

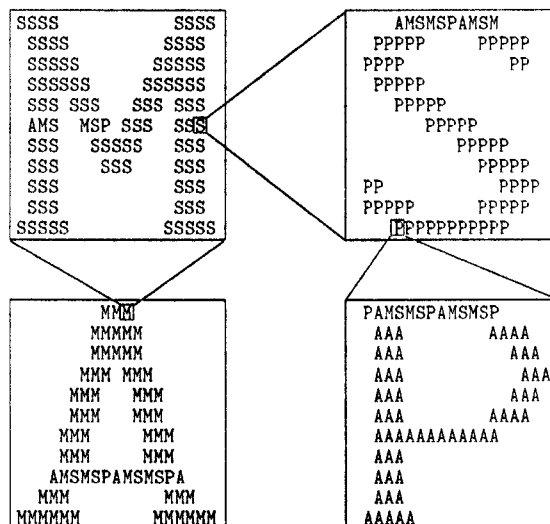
Analysis, Modeling and Simulation of Multiscale Problems

Adaptive Airfoil with Shape Memory Alloys

A. Musolff

Preprint 36

Konstruktion, Fachteil Werkstoffe, 53, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)



Adaptiver Tragflügel mit Formgedächtnisaktuatoren

Adaptive Airfoil with Shape Memory Alloys

André Musolff

Technische Universität Berlin • Fakultät III • FG Thermodynamik • Straße des 17. Juni 135 • 10623 Berlin

WWW: <http://www.thermodynamik.tu-berlin.de> • E-mail: musolff@thermodynamik.tu-berlin.de

Konstruktion, Fachteil Werkstoffe, 53, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)

Inhalt

Am Fachgebiet Thermodynamik der Technischen Universität Berlin wurde der Prototyp eines adaptiven Flügels entwickelt. Er besteht aus einer biegsamen Trägerplatte sowie einer aerodynamischen Verkleidung. Wichtige Bestandteile des adaptiven Flügels sind die in die Struktur integrierten Sensoren und Aktoren. In diesem Fall dienen Dehnungsmeßstreifen zur Messung der Form, und Aktorpakete aus Formgedächtnisdrähten fungieren als „metallene Muskeln“ zur Verstellung der Struktur. Durch entsprechende Regelalgorithmen läßt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Sollformen einstellen.

Abstract

The prototype of an adaptive wing has been developed at the Technical University Berlin by the Department of Thermodynamics. It consists of a flexible base plate as well as an aerodynamic encasement. Important constituents of an adaptive wing are sensors and actuators integrated into the structure. In this case, strain gauges measure the wing shape, and actuator packages consisting of shape memory alloy wires operate as 'metal muscles'. These muscles serve to adapt the wing shape to an aerodynamic optimum. A number of different desired wing shapes can be realized by suitable control algorithms.

1 Einleitung

Die Strömungsprofile von Flugzeugen sind im wesentlichen starre Flächen; zwar besitzen sie Ruder zur Kontrolle von Auftrieb, Widerstand und Moment, aber diese selbst sind wiederum starre Flächen. Dagegen hat die Natur mit dem Flügel des Vogels ein adaptives "Bauteil" entwickelt, mit dem der Vogel durch Veränderung der Profilform seine Flugbedingungen optimieren kann. Die zwischen der konventionellen Flugzeuglösung und dem feinfühligem Vogelflügel klaffende Lücke soll durch den Einsatz eines adaptiven Profils verringert werden.

Allein durch aerodynamische Maßnahmen erwartet man sich eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 36% in den nächsten zwanzig Jahren [1]. Bereits jetzt sind zahlreiche Aktivitäten auf diesem Gebiet zu verzeichnen, beispielsweise im Rahmen des Leitkonzepts Adaptiver Flügel (ADIF) [2]. Hier werden Teile des Flügels kommender Airbusgenerationen als adaptive Strukturen ausgelegt.

Formgedächtnis- oder auch Memorylegierungen haben von allen bekannten Aktoren das größte spezifische Leistungsvermögen.

Drähte aus solchem Material, z.B. NiTi, übertragen Spannungen von etwa 300 MPa bei reversiblen Dehnungen von ungefähr 3% und sind dabei bis zu 10^7 Lastspielen ermüdungsfrei einsetzbar. Benötigt man sie nur für wenige Lastspiele, liegen die übertragbaren Spannungen sogar bei bis zu 1000 MPa und die Rückstelldehnungen bei 8-10%. Ein Nachteil dieser Materialien ist die geringe erreichbare Taktfrequenz bei zyklischem Einsatz. Dieser Umstand ist dadurch bedingt, daß der Formgedächtniseffekt durch thermische Aktivierung ausgelöst wird. Die Aufheizung kann durch entsprechenden Energieeintrag nahezu beliebig rasch stattfinden, die relativ geringe Abkühlrate stellt jedoch den limitierenden Faktor dar. Memorylegierungen eignen sich daher besonders für quasistatische Aufgabenstellungen, bei denen es auf große Kräfte und Wege ankommt. Dabei sind insbesondere im Vergleich zu herkömmlichen Aktorsystemen wie z.B. Hydraulik, Pneumatik oder elektrischen Motoren das geringe Gewicht, der geringe Platzbedarf, die Einfachheit der Konstruktion und, nicht zuletzt, der geringe Preis beachtenswert.

2 Verhalten von Formgedächtnislegierungen



Vor der Verformung



Nach der Verformung



Nach der Erwärmung



Nach der Abkühlung

Bild 1: Demonstration des Gedächtniseffekts

Die wichtigsten Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen sind Erinnerungsvermögen und hohe Rückstellkraft. Werden diese Legierungen bei tiefen Temperaturen verformt, so kehren sie bei Erwärmung in ihre ursprüngliche Form zurück. Die alte Form, vorausgesetzt die Legierung wird nicht belastet, wird auch dann beibehalten, wenn die Temperatur wieder sinkt. (siehe Bild 1)

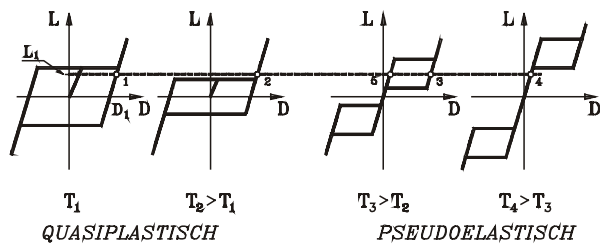


Bild 2: Last-Dehnungs-Verhalten bei verschiedenen Temperaturen

Der Formerrinnerungseffekt ist eine Folge des stark temperaturabhängigen Last-Dehnungs-Verhaltens dieser Metalle. Dieser Effekt ist in Bild 2 für verschiedene Temperaturen schematisch dargestellt. Man erkennt, daß der Last-Dehnungs-Temperaturversuch von Hysteresen begleitet ist.

Wenn für genügend viele Temperaturen (L,D)-Diagramme vorliegen, kann ein Dehnungs-Temperatur-Diagramm erstellt werden, wie in Bild 3 gezeigt.

Demnach zieht sich ein belasteter Formgedächtnisdraht beim Heizen zusammen, und beim Abkühlen dehnt er sich wieder aus. Auch diese Deformation ist hysteretisch.

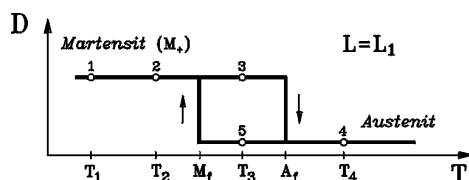


Bild 3: Dehnungs-Temperatur-Verhalten.

Die beschriebenen Phänomene beruhen auf einer Gitterumwandlung. Bei hoher Temperatur ist das Gitter in der hochsymmetrischen austenitischen Phase, bei niedriger Temperatur ist es martensitisch, und der Martensit neigt zur Zwillingbildung. Die Modellbilder in Bild 4 geben einen Eindruck von der Mikrostruktur der Gedächtnismetalle und von ihrer Formänderung bei Belastung.

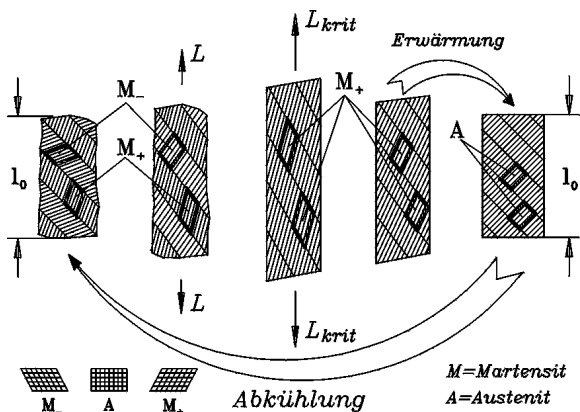


Bild 4 : Modellbild einer rückstellbaren Verformung

Man erkennt in diesen Bildern, wie die Last bei starker Verformung die martensitischen Zwillinge in die gleiche Richtung umklappen läßt und wie sich der Körper bei Erwärmung zusammenzieht, indem er die austenitische Phase bildet [3]. Basierend auf diesen Mikrome-

chanismen wurde in [4] ein Modell entwickelt, das die Simulation adaptiver Strukturen mit Formgedächtnisaktuatoren gestattet.

Formgedächtnislegierungen haben unter den leitfähigen Metallen einen hohen elektrischen Widerstand. D.h., legt man eine elektrische Spannung an und der Formgedächtnisdraht wird vom elektrischen Strom durchflossen, so erwärmt sich dieser aufgrund der freigesetzten Joule'schen Wärme [5].

Nutzt man diese Effekte aus und bringt auf einer Fläche Formgedächtnisdrähte als Aktuatoren an, so kann man diese durch elektrisches Heizen und die damit verbundene Kontraktion der Drähte verformen. Dabei übernimmt die Fläche die Funktion eines Trägers und erbringt die erforderlichen Kräfte für die Rückdehnung der Drähte bei tiefen Temperaturen.

Das in diesem Fall gewählte Modell ist der Querschnitt einer Flugzeugtragfläche (Bild 5), die entsprechend den Anströmungsbedingungen eine optimale Form annehmen soll. Die optimale Profilform bestimmt sich aus der Minimierung des Strömungswiderstands bei gegebenem Auftrieb.

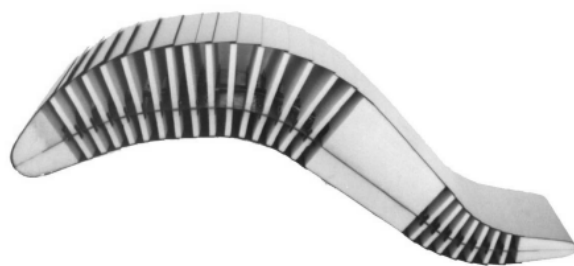


Bild 5: Foto eines adaptiven Tragflügels

3 Modellbeschreibung

Bild 5 stellt den adaptiven Tragflügel im geheizten Zustand dar. Die schematischen Darstellungen in Bild 6 zeigen den Querschnitt des Flügels im ungeheizten Zustand (Darstellung oben) und im geheizten Zustand (Darstellung unten).

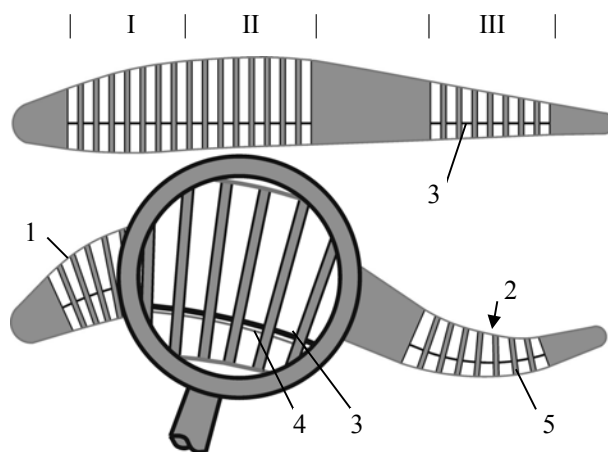


Bild 6 : Schematische Darstellung des adaptiven Tragflügels

Die Vergrößerung in Bild 7 macht die kontrahierten Formgedächtnisdrähte (4) sichtbar, die hier unterhalb der zu verformenden Platte (3) in sehr geringem Abstand zu dieser tangential in Ösen (8) beweglich geführt sind. Die zu verformende elastische Platte (3) ist mit einem aerodynamischen Mantel (2) in einer typischen Flugprofilform verkleidet. Um die Biegung nicht zu behindern, ist die Außenhaut (1) in Schuppenform auf Stegen (5) ausgelegt, wobei die einzelnen Schuppen übereinander gleiten können. Der Tragflügel ver-

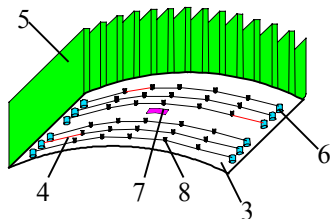


Bild 7: Zoom auf den unteren Teilabschnitt II

fügt über drei biegsame Teilstücke I, II und III (Bild 6), die eine konkave bzw. eine konvexe Deformation erzeugen können. So sind in den Teilabschnitten I und II die Drähte (4) unterhalb der Platte (5) parallel zueinander in Flugrichtung und im Teilabschnitt III die Drähte oberhalb der Platte (3) parallel zueinander in Flugrichtung angeordnet. Die Aktuatordrähte haben jeweils eine Länge von 100 mm und einen Durchmesser von 0,29 mm. Die Biegung wird über jeweils zwei Dehnungsmeßstreifen (7) je Teilabschnitt erfasst und über eine Wheatstonesche Meßbrücke an eine entsprechenden I/O-Karte übertragen.

4 Technische Realisierung

Der Regelalgorithmus, wird in einem Host-Computer erstellt, der mit der mathematischen Simulationssoftware Matlab5.2/Simulink2.2, der Übertragungssoftware RealLink32 und dem C-Compiler WatCom11.0 ausgestattet ist. Dieser lädt eine ausführbare Version des Algorithmus auf einen Target-Rechner, der mit den entsprechenden I/O-Karten ausgerüstet ist und die Regelung des Profils in Echtzeit übernimmt.(Bild 8).

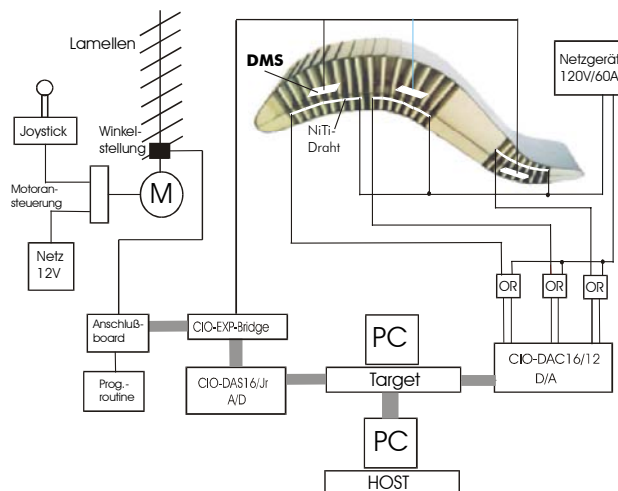


Bild 8: Blockschema zur Regelung des Modells

Dazu wird die vorherrschende Anströmungsrichtung gemessen und die dazugehörige optimale Profilform (Sollwert) berechnet. Die Anströmungsrichtung kann durch einen Joystick verändert werden. Dieser kann über eine Motoransteuerung die Stellung der Lamellen, welche sich vor dem Flügel in einem Windkanal befinden, in ihrem Winkel ändern. Der berechnete Sollwert wird mit dem momentanen Istwert verglichen. Der Istwert ergibt sich aus der vorliegenden Flügelform, die durch die Abfrage von Dehnungsmeßstreifen (HBM, 6/350LY11) ermittelt wird und über die A/D-Karte (CIO-DAS16/Jr mit CIO-EXP-Bridge) an den Target-Computer weitergeleitet wird. Die Abweichung zwischen Soll- und Istwert wird vom Target-Rechner ermittelt und durch eine Änderung der Heizleistung mittels D/A-Karte (CIO-DAC16/12) in den Formgedächtnislegierungen korrigiert.

Um eine beliebige Form zu realisieren, müssen die Formgedächtnisdrähte (Aktuatoren) nicht nur die beiden Extremzustände der minimalen austenitischen Dehnung und maximalen martensitischen Dehnung einstellen, sondern auch jeden dazwischenliegenden Dehnungszustand annehmen. Durch die Temperaturabhängigkeit der Dehnung werden die Aktuatoren über die Heizleistung geregelt. Die Heizleistung wird über eine Pulsmodulation geändert, d.h. der Strom wird mittels Halbleiterrelais (OR) ein- und ausgeschaltet. Je nach Länge des Pulses werden die Aktuatoren mehr oder weniger geheizt, so daß sich aus der Summe der einzelnen Heizimpulse eine entsprechende Mittelheizleistung (P_m) ergibt <1>.

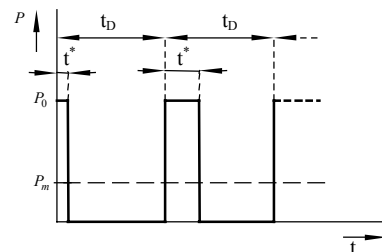


Bild 9: Pulsmodulation

Die Dauer <2> des Pulses (t^*) richtet sich nach der benötigten Heizleistung (P_m), der Amplitude der eingestellten Leistung (P_0) und dem festgelegtem Zeitintervall (t_D).

$$P_m = \frac{1}{t_D} \int_{t=0}^{t=t^*} P(t) dt = \frac{1}{t_D} P_0 \cdot t^* \quad < 1 >$$

$$t^* = \frac{P_m}{P_0} \cdot t_D \quad < 2 >$$

$$y_R(t) = P_m = k_P \cdot (D_{Soll} - D_{Ist}) + k_I \int_0^t [D_{Soll}(t') - D_{Ist}(t')] dt \quad < 3 >$$

Das Zeitintervall ($t_D=0,07s$) wurde so gewählt, daß es aufgrund der Pulsmodulation nicht zu Eigenschwingungen der Aktuatoren kommt. Die Heizleistung (Stellgröße; <3>) ergibt sich aus der Differenz zwischen Sollwert (geforderte Verformung des Tragflügels) und Istwert (momentane Verformung des Trag-

flügels und dem ermittelten proportional und integral Faktor (k_p, k_i).

5 Auswahl der Formgedächtnislegierung

Bevor ein Formgedächtnisdraht aus NiTi in einer adaptiven Struktur Verwendung findet, muß sein Verhalten im Vorfeld untersucht werden. Dazu stehen im Labor des FG Thermodynamik entsprechende Apparaturen zur Verfügung, um das Kraft-Temperatur-Verhalten, Kraft-Deformations-Verhalten und Deformations-Temperatur-Verhalten (Bild 10) zu untersuchen. Diese Ergebnisse geben Hinweise auf die Gitterumwandlungstemperaturen, die Hysteresenbreite, die Rückstellkräfte und den Elastizitätsmodul. In Bild 10 sind 3 Messungen für jeweils eine konstante Last (2N, 7N, 13 N) im Deformations-Temperatur-Diagramm des verwendeten Formgedächtnisdrahtes dargestellt. Es ist zu erkennen, daß mit wachsender Last die Hysterese zur höheren Temperatur und Deformation steigt. Wichtig ist, daß der Draht seine vollständige martensitische Umwandlung im lastfreien Zustand abgeschlossen hat.

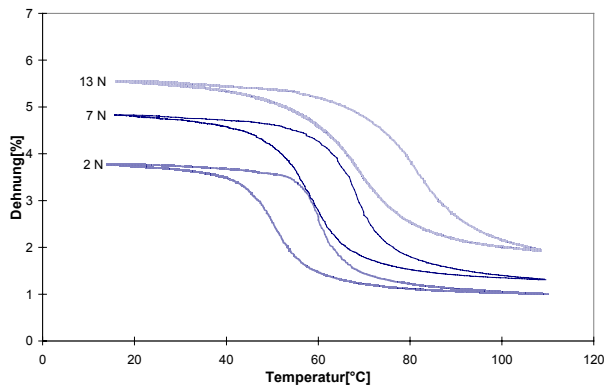


Bild 10: Deformations-Temperatur-Diagramm

Auch darf die Temperatur für die austenitische Umwandlung nicht zu hoch liegen, da in der Struktur Kunststoffe verwendet werden, welche bei hohen Temperaturen versagen würden. Für die elektrisch-thermische Ansteuerung zeigt dieser Draht gute Eigenschaften, da die Hysterese einen nicht zu steilen Anstieg, sowohl bei der Erwärmung als auch bei der Abkühlung, aufweist und somit eine eindeutige Temperatur-Deformations-Zuweisung zuläßt.

6 Resultate

Beim Einsatz von Formgedächtnisdrähten mit den in Tabelle 1 gegebenen Parametern und dem in Punkt 3 beschriebenen Modell sind folgende Ergebnisse ermittelt worden.

Tabelle 1

Drahtdurchmesser	0,29 mm
Drahtlänge	100 mm
Anzahl der Drähte je Abschnitt	6
Max. Längenänderung der Drähte	4,2%
M_f (2N)	35°C
M_f (13N)	45°C
A_f (2N)	75°C
A_f (13N)	110°C
Widerstand (ca.)	0,05 Ohm/mm

Die maximalen Biegewinkel lagen beim Heizen für jedem Teilabschnitt bei 45°. D.h. für die beiden vorderen Teilabschnitte ergibt sich ein Gesamtbiegewinkel von 90°. Jeder Draht muß eine Kraft von 13 N aufbringen, um die maximale Biegung zu realisieren.

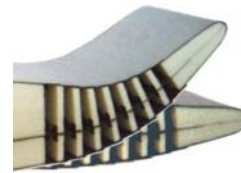


Bild 11: Hinterkante des Flügels (gerade & max. Krümmung)

Bild 11 zeigt den hinteren Teilabschnitt (III) des adaptiven Tragflügels, wobei die untere Position die Profilform im unverformten Zustand und die obere Position das Profil bei geheizten Formgedächtnisdrähten darstellt

Im geschlossenen Regelkreis wurde die Struktur für zwei verschiedene Sollvorgaben untersucht: sprungförmige (Bild 12 & 13) und rampenförmige (Bild 14) Sollvorgabe.

In den Bildern 12, 13 und 14 sind die Kurvenverläufe der einzelnen Teilabschnitte (I, II, III) für die Sollvorgabe (s) und des momentanen Istwert (i) dargestellt.

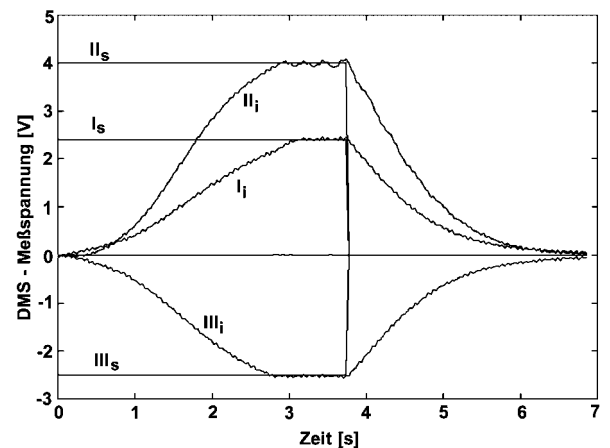


Bild 12: Sprungantwort des Tragflügels bei $P_0 = 1,2$ Watt

Bild 12 zeigt das Verhalten des Tragflügels bei sprunghöfziger Sollvorgabe. Die eingestellte Leistung (P_0) betrug 1,2W je Draht, d.h. je Puls wurde der Draht von einem Strom von 0,48A durchflossen bei einer Spannung von 2,5V. Die Zeitdauer bis zum Erreichen der eingestellten Sollvorgabe betrug 2,8 Sekunden.

Die Zeitdauer der Erwärmung der Drähte und somit das Erreichen der max. Biegung hängt von dem Betrag der hineingesteckten Joule'schen Wärme ab. Wird die Joule'schen Wärme erhöht, so wird eine schnellere Verformung der Struktur erzielt.

Dies ist im Vergleich mit Bild 13 zu sehen. In dieser Untersuchung betrug die eingestellte Leistung (3,1W je Draht, d.h. je Puls lag eine Spannung von 4V und floß ein Strom von 0,77A. Die Zeitdauer bis zum Erreichen der vorgegebenen Sollvorgabe betrug 1,4 Sekunden.

Durch die 2,5-fache Erhöhung der Leistung wird die vorgegebene Verformung in der Hälfte der Zeit erreicht. Die Erhöhung der Heizleistung hat ein leichtes Überschwingen zur Folge. Dies kann aber durch die Änderung der Werte für k_p und k_i minimiert werden. Auch eine Verkleinerung des Zeitintervalls bei der Abtastung der Dehnungsmeßstreifen würde zu einer Verbesserung des Einstellverhaltens führen, da somit besser auf sich schnell ändernde Istwerte reagiert werden kann.

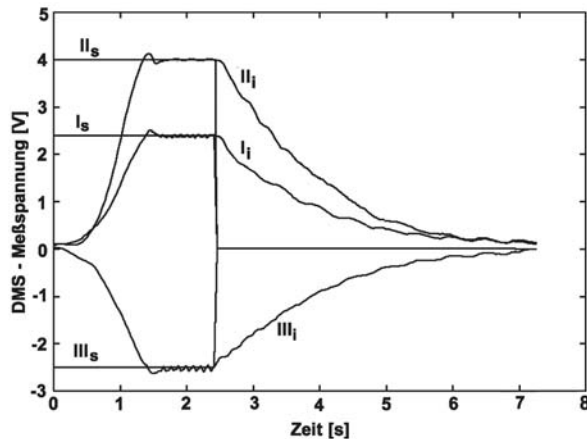


Bild 13: Sprungantwort des Tragflügels bei $P_0 = 3,1 \text{ Watt}$

Bild 12 & 13 zeigen auch eine Schwäche der Memoryaktoren; ihr langsames Abkühlverhalten. Dadurch sind keine hohen Frequenzen in der ständigen Änderung zwischen maximaler und minimaler Verformung möglich. [6]. So kann das Heizen bis zur maximalen Verformung im Millisekundenbereich liegen, die Abkühlgeschwindigkeit hängt aber von dem Wärmeaustauschkoeffizient zwischen Memoryaktor und Umgebung ab.

Eine Besonderheit in dieser Regelstruktur ist das präzise Anfahren und Halten von Verformungen durch Formgedächtnisaktuatoren. Bild 14 zeigt diesen Versuch für eine Heizleistung (P_0) von 1,2W je Draht.

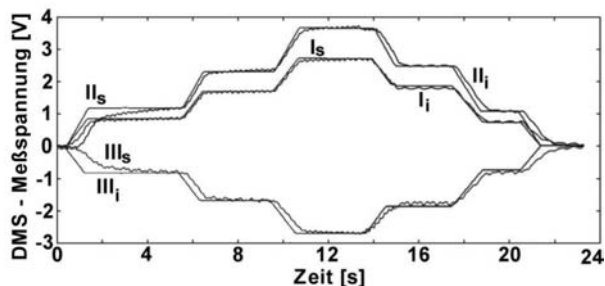


Bild 14: Gezieltes Anfahren mittels Formgedächtnisaktuatoren

Für jeden Teilabschnitt (I, II, III) wurden rampenförmige Sollwerte vorgegeben und bei einem festgelegten Wert für einige Sekunden festgehalten. Es ist zu erkennen, daß der Istwert gut dem Sollwert folgt. Bei Beginn der Messung ist das System noch etwas träge, da dort erst die Umwandlungstemperatur der Formgedächtnisdrähte erreicht werden muß. Ab der zweiten Rampe ist die schnelle Einstellung des Sollwertes für die Verformung kein Problem mehr und liegen im Bereich von

einer Zehntelsekunde. Auch werden die Haltepunkte der Strukturverbiegung exakt eingestellt. Beim Rückstellen der Verformung sind die gleichen Ergebnisse festzustellen. Nur bei der letzten Rampe ist wieder ein trägeres Verhalten festzustellen. Dies liegt am Wärmeübergang des Formgedächtnisdrahtes zur Umgebung. Je höher der Temperaturunterschied zur Umgebung, desto besser kann die Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Kommt die Drahttemperatur (Bild 10) in die Nähe der Umgebungstemperatur ($T_0=23^\circ\text{C}$), verlangsamt sich die Abkühlung des Drahtes und damit die Rückstellung seiner Deformation.

7 Zusammenfassung

Die Arbeit beschäftigte sich mit dem Einsatz von Formgedächtnislegierungen als Aktuatoren in adaptiven Strukturen. Da diese Materialien das größte volumenbezogene Arbeitsvermögen von allen Aktuatoren, wie Hydraulikanlagen, Motoren, etc. aufweisen, sind sie bestens für komplexe Strukturen geeignet, bei denen geringes Gewicht und kleiner Arbeitsraum eine Rolle spielen. Aus der Untersuchung geht hervor, daß es durch die geeignete Auswahl der Formgedächtnislegierung möglich ist, exakte Regelungen durchzuführen. Die Regelung der Drähte mittels Pulsmodulation ermöglicht, jede gewünschte bzw. optimale Form einzustellen. Das hier eingesetzte Modell eines adaptiven Tragflügel reagiert automatisch auf die sich ändernde Anströmung und optimiert so seine Profilform. Die Meßergebnisse zeigen, daß die Formgedächtnisdrähte schnell auf Änderungen reagieren. Die Rückstellung der Verformung hängt vom Wärmeübergang zur Umgebung ab, so daß hohe Frequenzen in der Strukturänderung nicht realisierbar sind. Wenn ein anderes Medium als Luft verwendet wird, wie z.B. eine Flüssigkeit, sind Frequenzen bis zu 20 Hz realisierbar.

Es ist festzustellen, daß der Einsatz von Formgedächtnisdrähten als Aktuatoren gute Ergebnisse liefert und sich somit zur Regelung von Strukturen ihre Anwendung finden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Bein, T., Hanselka, H., Breitbach, E.; The Adaptive Spoiler -Mechanical aspects of a local thickening to control the transonic shock-; 9th Int. Conf. On Adaptive Struc. And Tech.; (1998)
- [2] <http://www.sm.bs.dlr.de/wbsm/wbsm11/ADIF.htm>
- [3] Achenbach, M., Müller, I.; A Model of Shape Memory; Journal de Physique C4, Tome 43, 163-167; (1982)
- [4] Seelecke, S.; Adaptive Strukturen mit Formgedächtnisaktoren - Modellierung und Simulation; Habilitationsschrift, TU Berlin; (1999)
- [5] Vogel, H.; Gerthsen Physik; 18.Auflage, Springer Berlin, Heidelberg, New York; (1995)
- [6] da Silva, E.-P.; Zur Kalorimetrie von Gedächtnislegierungen und Ihrer Anwendung als elektrisch aktivierte Aktuatoren; Dissertation, TU-Berlin; (2000)