmebehandlungsprozess notwendig, bei dem die FG-Feder fi-