

# Dynamisches Verhalten einer superelastischen NiTi-Legierung

I. Schmidt, R. Lammering

*Das dynamische Verhalten einer superelastischen, binären NiTi-Legierung ist Gegenstand dieser Arbeit. Zunächst werden die Ergebnisse von Zugversuchen bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten (bis 4 Hz) präsentiert und mit dem quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm verglichen. Experimente an einer vorgespannten Saite mit Einzelmasse dienen der Aufklärung des Dämpfungsverhaltens bei höheren Frequenzen (ca. 17,5 Hz) und erlauben den direkten Vergleich mit einem Federstahl.*

## 1 Einleitung

Metallische Formgedächtnislegierungen (FGL) kombinieren unter bestimmten Bedingungen Festigkeitseigenschaften, die vergleichbar sind mit denen herkömmlicher Stähle, mit einer hohen Dämpfungskapazität. Eine besonders hohe Dämpfung wird bei Ausnutzung des superelastischen Effektes erreicht. Superelastizität entsteht bei mechanischer Belastung einer austenitisch (in der Hochtemperaturphase) vorliegenden FGL. Überschreitet die Spannung einen kritischen Wert  $\sigma_{AM}$ , so wandelt das Gefüge sich um in spannungsinduzierten Martensit (Bild 1).

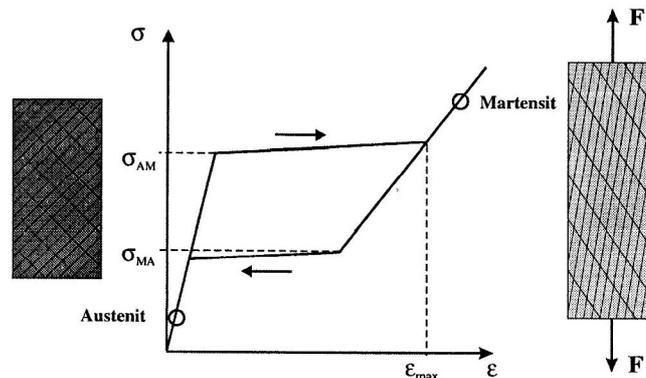


Bild 1: Modellvorstellung zur superelastischen Umwandlung

Im Unterschied zum thermisch erzeugten Martensit bilden sich unter Last nur Varianten aus, die günstig zur Belastungsrichtung orientiert sind. Diese Umwandlung ist mit Dehnungen von bis zu 8% verbunden. Nach der Entlastung auf Spannungen unterhalb  $\sigma_{MA}$  kehrt das Gefüge zurück in die Austenitform. Damit stellen sich auch die Dehnungen zurück. Der gesamte Vorgang ist mit dem Durchlaufen einer erheblichen mechanischen Hysterese verbunden. Die Fläche dieser Hysterese ist ein Maß für die durch Reibungsvorgänge im Material in Wärme umgesetzte Energie. Diese wird bei dynamischer Belastung dem Schwingungsvorgang entzogen, die Schwingung wird also gedämpft.

Die mechanischen Eigenschaften von Austenit und Martensit können sich erheblich unterscheiden. Bei NiTi beträgt der E-Modul des Martensits nur 30-50% des E-Moduls von Austenit. Darüberhinaus ändern sich die Eigenschaften sehr stark mit der Temperatur, der Belastungsgeschwindigkeit und auch mit der Anzahl bereits durchlaufener Lastzyklen. Letzteres führt z.B. zu einer Abnahme der Umwandlungsspannungen und zu einer plastischen Restdehnung (Bild 2; Schmidt und Lammering, 1999).

Zur Berechnung von FGL existieren eine Reihe von Arbeiten (siehe z.B. Birman, 1997; Brinson und Lammering, 1993; Brinson und Huang, 1996), die zumindest einige der Eigenschaften pseudoelastischer Legierungen berücksichtigen. Die Entwicklung solcher Stoffgesetze geht meist von thermodynamischen Gesichtspunkten aus, kann aber dennoch phänomenologische Betrachtungen enthalten. Thermodynamisch basierte Modelle existieren z.B. von Müller (1995), Boyd und Lagoudas (1996) sowie Raniecki und Lexcellent (1998). Darüberhinaus gibt es einzelne alternative Ansätze, wie den von Gandhi und Wolons (1999), die durch Einpassen einer Ellipse in die Hysteresekurve viskoelastische Stoffgesetze zur Beschreibung von FGL nutzen.

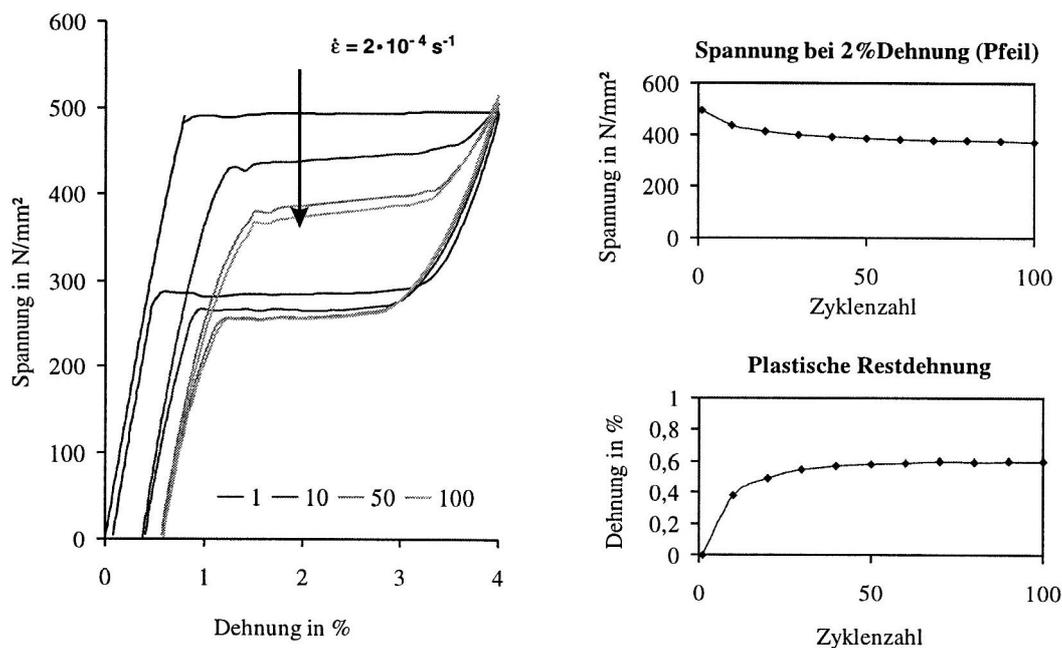


Bild 2: Zyklische Zugversuche mit abnehmender Umwandlungsspannung und plastischer Restdehnung

Auf experimentellem Gebiet beschäftigten sich in der Vergangenheit nur wenige Arbeiten mit dem dynamischen Verhalten superelastischer FGL, so z.B. Lin u.a. (1993) und Thomson u.a. (1995). Erst in den letzten Jahren erfolgten einige Untersuchungen zur erdbebensicheren Lagerung von Häusern mit Hilfe vorgespannter NiTi-Drähte. Diese beschränken sich im allgemeinen auf Frequenzen unterhalb von 5 Hz. Eine Übersicht zu diesen Arbeiten findet sich bei Noori u.a. (1999). Das Übertragungsverhalten von NiTi wurde von Li und Feng (1997) am Beispiel eines Zug-Druck-Stabes für Resonanzfrequenzen bis 1100 Hz und für einen Biegebalken mit einer Resonanzfrequenz von etwa 25 Hz beschrieben. In dieser Arbeit wird deutlich, daß es für FGL wie NiTi auch Einsatzmöglichkeiten in Akustik und Schwingungsisolierung geben kann.

Das dynamische Verhalten von superelastischen FGL ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Sie beginnt in Kapitel 2 mit einer Beschreibung von Zugversuchen bei verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten und behandelt in Abschnitt 3 Überlegungen und Experimente zum Dämpfungsverhalten von NiTi. Das vorgestellte Experiment, eine schwingende Saite mit Einzelmasse, wird zu Vergleichszwecken mit NiTi und Federstahl durchgeführt.

## 2 Zugversuche

In quasistatischen Zugversuchen wird üblicherweise mit konstanter Geschwindigkeit ein Maximalwert der Kraft oder der Dehnung angefahren (siehe z.B. Bild 2). Im Gegensatz dazu wurde in den hier vorgestellten Versuchen die Verschiebung über die Zeit sinusförmig aufgeprägt. Dazu wurde eine Prüfmaschine verwendet, deren untere Einspannung über einen Hydraulikzylinder verfahren werden kann. Zur Verbesserung der Anschaulichkeit wird bei der Auswertung dieser Versuche die Frequenz der Weganregung angegeben.

Der Beginn der Umwandlungsphase, während der in quasistatischen Versuchen die Spannung bei zunehmender Dehnung lange Zeit konstant bleibt, ist bei höheren Geschwindigkeiten nicht mehr eindeutig erkennbar. Zum Vergleich der Ergebnisse ist in Bild 3 (links) eine im quasistatischen Versuch gemessene Hysteresekurve hinterlegt. Die Umwandlung beginnt für höhere Dehnungsgeschwindigkeiten bereits bei wesentlich geringeren Spannungen, und die Spannung steigt während der Umwandlung kontinuierlich an. Die Rücktransformation zeigt ein äquivalentes Verhalten. Mit zunehmender Frequenz (Belastungsgeschwindigkeit) wird die Hysteresefläche kleiner und damit auch die dissipierte Energie pro

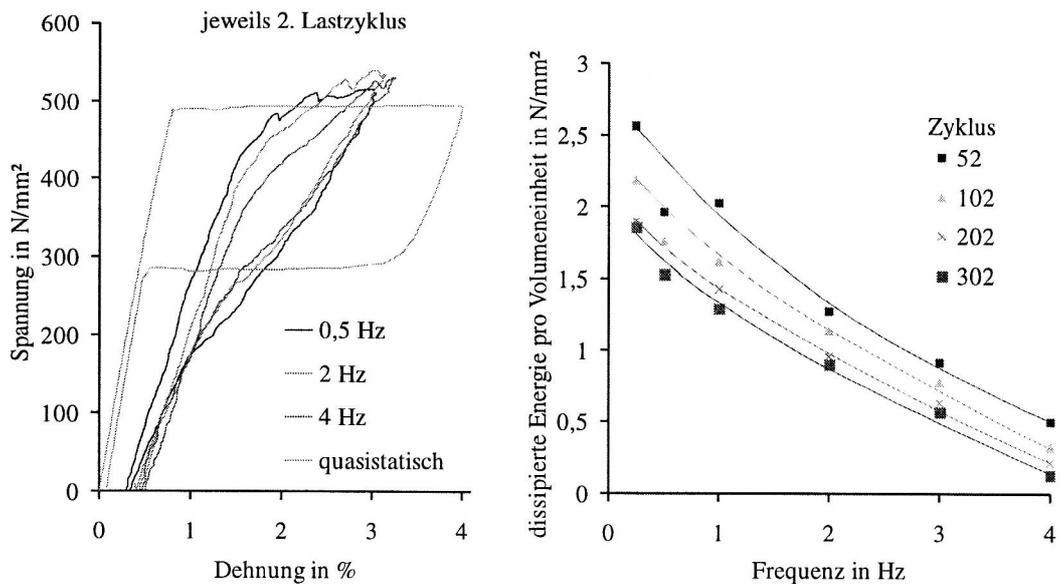


Bild 3: Zugversuche bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten

Zyklus (Bild 3 rechts). In diesem Versuch waren mit der vorhandenen Meßtechnik oberhalb von 4 Hz keine aussagekräftigen Ergebnisse zu erzielen.

Um auch für höhere Frequenzen eine Aussage bezüglich des Dämpfungsverhaltens von NiTi machen zu können, wird daher der im folgenden Kapitel vorgestellte Versuchsaufbau gewählt.

### 3 Vorgespannte Saite mit Einzelmasse

#### 3.1 Versuchsaufbau

Der in Bild 4 dargestellte Versuchsaufbau dient zum einen der Aufklärung des Dämpfungsverhaltens von NiTi bei höheren Frequenzen, zum anderen dem Vergleich einer NiTi-Saite mit einer Stahlsaite.

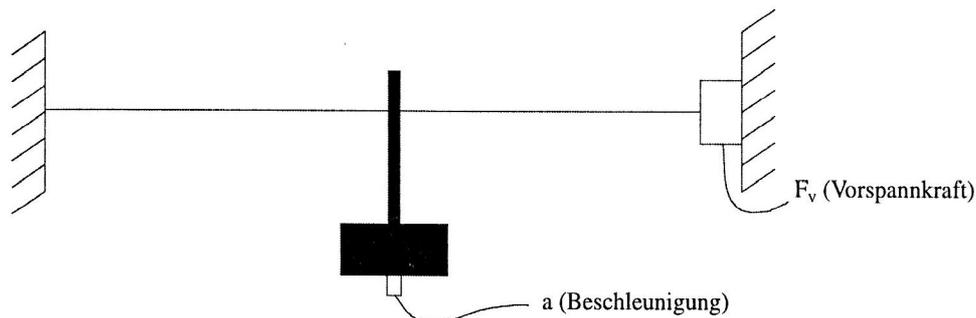


Bild 4: Prinzipskizze der Ausschwingversuche

Bei dem eingesetzten NiTi-Material handelt es sich um einen Draht aus einer binären NiTi-Legierung mit einem Durchmesser von 0,75 mm und einer  $A_S$ -Temperatur (Beginn der Austenitbildung im spannungsfreien Zustand) von 5°C (Herstellerangabe). Die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur (22°C). Weitere Angaben zum Versuch liefert Tabelle 1.

Meßbare Größen	Stahl $\varnothing$ 0,7 mm	NiTi $\varnothing$ 0,75 mm
Abstand zwischen den Einspannungen	$l = 0,4$ m	$l = 0,4$ m
Querschnitt des Drahtes	$A = 0,385$ mm <sup>2</sup>	$A = 0,44$ mm <sup>2</sup>
E-Modul	$E = 2,06 \cdot 10^5$ N/mm <sup>2</sup>	$E = 1,52 \cdot 10^4$ N/mm <sup>2</sup>
angebrachte Masse	$m = 122$ g	$m = 122$ g
Vorspannkraft (ohne Masse)	$50 \text{ N} \leq F \leq 200 \text{ N}$	$50 \text{ N} \leq F \leq 225 \text{ N}$

Tabelle 1: Daten zum Ausschwingversuch

Die zunächst dargelegten theoretischen Überlegungen weisen nach, daß bei höheren Vorspannungen die Eigenfrequenzen nahezu unabhängig vom Elastizitätsmodul sind. Somit läßt sich nach Anregung mittels eines Impulshammers und bei harmonischer Anregung für beide Materialien die Dämpfung bestimmen und vergleichen.

### 3.2 Theoretische Überlegungen

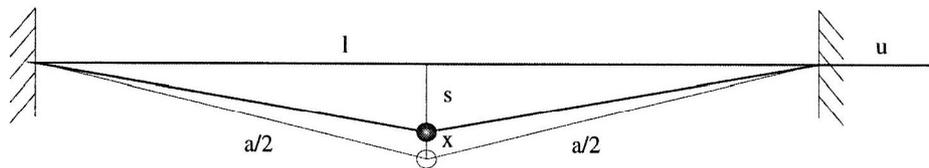


Bild 5: Modell des Ausschwingversuchs

Zur übersichtlichen Berechnung der Eigenfrequenzen wird der Versuchsaufbau in ein physikalisches Modell (Bild 5) überführt. Für die Abschätzung der Frequenzen wird lineares Werkstoffverhalten angenommen und nur die geometrische Nichtlinearität des Systems berücksichtigt. In der Umgebung der statischen Ruhelage wird auch diese linearisiert.

Die zur Berechnung verwendeten Größen entsprechen den in Tabelle 1 angegebenen. Um den Einfluß des Elastizitätsmoduls in diesem Versuch deutlich zu machen, wird für NiTi der kleinste Modul, also der für Martensit, eingesetzt, so daß der Unterschied zu Stahl besonders groß wird. Zur Vereinfachung wird die auf die Länge bezogene Dehnsteifigkeit des Drahtes mit  $k$  benannt ( $k = EA/l$ ). Die Änderung der Dehnsteifigkeit mit wachsender Vorspannung wird vernachlässigt. Die Hilfsgröße  $u$  bezeichnet die Länge, die durch die Belastung aus dem betrachteten Bereich innerhalb der Einspannungen herausgezogen wird und ist damit ein Maß für die aufgebrachte Vorspannkraft ( $u = Fl/EA = F/k$ ).  $a$  ist die Gesamtlänge des Drahtes zwischen den Einspannungen zu einem bestimmten Zeitpunkt und ergibt sich nach dem Satz des Pythagoras zu:

$$a = \sqrt{l^2 + 4(s+x)^2} \quad (1)$$

Dabei ist  $s$  die durch das Anhängen der Masse entstehende statische Auslenkung und  $x$  die momentane Auslenkung durch den Schwingungsvorgang.

Für die weiteren Betrachtungen wird von einer Schwingung der Masse mit kleiner Amplitude um ihre Ruhelage ausgegangen. Es werden die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen 2. Art benutzt.

Die im System zu einem bestimmten Zeitpunkt gespeicherte potentielle Energie setzt sich zusammen aus einem Anteil, der sich aus der Dehnung des Drahtes ergibt, und der potentiellen Energie der Masse.

$$U = \frac{1}{2}k \left( u + \sqrt{l^2 + 4(s+x)^2} - l \right)^2 - mg(s+x) \quad (2)$$

Mit der kinetischen Energie ( $T = \frac{1}{2}m \dot{x}^2$ ) erhält man die Lagrangesche Funktion:

$$L = T - U = \frac{1}{2}m \dot{x}^2 - \frac{1}{2}k \left( u + \sqrt{l^2 + 4(s+x)^2} - l \right)^2 + mg(s+x) \quad (3)$$

Aus dieser läßt sich die Lagrangesche Bewegungsgleichung ( $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = 0$ ) aufstellen, was zu folgender nichtlinearen Differentialgleichung führt:

$$m\ddot{x} - mg + 4k(x+s) \frac{u + \sqrt{l^2 + 4(s+x)^2} - l}{\sqrt{l^2 + 4(s+x)^2}} = 0 \quad (4)$$

Mit  $\ddot{x} = 0$  und  $x = 0$  läßt sich die Durchsenkung unter statischer Last ( $s$ ) ermitteln.

Zur Berechnung der Eigenfrequenz wird die Bewegungsgleichung (4) in der Umgebung von  $s$ , das heißt an der Stelle  $x = 0$ , durch eine Taylorreihenentwicklung linearisiert.

$$\ddot{x} + \frac{4k(-l^3 + \sqrt{l^2 + 4s^2}l^2 + ul^2 + 4\sqrt{l^2 + 4s^2}s^2)}{m(\sqrt{l^2 + 4s^2})^3} x = 0 \quad (5)$$

Daraus ergibt sich für die Eigenfrequenz des linearisierten Systems:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k(-l^3 + \sqrt{l^2 + 4s^2}l^2 + ul^2 + 4\sqrt{l^2 + 4s^2}s^2)}{m(\sqrt{l^2 + 4s^2})^3}} \quad (6)$$

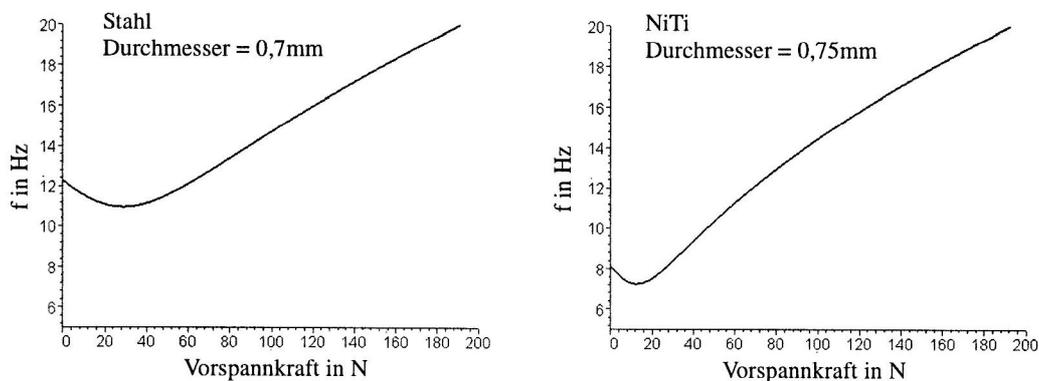


Bild 6: Berechnete Eigenfrequenz der gespannten Saite mit Masse in Abhängigkeit von der Vorspannkraft

Unter Berücksichtigung der oben angegebenen Maße des Versuchsaufbaus berechnen sich die Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Vorspannkraft wie in den Diagrammen in Bild 6 gezeigt. Während die Werte bei geringer Vorspannung sehr stark materialabhängig sind, überwiegen bei Vorspannungen oberhalb 100 N die Systemeigenschaften. Die unterschiedlichen E-Moduln von NiTi und Stahl haben in diesem Bereich nur sehr geringen Einfluß auf die Eigenfrequenz des Systems.

### 3.3 Anregung mittels Impulshammer

Die Untersuchung der Dämpfung von NiTi bei kleinen Amplituden erfolgte durch Ausschwingversuche. Mittels des Impulshammers wurde die Masse in vertikale Schwingungen versetzt. Während des Ausschwingens wurden die Kraft im Draht und die Beschleunigung der Masse gemessen. Vergleichsmessungen erfolgten mit einem Federstahl.

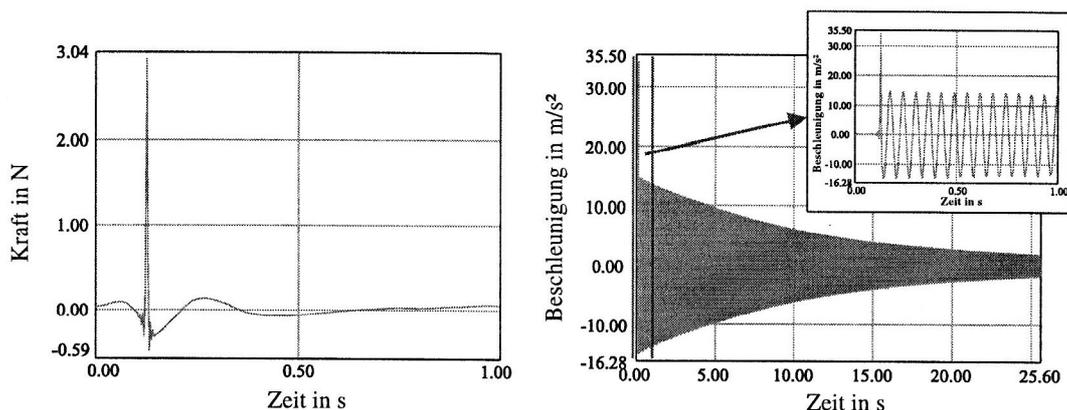


Bild 7: Hammer- und Beschleunigungssignal eines Ausschwingversuchs mit NiTi-Draht

Bei Vorspannkraften zwischen 50 und 225 N wurden einerseits Zeitverläufe des Ausschwingvorgangs (Bild 7) und andererseits die Übertragungsfunktionen der Beschleunigung bezogen auf das Signal des Impulshammers (Bild 8) aufgenommen. Dabei wurde mit einer Meßzeit von 25,6 s und einer Abtastfrequenz von 320 Hz gearbeitet.

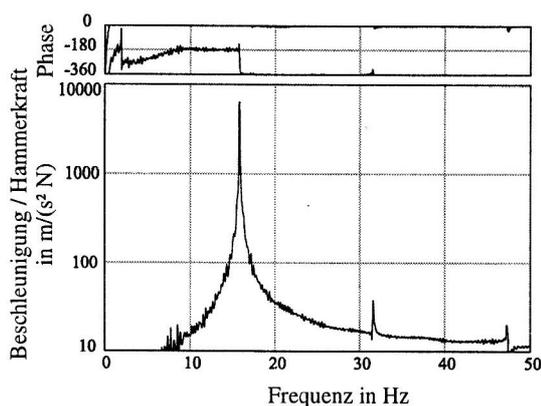


Bild 8: Übertragungsfunktion eines Ausschwingversuchs mit NiTi-Draht

Die aus den Zeitverläufen und den Übertragungsfunktionen experimentell bestimmten Eigenfrequenzen sind identisch. Sowohl den berechneten als auch den gemessenen Eigenfrequenzen (Tabelle 2) ist zu entnehmen, daß diese bei höherer Vorspannung des Drahtes nahezu unabhängig vom Elastizitätsmodul sind. Bei einer Zugkraft im Draht von z.B. 150 N hat eine Erhöhung des E-Moduls um 1255% lediglich eine Erhöhung der Frequenz um 0,57% zur Folge (berechnete Werte siehe Tabelle 2). Daraus ist abzuleiten, daß auch eine Verringerung der Steifigkeit von NiTi bei einer dynamischen Belastung unter Ausnutzung von Umwandlungsvorgängen nur eine geringe Verschiebung der Eigenfrequenzen bewirkt.

Das Rechenmodell gibt das durchgeführte Experiment nicht exakt wieder, die gemessenen Frequenzen liegen über den berechneten. Dabei handelt es sich um einen systematischen Fehler, der seine Ursache z.B. in der durchgeführten Linearisierung der Bewegungsgleichung, aber auch in den nicht exakt vom Modell erfaßten Randbedingungen haben kann.

Die in diesem Versuch erreichten Dehnungsamplituden liegen unterhalb von 0,1%. Die FGL wurde für die Messung im Umwandlungsbereich (143 N) so vorgedehnt, daß 20-30% der Drahtlänge zwischen den Einspannungen in Martensit umgewandelt waren.

Die Dämpfung läßt sich als logarithmisches Dekrement aus den Abklingkurven der Beschleunigung ermitteln. Darüberhinaus wurde aus der Übertragungsfunktion in Resonanznähe mit dem Circle-fit-Verfahren ebenfalls die Dämpfung berechnet. Alle Dämpfungsmaße wurden in das Lehrsche Dämpfungsmaß,

Vorspannkraft	Eigenfrequenz Stahl		Eigenfrequenz NiTi	
	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen
50 N	11,55 Hz	12,2 Hz	10,31 Hz	11,7 Hz
100 N	14,70 Hz	15,9 Hz	14,43 Hz	15,8 Hz
143 N	17,35 Hz		17,24 Hz	18,7 Hz
150 N	<b>17,76 Hz</b>	19,3 Hz	<b>17,66 Hz</b>	
200 N	20,43 Hz	22,1 Hz	20,38 Hz	
210 N	20,93 Hz		20,88 Hz	22,5 Hz
225 N	21,65 Hz		21,62 Hz	23,1 Hz

Tabelle 2: Eigenfrequenzen der gespannten Saite

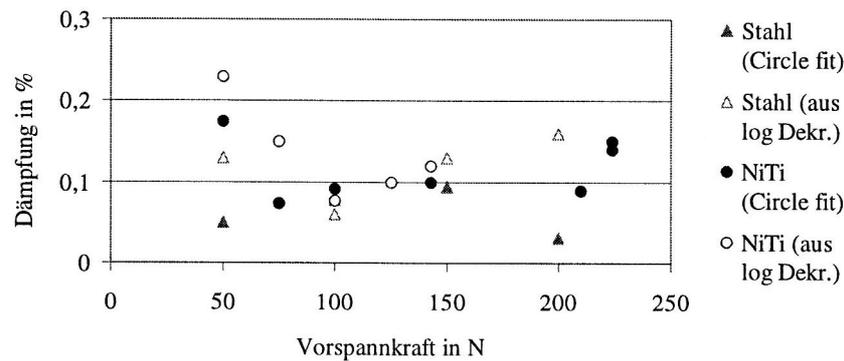


Bild 9: Dämpfung von NiTi und Federstahl, ermittelt aus Ausschwingversuchen

angegeben in Prozent, umgerechnet. Die Werte für die Dämpfung zeigen eine relativ große Streuung und bewegen sich sowohl bei NiTi als auch bei Stahl um 0,1% (Bild 9). Offensichtlich reicht die durch den Hammerschlag in die Saite eingebrachte Energie nicht aus, um eine Gefügeumwandlung zu bewerkstelligen. Daher zeigen Stahl- und NiTi-Saite nahezu gleiches Dämpfungsverhalten. Um mehr Energie in das System eintragen zu können und um eine Gefügeumwandlung zu erreichen, wird in weiteren Versuchen ein elektrodynamischer Schwingerreger eingesetzt und das System harmonisch erregt.

### 3.4 Harmonische Erregung mit elektrodynamischem Schwingerreger

Um Dehnungsamplituden verschiedener Größe vorgeben zu können, wurde der oben beschriebene Versuch etwas modifiziert. Die Erregung erfolgte nicht mehr mit dem Impulshammer, sondern mit einem Schwingerreger, der über dem Draht befestigt und durch einen Stößel mit dem Haltestab der Masse verbunden war. Somit wurde eine Variation der Amplitude einer sinusförmigen Anregung des Drahtes bei festgelegter Frequenz durch Einstellen der am Shaker anliegenden Spannung ermöglicht. Zwischen Stößel und Stab war ein Kraftaufnehmer zur Messung der Erregerkraft montiert.

Die Vorspannung im Draht wurde im Vergleich zum Versuch mit Impulsanregung nicht variiert. Am Stahldraht wurde bei einer Vorspannkraft von 150 N gemessen. Die Formgedächtnislegierung wurde bis in den Umwandlungsbereich vorgespannt. Praktisch wurde eine Vordehnung eingestellt, die zu einer gemessenen Kraft von 144 N (vorher 143 N) führte.

Der Schwingerreger wurde bei einer Frequenz von 12 Hz, also außerhalb des Resonanzbereiches, so eingestellt, daß die am Draht befestigte Masse eine Maximalauslenkung von 0,2 bis 0,8 mm erfuhr. Nach dem Einstellen der Vorspannung im Draht erfolgte eine harmonische Anregung der Masse mit einer Frequenzschrittweite von 0,2 Hz, um die Resonanzfrequenz zu lokalisieren. In der Umgebung der Resonanzfrequenz wurde dann die eigentliche Messung mit einer Schrittweite von 0,025 Hz durchgeführt. Die Resonanz wurde damit gut erfaßt, jedoch nicht bei allen Messungen gleichermaßen. Für jede Erregerfrequenz wurde aus dem Beschleunigungssignal und der Erregerkraft ein Übertragungsfaktor gebildet. In

den Bildern 10 und 11 sind die durch Verbinden der einzelnen Meßpunkte erhaltenen Übertragungsfunktionen dargestellt. Aus den so erhaltenen Übertragungsfunktionen wurden wiederum mittels des Circle-fit-Verfahrens die modalen Parameter bestimmt.

Im Ergebnis dieses Experiments zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Stahldraht und NiTi (Bilder 10 und 12). Während die Dämpfung von Stahl sich mit steigender Anregungsamplitude nur minimal ändert, zeigt die bis in den Umwandlungsbereich (144 N) vorgespannte FGL eine mit zunehmender Amplitude stark ansteigende Dämpfung. Dabei ist zu beachten, daß sich bei maximaler Verstärkerspannung eine Dehnungsamplitude von nur etwa 0,02% einstellt, während NiTi Dehnungen im Prozentbereich erreichen kann.

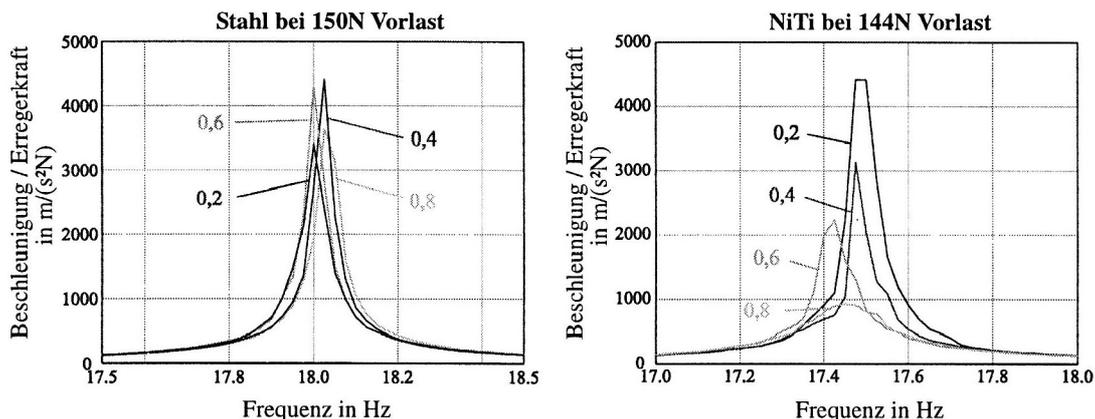


Bild 10: Übertragungsfunktionen von Stahldraht und bis in den Umwandlungsbereich vorgespanntem NiTi-Draht; Kurvenparameter ist die Amplitude der Auslenkung (in mm) bei 12 Hz

Wie bereits in den vorhergehenden Messungen befand sich bei einer Vorspannung von 144N etwa ein Viertel des Materials im martensitischen Zustand. Um die durch Umwandlungsvorgänge hervorgerufene Dämpfung von der umwandlungsfreien, einphasigen Dämpfung des Martensits zu separieren, wurde der NiTi-Draht bis in den vollständig martensitischen Bereich vorgespannt (Bilder 11, 12). Bei einer Zugkraft im Draht von 217 N zeigte das rein martensitische NiTi-Material eine Dämpfung, die noch unter der bei Stahl (Vorspannkraft 150 N) gemessenen lag. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Dämpfung von Stahl mit steigender Vorspannung sinkt, so daß beide Materialien annähernd gleiche Dämpfung aufweisen, solange keine mit der Gitterumwandlung zusammenhängenden Prozesse in der FGL ablaufen.

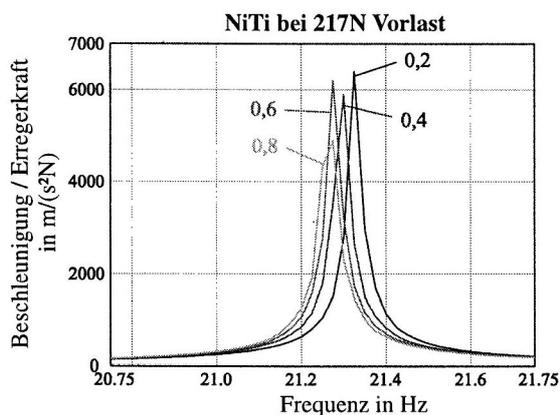


Bild 11: Übertragungsfunktionen des bis in den martensitischen Bereich vorgespannten NiTi-Drahtes bei verschiedenen Amplituden der Auslenkung

Die Eigenfrequenzen des Systems sind aufgrund der mit dem Schwingerreger zusätzlich angekoppelten Masse geringer als im Ausschwingversuch. Dabei wird die Eigenfrequenz bei dem bis in den Umwandlungs-

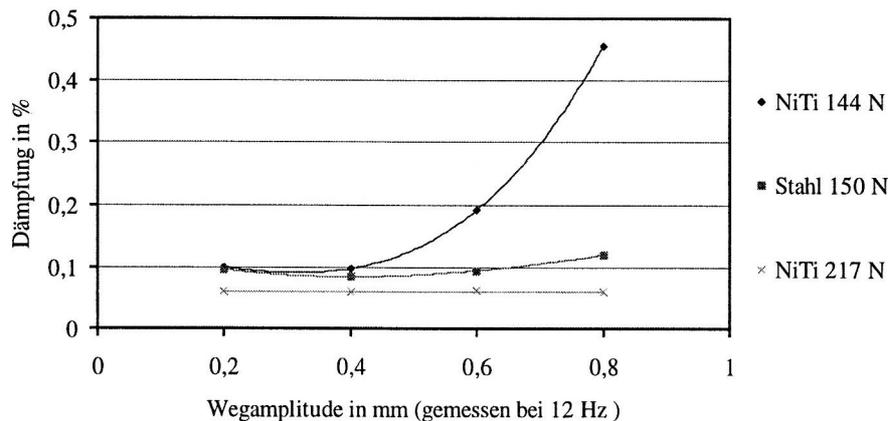


Bild 12: Dämpfung von NiTi und Federstahl, ermittelt aus zwangserregten Schwingungen

bereich vorgespannten NiTi-Draht mit wachsender Amplitude nur geringfügig kleiner. Die im Ergebnis der Ausschwingversuche mit Hammererregung gemachten Annahmen werden damit bestätigt. Insbesondere bleibt festzuhalten, daß auch bei höheren Frequenzen eine signifikante Dämpfung zu beobachten ist, wenn eine Gefügeumwandlung eintritt.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Eigenschaften metallischer FGL wie NiTi sind in großem Maße abhängig von Einflüssen wie Temperatur, Belastungsgeschichte und Belastungsgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bei der spannungsinduzierten Martensitbildung eines austenitischen NiTi Materials führt zu einer Verringerung der während eines Lastzyklus dissipierten Energie. Daraus kann abgeleitet werden, daß diese Materialien für dynamische Anwendungen nur bedingt geeignet sind. Dennoch führt die Phasenumwandlung auch bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten zu einer, im Vergleich zu konventionellen Metallen, hohen Dämpfung, wenn große Dehnungsamplituden erreicht werden. Das Potential der FGL für dynamische Anwendungen zu nutzen, ist gegenwärtig eine Herausforderung für die Forschung.

Für die Berechnung von FGL bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten ist weiterhin die Einbeziehung der beschriebenen experimentellen Erkenntnisse in Stoffgesetze eine Notwendigkeit. Keines der anfangs aufgeführten Stoffgesetze ist bislang in der Lage, sämtliche Eigenschaften von FGL zu berücksichtigen. Insbesondere die Abhängigkeit der Spannungen von der Deformationsgeschwindigkeit wird in den meisten Fällen ignoriert.

#### Literatur

1. Birman, V.: Review of mechanics of shape memory alloy structures, Appl. Mech. Rev., 50, (1997), 629-645.
2. Boyd, J.G.; Lagoudas, D.C.: Thermomechanical constitutive model for shape memory materials - Part I and II, Int. Journ. Plasticity, 12, (1996), 805-873.
3. Brinson, L.C.; Lammering, R.: Finite Element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications, Int. Journ. Solids Struct., 30, (1993), 3261-3280.
4. Brinson, L.C.; Huang, M.S.: Simplification and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models, Journ. of Intell. Mater. Syst. and Struct., 7, (1996), 108-114.
5. Gandhi, F.; Wolons, D.: Characterization of the pseudoelastic damping behavior of shape memory alloy wires using complex modulus, Smart Mater. Struct., 8, (1999), 49-56.

6. Holzweißig, F. u.a.: Arbeitsbuch Maschinendynamik/Schwingungslehre, Leipzig, (1983), 26-1 ff.
7. Li, D.Z.; Feng, Z.C.: Dynamic Properties of Pseudoelastic Shape Memory Alloys, SPIE, 3041, (1997), 715-725.
8. Lin, H.C.; Wu, S.K.; Yeh, M.T.: Damping Characteristics of TiNi Shape Memory Alloys, Metallurgical Transactions A, 24A, (1993), 2189-2194.
9. Müller, I.; Thermodynamics of Ideal Pseudoelasticity, Journal de Physique IV, 5, (1995), 423-431.
10. Noori, M.N.; Hou, Z.; Bar-on, I.; Davoodi, H.: Utilization of SMAs for Structural Vibration Control (SVC), <http://me.wpi.edu/~clpsi/...>, submitted to the Journal of Structural Engineering and Mechanics, (1999).
11. Raniecki, B.; Lexcellent, C.: Thermodynamics of isotropic pseudoelasticity in shape memory alloys, Europ. J. of Mech. A/Solids, 17, (1998), 185-205.
12. Schmidt, I.; Lammering, R.: Pseudoelastic NiTi-Alloys under Cyclic Loading, submitted to ZAMM, (1999).
13. Thomson, P.; Balas, G.J.; Leo, P.H.: The use of shape memory alloys for passive structural damping, Smart Mater. Struct., 4, (1995), 36-41.

---

*Anschrift* : Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering, Dipl.-Ing. Ina Schmidt; Institut für Mechanik, Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg