Formgedächtnislegierungen -

Experimentelle Untersuchung und Aufbau von adaptiven Strukturen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
André Musolff
aus Berlin

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr. -Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Professor Dr.rer.nat. Frank Behrendt
Berichter: Professor Dr. rer.nat. Ingo Müller
Berichter: Professor Dr.rer.nat. Walter Reimers

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 21.03.2005

Berlin 2005

D83

Für meine Frau Martina und meinen Sohn Louis Fabian.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Thermodynamik der Fakultät für Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.rer.nat. Dr.h.c. Ingo Müller, der mein Interesse an den Themen dieser Arbeit geweckt und die Arbeit betreut hat. Er war immer an dieser Arbeit interessiert und hat mir durch seine Anregungen stets neue Impulse gegeben.

Ebenso möchte ich Herrn Professor Dr.rer.nat. Walter Reimers vom Fachgebiet Metallische Werkstoffe der Technischen Universität Berlin für die Übernahme des Korreferats danken.

Herrn Professor Dr.rer.nat. Frank Behrendt vom Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien der Technischen Universität Berlin danke ich für den Vorsitz des Promotionsausschusses.

Besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern der Werkstatt des Fachgebietes, den Herren M. Nemitz und V. Tumay, die mit Engagement und hoher Zuverlässigkeit die in der Arbeit beschriebenen Modelle, Versuchsaufbauten und Prototypen angefertigt haben. Den Herren A. Leonhardt und J. Anderl danke ich für die elektrischen Installationen. Für die nützlichen Hinweise möchte ich mich bei Herrn M. Schulz bedanken.

Danken will ich aber auch allen anderen Fachgebietsangehörigen, die durch ihre Ratschläge und lohnende Kritik in zahlreichen Besprechungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Prof. Dr.-Ing. S. Seelecke, Prof. Dr.-Ing. H. Struchtrup, Dr.rer.nat. W. Weiss, Dr.-Ing. J. Au und Dipl.-Ing. H. Sahota.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die durch ihre Geduld und Unterstützung ein großer Rückhalt für mich war.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG

INHALTSVERZEICHNIS **1**

SYMBOLVERZEICHNIS **3**

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG **5**

1.1 Einleitung 5

1.2 Zielstellung und Aufbau dieser Arbeit 6

2 GRUNDLAGEN **9**

2.1 Materialverhalten von Formgedächtnislegierungen (FGL) 9

2.2 Schematisches Materialverhalten von Formgedächtnislegierungen 11

2.3 Modellvorstellung für das Materialverhalten 14

2.4 Einwegeffekt 16

2.5 Zweiwegeffekt 17

2.6 Technische Anwendungen von Formgedächtnislegierungen 18

3 VORUNTERSUCHUNGEN FÜR DIE GESTALTUNG VON ADAPTIVEN STRUKTUREN MIT FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN **23**

3.1 Untersuchung der Lastabhängigkeit von Dehnung und Widerstand 23

3.2 Messungen für konstante Lasten 25

3.2.1 Versuchsaufbau 25

3.2.2 Messgerätebeschreibung 27

3.2.3 Versuchsdurchführung 27

3.2.4 Resultate 28

3.2.5 Zusammenfassung 32

3.3 Untersuchung am Biegebalken 33

3.3.1 Versuchsaufbau 33

3.3.2 Messgerätebeschreibung 34

3.3.3 Versuchsdurchführung 35

3.3.4 Balkentheorie 36

3.3.5 Resultate 42

3.3.6 Zusammenfassung 45

3.4 Kühlung von Formgedächtnislegierungen durch Peltierelemente 46
3.4.1 Vorbetrachtung 46
3.4.2 Peltierelemente 48
3.4.3 Beschreibung der Aktorkomponenten und der Messerfassungsgeräte 49
3.4.4 Versuchsaufbau 53
3.4.5 Bestimmung des Arbeitspunktes der Peltierelemente 54
3.4.6 Ablauf der Messung und experimentelle Ergebnisse 56
3.4.7 Schlussfolgerung und Zusammenfassung 59
4 ANWENDUNG DER FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN IN ADAPTIVEN STRUKTUREN 61
4.1 Allgemeines zur Regelung 62
4.1.1 Bedeutung der Regelungstechnik 62
4.1.2 Der Regelkreis 62
4.1.3 Regler 63
4.1.4 Regelung von Formgedächtnislegierungen 64
4.2 Modell I - Adaptiver Tragflügel 67
4.2.1 Vorbetrachtung 67
4.2.2 Modellbeschreibung 69
4.2.3 Regelalgorithmus und technische Realisierung 73
4.2.4 Auswahl der Formgedächtnislegierung 80
4.2.5 Beschreibung der Messgeräte und Bauelemente 81
4.2.6 Versuchsdurchführung und Resultate 83
4.2.7 Schlussfolgerung und Zusammenfassung 88
4.3 Modell II - Adaptives Winglet 90
4.3.1 Vorbetrachtungen 90
4.3.2 Modellbeschreibung und Versuchsstand 92
4.3.3 Regelung des Winglets 98
4.3.4 Messgeräte und Bauelemente 102
4.3.5 Versuchsdurchführung und Resultate 103
4.3.6 Schlussfolgerung und Zusammenfassung 108
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 111
LITERATURVERZEICHNIS 115

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Austenit	
A_1, A_2, A_3	Konstante in Punkt A	
A_s	Austenit-Start-Temperatur	°C
A_f	Austenit-Finish-Temperatur	°C
B_1, B_2, B_3	Konstante in Punkt B	
Br	Breite des Biegebalkens	mm
d	Durchmesser	mm
D	Deformation	[%]
D_{max}	maximale Deformation	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
F	Kraft	N
Hö	Dicke des Biegebalkens	mm
K_D	Differenzierbeiwert	
K_I	Integrierbeiwert	
K_P	Proportionalbeiwert	
I	Trägheitsmoment	mm^4
$I_{elektr.}$	Elektrische Stromstärke	A
l_o	Ausgangslänge	mm
L	Last	N
M_o	Moment	Nm
M_s	Martensit-Start-Temperatur	°C
M_f	Martensit-Finish-Temperatur	°C
M_+	Martensit in der „Plus“-Variante	

M_-	Martensit in der „Minus“-Variante	
$R_{elektr.}$	Elektrischer Widerstand	Ohm
t_F	Maximale Anschaltdauer	s
t_P	Pulsdauer	s
$U_{elektr.}$	Elektrische Spannung	V
U_0	Konstante Spannung des Netzgerät	V
u(t)	Steuergröße	
V_{Ist}	Istwert der Verformung des Tragflügels	
V_{Soll}	Sollwert der Verformung des Tragflügels	
w(t)	Sollwert	
x(t)	Regelgröße	
$x_M(t)$	Gemessener Wert	
$x_w(t)$	Regelabweichung	
y(t)	Stellgröße	
x_1, x_2, x_3	Freischneidungen	
ε	Dehnung	%
$\varepsilon_{Zweiweg}$	Zweiwegeffektlänge	%
Δl	Längenänderung	mm
$w(0)$, $w(l)$ $w(x)$	Durchbiegung an der Stelle 0, l, x	mm
$w'(x)$	Biegewinkel	°
$w''(x)$	Biegemoment	Nm

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

In den letzten Jahren nehmen Formgedächtnislegierungen (FGL) als Aktoren einen immer größeren Stellenwert in der Automatisierung und Mechanisierung ein. Dieser Umstand ist dadurch bedingt, dass die FGL von allen bekannten Aktoren das größte spezifische Leistungsvermögen auf kleinstem Raum besitzen. Dabei sind insbesondere im Vergleich zu herkömmlichen Aktorsystemen, wie z.B. Hydraulik, Pneumatik oder elektrische Motoren, das kleine Gewicht, der geringe Platzbedarf, die Einfachheit der Konstruktion und der niedrige Preis beachtenswert.

Die besondere Eigenschaft, die bei den FGL genutzt wird, beruht auf dem physikalischen Effekt der Gitterumwandlung im Kristallgefüge. Diese Gitterumwandlung erfolgt durch eine Temperaturerhöhung oder -erniedrigung und ermöglicht eine Nutzung der resultierenden Bewegungs- und/oder Krafterzeugung als Stellglieder oder Aktoren.

Aktoren aus FGL wandeln Wärmeenergie in mechanische Arbeit um und können aufgrund ihrer Temperaturempfindlichkeit als multifunktionale Bauteile genutzt werden. Dabei können sie zusätzlich die Funktion als Sensor übernehmen und werden daher auch als intelligente Materialien („smart materials“) bezeichnet.

FGL übertragen Spannungen von etwa 300 MPa bei reversiblen Dehnungen von ungefähr 3% und sind dabei bis zu 10^7 Lastspiele 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. Formgedächtnislegierungen eignen sich daher besonders für quasistatische Aufgabenstellungen, bei denen es auf große Kräfte und Wege ankommt.

Es gibt eine Vielzahl von bekannten Anwendungen, in denen FGL autark arbeiten und ohne zusätzliche Energieversorgung zum Einsatz kommen. Beispiele solcher Anwendungen sind:

- Kopplungs- und Entkopplungsmechanismen (Dübel und Steckverbindungen)
- Fensteröffner in Gewächshäusern
- Brandschutzverriegelungen bzw. –öffner
- Ventile
- Thermostate

Die Gemeinsamkeit der genannten Anwendungen liegt in der temperaturbedingten Formänderung. Das Formgedächtniselement nimmt zur Stellbewegung die nötige Energie in Form von Wärme aus der Umgebung auf.

Für den Einsatz von FGL als Aktoren in der Steuerung und Regelung ist es erforderlich, dass die Bewegung des Formgedächtnisaktors unabhängig von der Umgebungstemperatur erfolgt. Die Bewegung muss gezielt durch ein Signal des Steuergerätes erzeugt werden und kann durch ein Beheizen der FGL erfolgen. Es besteht die Möglichkeit, die Beheizung mittels eines Wärmebades oder über Heizelemente durchzuführen. Dies hat aber den Nachteil, dass die Anordnung sehr massiv und schwer wird und zusätzlich die Ansprechzeiten sehr lang sind. Die beste Möglichkeit ist das Beheizen durch die Joule´sche Wärme, die durch den ohmschen Widerstand des stromdurchflossenen Formgedächtniselements entsteht. Weitere Komponenten zur Erzeugung der Wärme sind damit nicht notwendig. Die in dieser Arbeit besprochenen Untersuchungen und Modelle werden direkt durch die Joule´sche Wärme beheizt, da die Umsetzung einfach und Platz sparend ist und eine schnelle und effektive Erwärmung gewährleistet.

1.2 Zielstellung und Aufbau dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung und der technischen Anwendung der Formgedächtnislegierungen.

Zu Beginn der Arbeit werden der Formgedächtniseffekt beschrieben, das thermomechanische Materialverhalten dargelegt und technische Anwendungsbeispiele vorgestellt. Hier soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Eigenschaften, die zur

Auswahl einer Formgedächtnislegierung führen, wie Umwandlungstemperatur, Legierungszusammensetzung, Hysterese u.a., gegeben werden.

Das Kapitel 3 befasst sich mit Untersuchungen an Formgedächtnisdrähten und Formgedächtnisbändern, die den Einsatz der Formgedächtnislegierungen optimieren. Dabei werden die Untersuchungsvorrichtungen beschrieben und die experimentellen Beobachtungen diskutiert.

Der Entwurf eines Formgedächtnisaktors in Form einer adaptiven Struktur erfordert aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens werkstoffliches, konstruktives und steuerungstechnisches Wissen. Daher beschäftigt sich der letzte Teil der Arbeit, das Kapitel 4, mit dem Entwurf eines Reglungsalgorithmus für Formgedächtnislegierungen und der Entwicklung zweier Anwendungsbeispiele: dem adaptiven Tragflügel und dem adaptiven Winglet. Abschließend werden die beiden Modelle regelungstechnisch untersucht und verschiedene Regelexperimente durchgeführt.

2 Grundlagen

2.1 Materialverhalten von Formgedächtnislegierungen (FGL)

Die wichtigsten Materialeigenschaften von Formgedächtnislegierungen sind bei thermischen Einflüssen oder bei Einwirkung von äußeren Spannungen ihre reversiblen Gestaltänderungen und die dabei auftretenden hohen Rückstellkräfte. Verformt man diese Materialien bei tiefen Temperaturen, 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. (Abbildung 2.1). Dieser Effekt wird bei verschiedenen metallischen Legierungen (z.B. NiTi, CuAlNi, CuZnAl) beobachtet, aber auch bei Polymeren (z.B. PTFE) und Keramiken (z.B. ZrO_2).

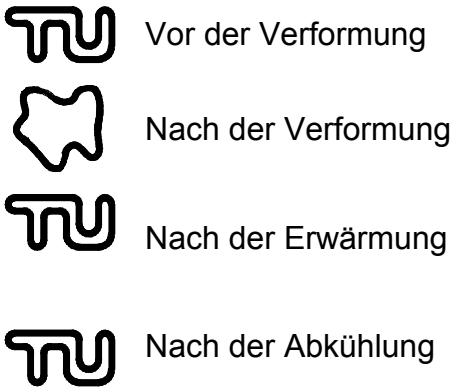


Abbildung 2.1: Last-Dehnungs-Verhalten bei verschiedenen Temperaturen

Die physikalische Ursache für das thermo-mechanische Verhalten des Formgedächtniseffekts (FG-Effekts) ist eine Folge der martensitischen Phasenumwandlung des Materialgefüges, welche eine Gitterumwandlung in diesem Material bewirkt. Eine martensitische Umwandlung liegt dann vor, wenn eine reversible, diffusionslose Transformation, hervorgerufen durch eine spannungs- oder temperaturinduzierte Umwandlung der geordneten Gitterstruktur, stattfindet. Die Transformation erfolgt weit unterhalb der Schmelztemperatur in der festen Phase.

In der Hochtemperaturphase liegt die symmetrische Gitterstruktur (kubisch raumzentriert) des Austenits vor. Beim Abkühlen des Austenits, durch Scherung und Atombewegung in die Tieftemperaturphase, entsteht ein unsymmetrisches Gitter (orthorhombisch) [12], der Martensit. Der Martensit neigt zur Zwillingsbildung, wobei bis

zu 24 verschiedene Martensitzwillinge auftreten können. Wird die Temperatur wieder erhöht, so erfolgt die Rücktransformation in die Austenitphase.

Die Gitterumwandlung findet innerhalb eines bestimmten Temperaturintervalls statt. Abbildung 2.2 zeigt schematisch das temperaturabhängige Verhältnis von Martensit zu Austenit, wobei idealerweise bei hoher Temperatur der Austenit zu 100 Prozent vorliegt und der Martensit bei tiefer Temperatur einen Anteil von 100 Prozent aufweist. Die Umwandlung von Martensit zu Austenit findet bei einer anderen Temperatur statt als die Umwandlung von Austenit zu Martensit, d.h. die Umwandlung ist hysteresebehaftet.

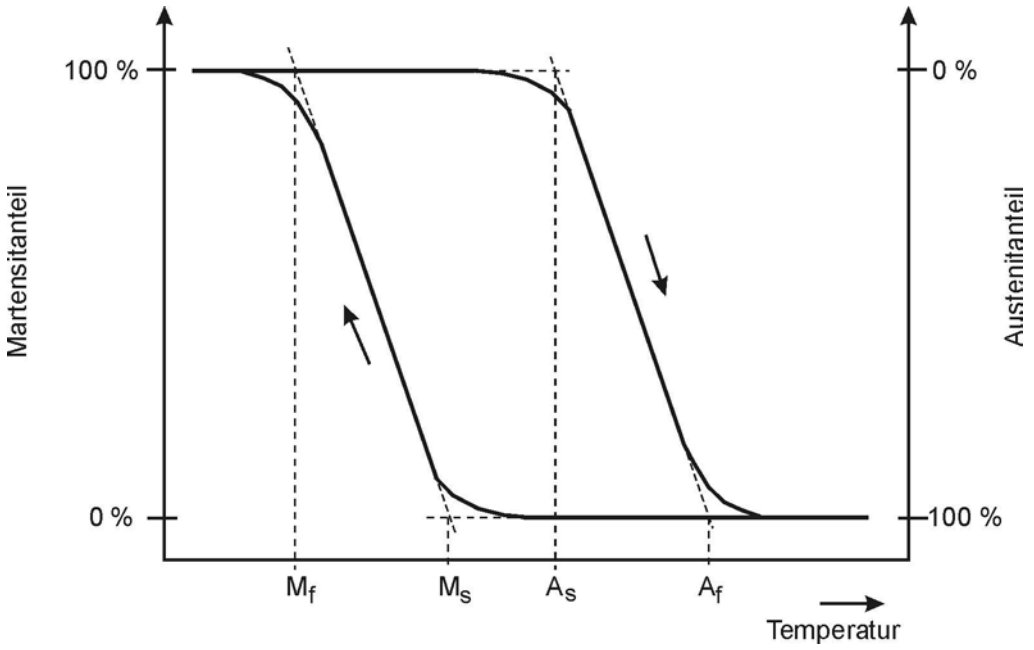


Abbildung 2.2 : Martensit- und Austenitanteil in Abhängigkeit von der Temperatur (schematisch)

Die Hysterese entsteht aufgrund von inneren Verlusten, wie z.B. durch innere Reibung und spontane Entspannungen auf atomarer Ebene, während der Gefügeumwandlung [1]. Für die näherungsweise Beschreibung der Hysterese werden charakteristische Temperaturpunkte im Umwandlungsprozess genutzt. Mit Hilfe von Tangenten an den Wendepunkten können diese bestimmt werden (Abbildung 2.2). Bei der Austenit-Start-Temperatur (A_s) beginnt die Gitterumwandlung von Martensit zu Austenit, welche bei der Austenit-Finish-Temperatur (A_f) abgeschlossen ist. Beim Abkühlen findet der umgekehrte Vorgang statt; dabei wird aus dem Austenit der Martensit gebildet. Die Transformation in den Martensit beginnt entsprechend bei der Martensit-Start-Temperatur (M_s) und ist mit der Martensit-Finish-Temperatur (M_f) ab-

geschlossen. Diese Temperaturen gelten für Gitterumwandlungen ohne äußere Kräfte. Bei einer vollständigen reversiblen Transformation ist nach der Rücktransformation wieder genau die gleiche Gitterstruktur erreicht, ohne dass es zur Versetzungsbildung, zu einem Abgleiten der Gitterebenen oder dem Wandern von Versetzungen kommt. Unter diesen Bedingungen sind die martensitischen Transformationen beliebig oft wiederholbar.

Die bisher beschriebene Umwandlung beruht auf einem temperaturinduzierten Vorgang im lastfreien Zustand. Der martensitische Zustand kann allerdings auch bei konstanter Temperatur aus dem Austenit erzeugt werden. Dieser Vorgang wird lastinduzierte Martensitbildung genannt.

Um die FG-Effekte und Vorgänge im Gitter besser darstellen zu können, soll in Kapitel 2.2 und 2.3 das Verhalten schematisch beschrieben und mittels eines Modells erklärt werden.

2.2 Schematisches Materialverhalten von Formgedächtnislegierungen

Die Ursache des unterschiedlichen Materialverhaltens von FGL liegt an der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit des Last-Dehnungsverhaltens. Abbildung 2.3 zeigt schematisierte Last-Dehnungs-Diagramme für unterschiedliche konstante Temperaturen.

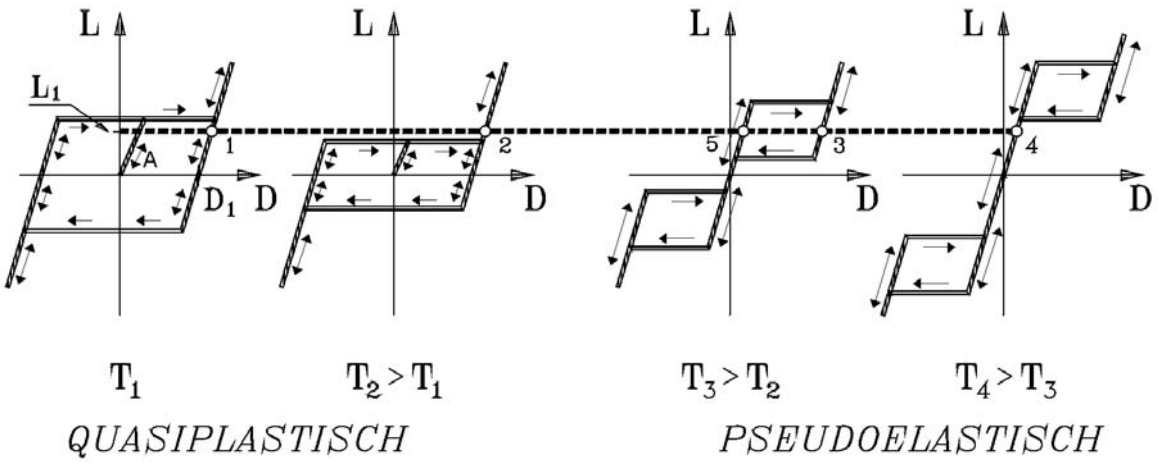


Abbildung 2.3: Last-Dehnungs-Verhalten für ansteigende Temperaturen

Die an den Kurvenstücken angeordneten Pfeile geben die möglichen Laufrichtungen im Last-Dehnungs-Diagramm an. Wenn auf einem Linienstück beide Richtungen möglich sind, so ist dort die Verformung elastisch. Bei nur einer Laufrichtung ist die Verformung plastisch. Alle Last-Dehnungs-Diagramme zeigen Hystereseschleifen.

Bei tiefen Temperaturen (T_1 und $T_2 < M_f$) erinnert der gezeigte Kurvenverlauf in Abbildung 2.3 an einen plastischen Körper mit einer elastischen Anfangskurve, einer Fließgrenze und einer bleibenden Verformung nach Entlastung bei vorausgegangenem Fließen. Die Kurven bei T_1 und T_2 umschließen ein Gebiet um den Ursprung, welches links und rechts von elastischen Geraden abgeschlossen wird, auf denen die Legierung weit über die Fließgrenze hinaus elastisch verformt werden kann. Eine kleine Zug- oder Drucklast führt zur Dehnung entlang der elastischen Linie (A) durch den Ursprung. Sobald die Last jedoch eine Grenzlast erreicht, wächst die Dehnung ohne weitere Lastzunahme und der Körper fließt wie ein plastischer Körper, d.h. die horizontalen Begrenzungen des Hysteresegebietes sind die Linien, auf denen plastisches Fließen erfolgt. Wird die Last weiter erhöht, so endet der plastische Fließvorgang und das Formgedächtnismaterial wird an der zweiten äußeren Linie elastisch verformt. Bei einer anschließenden Entlastung folgt das Formgedächtnismaterial dieser zweiten elastischen Linie, wobei es nach vollständiger Entlastung eine bleibende Restdehnung (D_1) behält. Mit steigender Temperatur von T_1 nach T_2 ist zu erkennen, dass die Fließgrenze aufgrund der höheren Bewegung der Teilchen sinkt. Dieses Verhalten bei tiefen Temperaturen wird Quasiplastizität und die dabei entstehende Verformung quasiplastisch genannt.

Wird das Formgedächtnismaterial auf Temperaturen oberhalb von A_f erwärmt, so kehrt das Material im lastfreien Zustand in den Ursprung zurück. Diese Rückstellung der quasiplastischen Verformung wird Formgedächtniseffekt genannt und die Materialien, die diesen zeigen, Formgedächtnislegierungen, Memorylegierungen bzw. Shape Memory Alloys (SMA).

Das Formgedächtnismaterial zeigt bei hohen Temperaturen (T_3 und $T_4 > A_f$) ein völlig anderes Verhalten. Es weist Hystereseschleifen bei einer Zuglast im ersten und einer Drucklast im dritten Quadranten des Last-Dehnungs-Diagramms auf. Das Verhalten der Formgedächtnislegierungen wird hier pseudoelastisch genannt. Der Körper ist elastisch, weil er nach einer Belastung über den Wert der Fließgrenze mit nachfol-

gender Entlastung wieder in den Ursprung des Last-Dehnungs-Diagramms zurückkehrt.

In diesem Temperaturbereich kann die Legierung allerdings nur *pseudoelastisch* genannt werden, weil sie nur nach Durchlaufen einer Hysterese wieder in den Ausgangszustand zurückkommen kann. Hierbei sind ein Fließen entlang der äußeren horizontalen Begrenzung des Hysteresegebietes und eine Rückstellung der plastischen Verformung entlang der inneren Hysterese zu beobachten. Sowohl die Fließgrenze als auch die Rückstellgrenze wachsen mit steigender Temperatur, wobei das Gebiet der Hysterese kleiner wird.

Bei einer genügenden Anzahl von Last-Dehnungs-Diagrammen bei verschiedenen Temperaturen (Abbildung 2.3) ist es möglich, ein Dehnungs-Temperatur-Diagramm für eine konstante Last $L=L_1$ (Abbildung 2.4) zu konstruieren. In den Last-Dehnungs-Diagrammen der Abbildung 2.3 sind die zur Last L_1 zugehörigen Punkte eingetragen, welche sich in das Dehnungs-Temperatur-Diagramm (Abbildung 2.4) übertragen lassen.

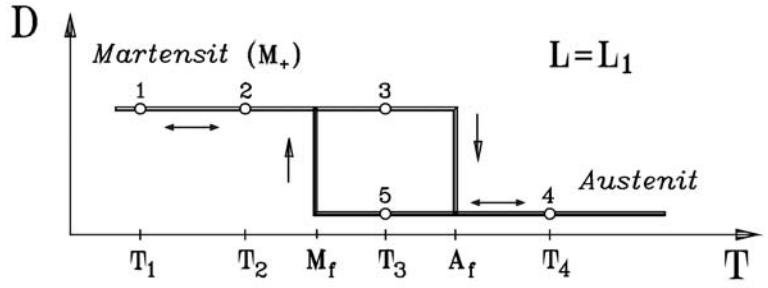


Abbildung 2.4: Schematisches Dehnungs-Temperatur-Verhalten

Anhand des konstruierten Dehnungs-Temperatur-Diagramms ist zu erkennen, dass sich die Last-Dehnungs-Hysteresen in einer Dehnungs-Temperatur-Hysterese niederschlagen. Die Dehnung (D) hat bei tiefer Temperatur (T_1 und T_2) einen großen Wert. Bei einer höheren Temperatur, die zwischen T_3 und T_4 liegt, wird die Deformation auf einen kleinen Wert zurückgestellt. Zusätzliche Temperaturerhöhung verändert diesen Wert der Dehnung praktisch nicht mehr. Bei Abkühlung stellt sich die zu Anfang des Temperaturzyklus vorhandene große Dehnung wieder ein, wenn der Körper auf eine Temperatur zwischen T_3 und T_2 abgekühlt wird.

Die Form des Dehnungs-Temperatur-Diagramms in Abbildung 2.4 bringt zum Ausdruck, dass eine unter Zugspannung stehende Probe mit wachsender Temperatur zwischen zwei Extremwerten der Verformung springen kann. Demnach zieht sich ein belastetes Formgedächtnismaterial beim Heizen zusammen, und beim Abkühlen dehnt es sich wieder aus. Dieser Effekt wird in den meisten Anwendungen der Formgedächtnislegierungen, wie der Aktorik oder bei thermischen Stellgliedern, ausgenutzt.

2.3 Modellvorstellung für das Materialverhalten

Zur Beschreibung des Phasenübergangs entwickelte I. Müller [13, 14, 15] ein eindimensionales Strukturmodell des thermo-mechanischen Verhaltens in Formgedächtnislegierungen. Dieses soll hier kurz und allgemein verständlich beschrieben werden.

In diesem Modell werden die 24 Martensitzwillinge auf zwei Martensitzwillinge (M_-, M_+) reduziert, so dass im Modellkörper einschließlich des Austenits (A) drei verschiedene Kristallgittertypen zu unterscheiden sind. Die Modellbilder in Abbildung 2.5 geben einen Eindruck von der Mikrostruktur der Formgedächtnismetalle und von ihrer Formänderung bei Belastung.

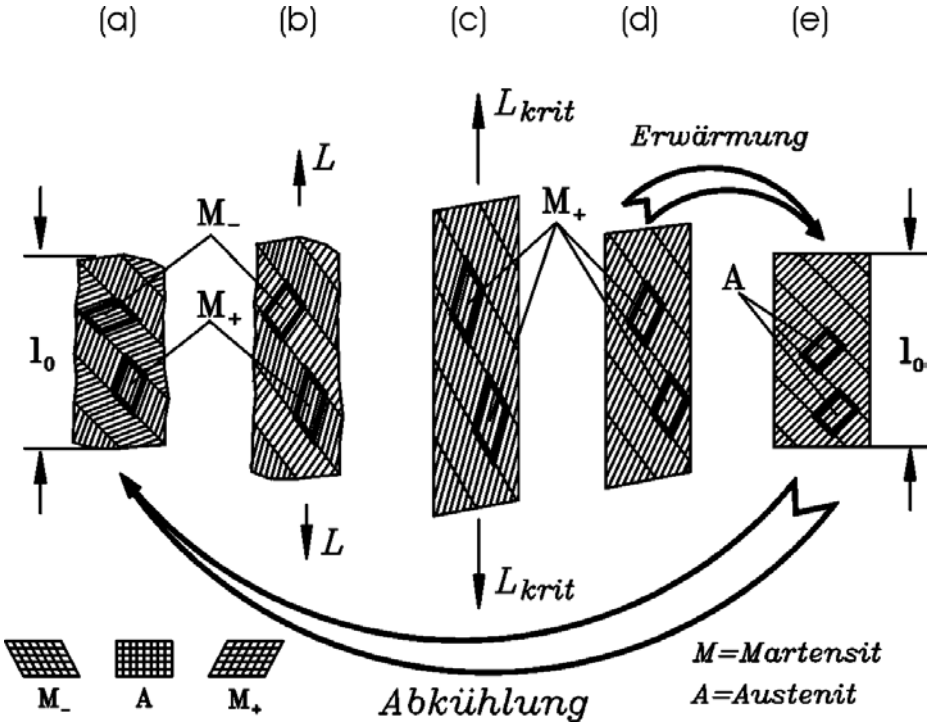


Abbildung 2.5: Modellkörper für den Phasenübergang

Der Modellkörper zeigt „Gitterteilchen“, welche schichtartig übereinander angeordnet sind. Bei tiefer Temperatur befindet sich der Körper (Abbildung 2.5[a]) in der martensitischen Struktur mit gleichen Anteilen von beiden Martensitzwillingen des Typs M_- und M_+, während er sich bei hoher Temperatur in der austenitischen Struktur (Abbildung 2.5[e]) befindet. Beide Konfigurationen haben die gleiche Länge (l_0), sind spannungsfrei und unbelastet.

Wenn der martensitische Körper aus Abbildung 2.5[a] mit einer kleinen vertikalen Zuglast belastet wird, stehen die Schichten, die in einem Winkel von 45° zur Richtung der Zuglast angeordnet sind, unter einer Schubspannung, welche die M_- -Teilchen steiler anstellt und die M_+ -Variante flacher werden lässt. Die daraus resultierende Gesamtverformung und damit die Längenänderung des Körpers setzt sich aus den Vertikalverschiebungen jeder einzelnen Schicht zusammen (Abbildung 2.5[b]). Eine anschließende Entlastung des Körpers führt zurück in den last- und verformungsfreien Zustand (Abbildung 2.5[a]). Somit ist diese Verformung elastisch und beschreibt das gleiche Verhalten wie in den Last-Dehnungs-Diagrammen für T_1 und T_2 (Abbildung 2.3).

Wenn die vertikale Last erhöht wird und einen gewissen Wert überschreitet, kommt es zum Umklappen von M_- -Schichten in M_+ -Schichten, wodurch die Scherlänge beträchtlich vergrößert wird (Fließvorgang). Das Umklappen ist mit einer erheblichen Verlängerung des Körpers verbunden (Abbildung 2.5[c]). Abbildung 2.5[d] zeigt die Restverformung bei Entlastung des Körpers, da keine der umgeklappten Schichten in die Ausgangskonfiguration zurückspringt.

Somit können bei tiefen Temperaturen das Auftreten der elastischen Kurve durch den Ursprung, der Fließvorgang und die Restverformung bei Formgedächtnislegierungen erklärt werden.

Durch Erwärmung gelangt der unbelastete Körper von Abbildung 2.5[d] in die austenitische Konfiguration, die in Abbildung 2.5[e] dargestellt ist. Dabei zieht sich der Körper zusammen. Äußerlich hat der Körper nun schon seine anfängliche Ausgangskonfiguration angenommen, jedoch hat er bei hohen Temperaturen die austenitische Struktur.

Bei nachfolgender Abkühlung im lastfreien Zustand wechseln die Austenitschichten in die martensitischen Schichten, und zwar mit gleichen Anteilen von M_- - und M_+ -

Varianten. Damit hat der Körper seinen alten Zustand in äußerer Form und innerer Struktur wiederhergestellt.

Das Modell ist somit in der Lage, eine anschauliche Erklärung für den Formgedächtniseffekt zu liefern.

2.4 Einwegeffekt

Wird eine Formgedächtnislegierung (z.B. NiTi-Draht), wie in Abbildung 2.6 schematisch gezeigt, mit einer verzwillingten Martensitstruktur im kalten Zustand durch eine äußere Last verformt (1→2) und anschließend entlastet (2→3), so wird sie entzwillingt und bleibt verformt. Durch eine Erwärmung im lastfreien Zustand kehrt die Legierung wieder in ihre Ausgangslänge (3→4) zurück. Dabei wird aus der lastbevorzugten Martensitvariante der Austenit gebildet. Die Legierung hat zwar die gleiche Länge (Position 1 und 4), es liegen jedoch unterschiedliche Gitterkonfigurationen vor. Beim Abkühlen auf die Ausgangstemperatur (4→1) entsteht ohne Längenänderung der verzwillingte Martensit und der Ausgangszustand ist wiederhergestellt.

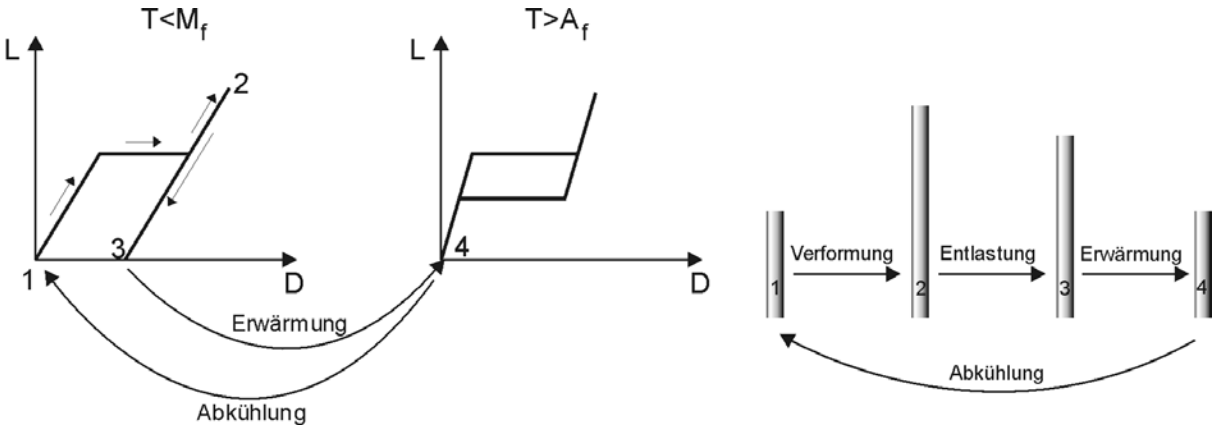


Abbildung 2.6: Darstellung des Einwegeffekts

Diese „Erinnerung“ an die ursprüngliche Form bei Erwärmung wird als Einwegeffekt bezeichnet, wobei die dabei auftretende Rückstellung erhebliche Kräfte erzeugt.

Der Einwegeffekt kann mehrfach wiederholt werden. Um erneut einen Zyklus zu starten, ist lediglich nach oder während des Abkühlens eine Kraft zur Verformung des Martensits nötig.

2.5 Zweiwegeffekt

Beim Zweiwegeffekt „erinnert“ sich die Formgedächtnislegierung bei hoher Temperatur nicht nur an die austenitische Form, sondern bei Rücktransformation in den Martensit an eine eintrainierte Deformation bei tiefer Temperatur. Zur Längenänderung ist keine zusätzliche äußere Kraft notwendig. Wie die Abbildung 2.7 zeigt, ist nur der Wechsel zwischen zwei Temperaturen nötig. Wird die Legierung erwärmt (1→2), so bildet sich das Austenitgitter und lässt die Legierung in die ursprüngliche Form zurückkehren. Hier verhält sich die Legierung wie beim Einwegeffekt (Abbildung 2.6; 3→4). Durch eine spezielle Behandlung kann der Legierung ohne Anbringen einer äußeren Last eine zweite Form eingeprägt werden. Dabei bilden sich in der Legierung innere Spannungsfelder aus, welche bei der Abkühlung nur die Bildung von bevorzugten Martensitvarianten hervorrufen. Dies führt dazu, dass die Legierung beim lastfreien Abkühlen ihre Form nicht beibehält, sondern eine eintrainierte Form annimmt (2→1). Die so eintrainierte Vorzugsform bei tiefen Temperaturen kann bei der Umwandlung von Austenit zu Martensit nur eingenommen werden, wenn keine äußeren Kräfte entgegenwirken.

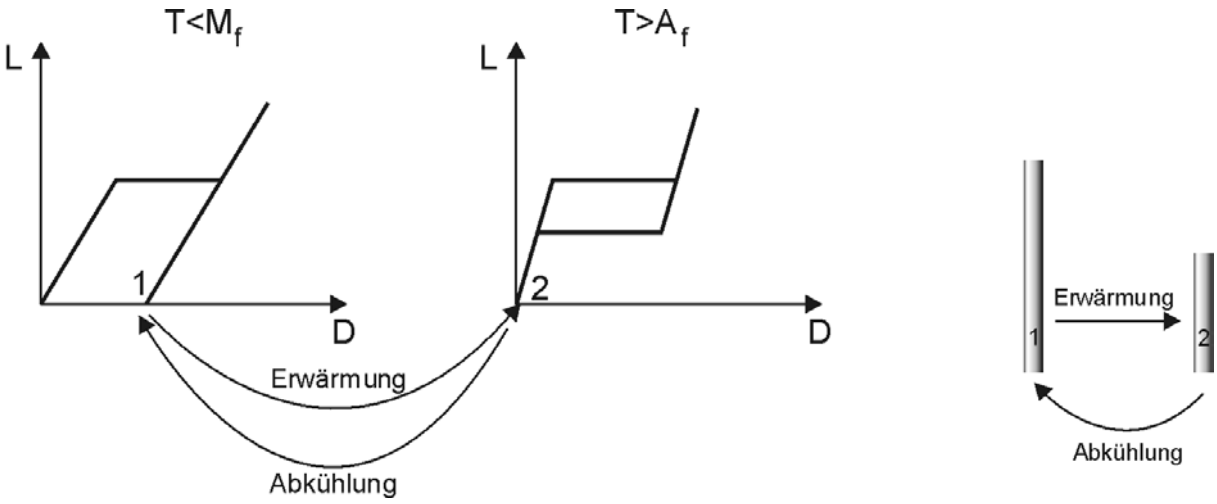


Abbildung 2.7: Darstellung des Zweiwegeffekts

Die Entstehung des Zweiwegeffekts kann auf mehrere Arten antrainiert werden:

- *Durch Shape Memory Effect Training (SME-Training)*
  Die Formgedächtnislegierungen werden bei tiefer Temperatur verformt und anschließend über A_f erwärmt. Diese Behandlung wird mehrfach durchgeführt, bis bei der Martensitbildung eine bevorzugte Variante entsteht.
- *Durch Stress Induced MartensiteTraining (SIM-Training)*
  Bei Temperaturen oberhalb von A_f werden die Formgedächtnislegierungen mehrfach verformt. Dabei entsteht ein spannungsinduzierter Martensit mit einer bevorzugten Orientierung. Nach einigen Zyklen sind diese Varianten stabilisiert, so dass die Form im Niedertemperaturbereich ohne äußere Kraft eingenommen wird.
- *Durch zusammengefasstes Training*
  Bei diesem Verfahren werden SME- und SIM-Training kombiniert. Dabei wird die Legierung bei hoher Temperatur verformt und im eingespannten Zustand abgekühlt.
- *Aufgrund von Ausscheidungen*
  Bei Legierungen mit hohem Nickelanteil in der NiTi-Legierung können bevorzugte Martensitvarianten durch Erzeugung von Spannungsfeldern im Material entstehen. Dabei wird der Trainingseffekt durch das Altern erreicht, bei dem linsenförmige Ti_3Ni_4-Ausscheidungen die Spannungsfelder induzieren bzw. den Zweiwegeffekt auslösen.

2.6 Technische Anwendungen von Formgedächtnislegierungen

Aufgrund der besonderen Eigenschaften von FGL, wie der Erzeugung von großen Kräften, Rückstellung großer Deformationen und Temperaturabhängigkeit, gibt es große Anstrengungen, diese in technischen Anwendungen einzusetzen. Den größten Anteil von Entwicklungen nimmt hier die Medizintechnik ein, wobei in den letzten Jahren auch der Maschinenbau, die Automobilindustrie und die Luft- & Raumfahrt verstärkt die Entwicklung und Erforschung der Formgedächtnislegierungen vorantreiben.

Die besten Ergebnisse für Anwendungen in punkto

- hoher Anzahl von thermischen Zyklen
- guter Umsetzung von Joule´scher Erwärmung in Arbeit
- guter Langzeitstabilität
- geringer Deformationswiderstand des Martensitgitters und
- hoher Festigkeit des Austenitgitters

erfüllen die FGL auf NiTi-Basis. Daher werden diese Legierungen fast ausschließlich industriell eingesetzt. Aber auch andere FGL auf Cu-Basis (z.B. CuAlNi, CuZnAl) finden vereinzelt ihre Anwendungen, da sie preisgünstiger sind. Diese haben aber schlechtere Formgedächtniseigenschaften und mechanische Grundeigenschaften. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 sind einige Eigenschaften der drei Legierungsgruppen gegenübergestellt.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von FGL aus NiTi, CuAlNi und CuZnAl [16, 17, 18, 19, 20]

	NiTi	CuAlNi	CuZnAl
Umwandlungstemperaturen [°C]	-100...+100	-150...200	-200...+120
Hysteresenbreite [°C]	15…30	20…30	10…20
Anzahl der thermischen Zyklen	100000	5000	10000
Max. Dehnung bei Einwegeffekt [%]	8	6	4
Max. Dehnung bei Zweiwegeffekt [%]	5	1	0,8
Dichte [g/cm^3]	6,4…6,5	7,0…7,2	7,8…8,0
Spez. elektr. Widerstand [10^{-6}Ohm/m]	0,5…1,1	0,1…0,14	0,07…0,12
Elastizitätsmodul - Martensit [GPa]	70		
- Austenit [GPa]	35	80…100	70…100
Zulässige Spannungen für zyklische Beanspruchung [MPa]	150	100	75
Zugfestigkeit [MPa]	800...1000	700...800	400...700
Bruchdehnung [%]	40...50	5...6	10...15
Korrosionsbeständigkeit	sehr gut	gut	befriedigend
Biokompatibilität	sehr gut	schlecht	schlecht

Durch die beschriebenen Phänomene der Formgedächtnislegierungen ergibt sich eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Einige bereits realisierte bzw. Erfolg versprechende Anwendungen sind:

- **Verbindungselemente, Stellelemente, Regelung, Steuerung und Schalter**
  Schlauchklemmen, Rohrverbinder im Flugzeugbau (Hydraulikleitungen), hochbelastbare Verbindungen von Pipelines, Schrumpfringe zum Dichten, Sicherungsmuttern, Sicherheitselemente bei Toastern, Verbrühschutz im Brausekopf, Überhitzungsschutz im Durchlauferhitzer, Klappentätigkeit bei Ventilatoren, Thermobimetallschnappelement, Steckverbindungen für Schaltkreise, Ventilsteuerung, Dampfdruckregulierer, Dübel
  [21-27, 48]
- **Aktoren und Robotik**
  Gelenke aus Memoryaktuatoren, Roboterhand von Hitachi, Roboterglieder, Greifer, Sechsbeiniger Roboter
  [28-32]
- **Medizintechnik**
  Hirnspatel für die Neurochirurgie, Zahnspangen und Klammern zur Osteosynthese, Implantate, Flexible Gelenkketten, Aktive Katheder, Miniblutpumpen, Kathederdrähte
  [33-37, 49]
- **Motor, Kraftfahrzeug, Antriebe, Luft- und Raumfahrt**
  Wärmekraftmaschinen, Steuerung von Solaranlagen, Scheinwerferverstellung, Türschließanlagen, Spiegelblendschutz, Aktoren für Innenraumbelüftung, verstellbare Tragflächen, Raumfahrtantennen, Rotorsteuerung am Helikopter
  [38-41]

Bei den genannten Einsatzbeispielen werden auch Anforderungen, wie z.B. schmalere Hysterese, tiefere Fließlasten und höhere Umwandlungstemperaturen, differenzierter. Um die Anwendungsbreite der kommerziell eingesetzten NiTi-Legierungen zu erhöhen, werden den NiTi-Legierungen ternäre Elemente zulegiert. Dabei werden zur Einstellung bestimmter Eigenschaften Elemente, wie Eisen, Vanadium, Kupfer, Kobalt, Chrom, Palladium oder Niobium, der NiTi-Legierung hinzugefügt [42]. Häufig

wird Kupfer zulegiert, da dieses die Hysteresenbreite [9, 43] verringert und die Umwandlungstemperaturen in Langzeitversuchen [42] gegenüber der binären NiTi-Legierung stabilisiert.

Die Forschung beschäftigt sich zurzeit mit der Erhöhung der Umwandlungstemperaturen von NiTi-Legierungen. Dies soll mit Legierungszusätzen wie Hafnium oder Palladium erfolgen [44, 45]. So bietet die Firma AMT (@ Medical Technologies n.v.) in Belgien bereits Legierungen mit Hafnium als Legierungszusatz zu der binären NiTi-Legierung unter der Bezeichnung NTH Alloy [46] an.

Für die Anwendung von Formgedächtnislegierungen ist es erfahrungsgemäß von Vorteil mit dem Hersteller in Kontakt zu treten, da dieser in der Regel eine Feinabstimmung der Legierung veranlassen kann.

Die Untersuchungen und Anwendungen in dieser Arbeit wurden mit NiTi-Legierung und NiTiCu-Legierung durchgeführt. Diese wurden bei der Firma AMT erworben und tragen die Bezeichnung NT1251-01-04 und NTC 0506-16.

3 Voruntersuchungen für die Gestaltung von adaptiven Strukturen mit Formgedächtnislegierungen

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten untersucht, die einen optimalen Einsatz von Formgedächtnisdrähten in ihrer Anwendung ermöglichen. Zu Beginn einen soll eine Einschätzung erfolgen, inwieweit das Formgedächtnismaterial gleichzeitig als Aktor und Sensor benutzt werden kann.

- Die Sensorfunktion besteht aus einer Widerstandsmessung aus der mittels Abbildung 3.12 die Deformation registriert wird.
- Die Aktorfunktion besteht darin, die gewünschte Deformation durch Joule´sche Wärme einzustellen.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wird die Möglichkeit der zusätzlichen Kühlung von Formgedächtnismaterialien mittels Peltierelementen beschrieben.

3.1 Untersuchung der Lastabhängigkeit von Dehnung und Widerstand

Das Ziel der Untersuchungen ist, aus einer Vielzahl von Dehnungs-Temperatur- und Widerstand-Temperatur-Messungen für verschiedene konstante Lasten das Widerstands-Dehnungsverhalten für veränderliche Lasten zu bestimmen und die verwendete Formgedächtnislegierung nicht nur als Aktor, sondern gleichzeitig auch als Sensor zu benutzen. Daher werden zuerst Analysen mit verschiedenen konstanten Lasten in einer Messwanne und im zweiten Teil der Untersuchungen eine analytische Bestimmung der Widerstands-Dehnungsbeziehung am Biegebalken durchgeführt. Die analytischen Ergebnisse werden zusätzlich durch ein Experiment miteinander verglichen.

Für die Untersuchungen wird ein Zweiwegdraht aus NiTi mit folgenden Parametern verwendet:

Ausgangslänge :	l_o	= 110 mm
Drahtdurchmesser :	d	= 0,29 mm
Zweiwegeffektlänge :	$\varepsilon_{Zweiweg}$	= 2,5 %
Übergangstemperaturen :	A_s	= 55 °C
	A_f	= 65 °C
	M_s	= 60 °C
	M_f	= 45 °C

Der Zweiwegeffekt hat den Vorteil, dass bei der Untersuchung am Biegebalken der NiTi-Draht die Rückstellung in die gerade Ausgangsform nicht behindert, da mit abnehmenden Biegeradius die Kraft des Balkens nachlässt und daher nicht mehr ausreichen würde, den Einweg-Draht in seine Ausgangslänge zurückzustellen. Die Übergangstemperatur wird hinsichtlich der späteren Anwendungen so gewählt, dass der Draht bei Raumtemperatur in der Martensitphase vorliegt und die vollständig umgewandelte Austenitphase nicht bei allzu hohen Temperaturen liegt, damit die nötige elektrische Leistung für die Joule´sche Erwärmung möglichst gering ist. Der gewählte kleinere Drahtdurchmesser ermöglicht einerseits eine schnelle Erwärmung, andererseits trägt er zur raschen Abkühlung des gesamten Drahtquerschnittes bei.

3.2 Messungen für konstante Lasten

3.2.1 Versuchsaufbau

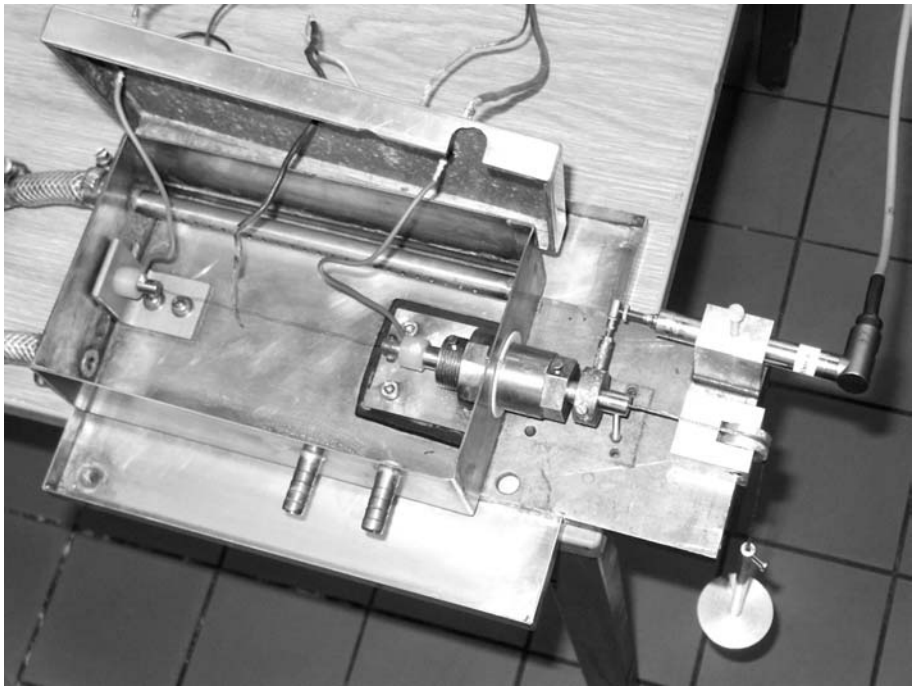


Abbildung 3.1: Versuchsvorrichtung „Messwanne“

Die Abbildung 3.1 zeigt die Versuchsanordnung für die Untersuchung des Formgedächtnisdrahtes. Zur besseren Identifizierung der Elemente soll die schematische Darstellung in Abbildung 3.2 dienen. Für die ersten Analysen mit konstanter Last wird die Formgedächtnislegierung in einer eigens dafür konstruierten Messwanne (10) mit Messtisch (14) untersucht. Der zu untersuchende Formgedächtnisdraht (6) befindet sich in der Messwanne und ist zwischen dem festmontierten Halter (3) und der in horizontaler Richtung beweglichen Gleitstange (8) kraftschlüssig eingespannt. Die Gleitstange wird in einem Gleitlager (9) geführt, welches eine nahezu reibungsfreie Bewegung gewährleistet. Diese Linearführung verhindert alle Bewegungen der Gleitstange quer zur Belastungsrichtung und gewährleistet, dass an dem Formgedächtnisdraht nur Normalkräfte und keine Querkräfte bzw. Torsionsmomente angreifen. Die Länge der Gleitstange ist so konzipiert, dass sie Deformationen des Drahtes bis zu 20% seiner Ausgangslänge zulässt. An der rechten Seite der Gleitstange ist eine Drahtlitze befestigt, die über eine Umlenkrolle (11) die Last des veränderbaren Gewichtes (12) auf den Formgedächtnisdraht überträgt. Die Längenänderung wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers (13) und eines Messverstärkers der Firma

HBM registriert. Am Zulauf (2) und am Rücklauf (1) ist ein Thermostat mittels flexibler Schläuche an der Messwanne angeschlossen, über den die Temperatur des Drahtes konstant gehalten bzw. variiert werden kann. Im Thermostat befindet sich ein nicht leitendes Wärmeträgeröl, das den Formgedächtnisdraht durch zehn Düsen im Rohr (5) umspült. Die Temperatur des Öls und somit die Drahttemperatur wird über einen Messfühler Pt100 (7) gemessen, der sich in der Nähe des Formgedächtnisdrahtes befindet.

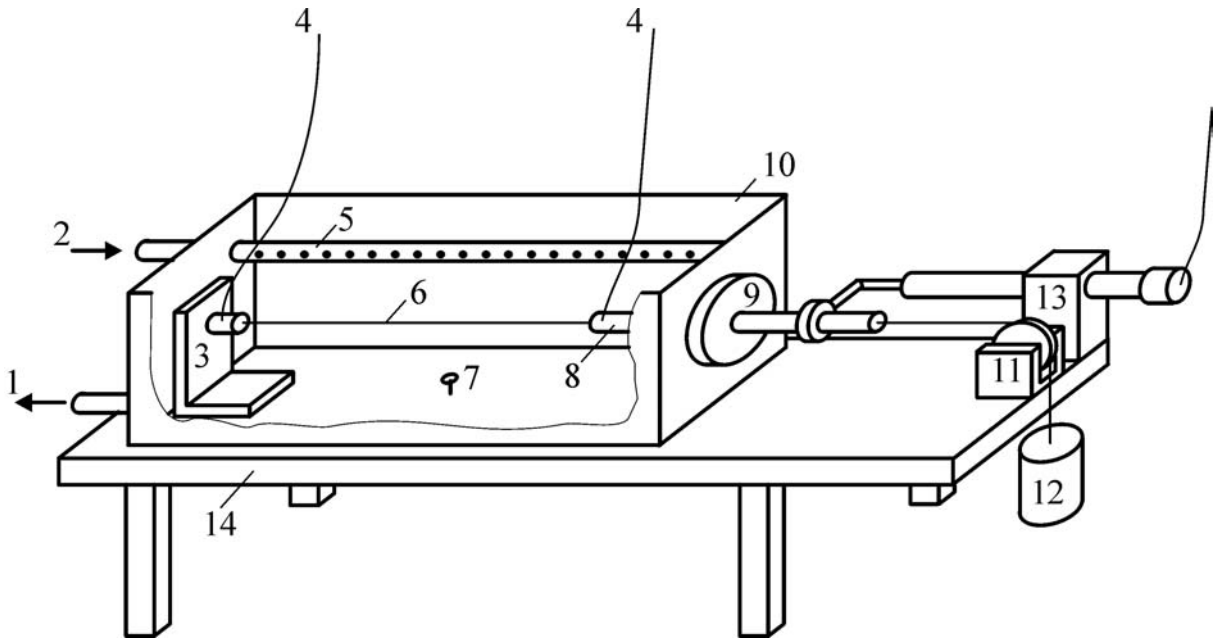


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Versuchsstandes

Um das Widerstandsverhalten des Formgedächtnisdrahtes zu untersuchen, wird der Draht an den Einspannstellen zur Messwanne elektrisch isoliert und während des Versuchs ein konstanter Strom von 0,3A angelegt. Die induzierte Spannungsänderung, hervorgerufen durch die Widerstandsänderung im Draht, wird in Abhängigkeit zur Temperaturänderung gemessen. Die Joule´sche Erwärmung ist hier zu vernachlässigen, da durch die Umspülung mit dem Wärmeträgeröl die entstehende Erwärmung sofort abgeführt wird.

Die Messdaten von Temperatur-, Weg- und Widerstandsänderung liegen als Spannungssignale vor und werden von einer in einem Computer befindlichen A/D-Karte (PCL-718) umgewandelt und mittels des Programms „LabTech Notebook“ erfasst und aufbereitet.

3.2.2 Messgerätebeschreibung

Zur Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Messwerte werden für diesen Versuchsaufbau die folgenden messtechnischen Geräte verwendet:

- **Induktiver Wegaufnehmer des Typs W10K der Firma HBM**
  Nennweg: ±10mm; Nennkennwert: ±80mV/V; Nennspeisespannung: 2,5V; Trägerfrequenz: 5kHz; Genauigkeitsklasse: 0,4%
- **Widerstandsthermometer Pt100 mit Messdatenwandler der Firma Telemeter Electronic**
  Platin Dünnfilm Thermometer (S102 PD): Nennkennwert: 100mW/K; Temperaturbereich: -50°C ... +500°C; Toleranzklasse A (0,06%)
  Messdatenwandler mit Anzeige: Nennkennwert: 1mV/K; Messrate: 0,333 Hz; Messbereich –200°C ... +600°C;
- **Messverstärker des Typs MC55 der Firma HBM**
  für DMS (Halb- und Vollbrücken) und induktive Halb- und Vollbrücken; Trägerfrequenz 4,8 kHz; Genauigkeitsklasse: 0,03%
- **Multifunktionskarte des Typs AX-5621 der Firma Spectra**
  16 bit A/D Wandler, Converter mit sukzessiver Approximation; Messrate: 50kHz; max. Messbereich: -10V ... +10V
- **Personal Computer 486/66**
  PC 486/66MHz mit Messprogramm LabtechNotebook und eingebauter Multifunktionskarte (AX-5621)

Für die Temperierung wird folgendes Gerät verwendet:

- **Thermostat der Firma Julabo (FP50-HC)**
  Temperaturbereich : -50°C ... 250°C; Kühlleistung: 800W (20°C); Heizleistung: 2000W

3.2.3 Versuchsdurchführung

Der Draht wird bei 110°C in die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Versuchseinrichtung eingebaut. Der Thermostat wird an die Versuchseinrichtung angeschlossen und auf eine Temperatur oberhalb von A_f eingestellt, so dass die Probe im austenitischen Zustand vorliegt. Ist die Temperatur erreicht, liegt der Formgedächtnisdraht im last-

freien Zustand in der Ausgangslänge l_0 vor. Nun werden der Wegaufnehmer und der Messverstärker kalibriert. Es erfolgt ein Nullabgleich am Messverstärker, um den Referenzzustand der Probe festzulegen. Vor der Versuchsreihe für verschiedene Lasten wird die Probe mit einem Gewicht von 14N belastet. Es erfolgen thermische Zyklen (110°C→15°C→110°C→....) bis die Probe sich „gesetzt“ hat und reproduzierbare Messkurven liefert. Anschließend wird die Probe entlastet und erneut ein Nullabgleich durchgeführt. Nach erfolgtem Abgleich beginnen die Deformations-Temperatur- und Widerstand-Temperatur-Untersuchungen für verschiedene konstante Lasten. Dazu wird mit der höchsten Last von 13N begonnen. Danach wird die Last schrittweise um 1N verringert bis die Endlast 1N beträgt. Für jede Last werden jeweils vier komplette Temperaturzyklen durchfahren, um so verlässliche Daten zu erhalten. Begonnen werden die Messungen bei hoher Temperatur (110°C>A_f), welche mittels des Thermostats auf 15°C (<M_f) abgesenkt und dann wieder auf 110°C erhöht wird.

Wie in der Gleichung (3.1) gezeigt, wird für die Bestimmung des ohmschen Widerstandes R des NiTi-Drahtes die gemessene elektrische Spannung $U_{elektr.}$ durch den anliegenden konstanten Strom $I_{elektr.}$ geteilt.

$$R = \frac{U_{elektr.}}{I_{elektr.}} \tag{3.1}$$

Die Deformation ε erhält man durch das Verhältnis der Längenänderung Δl zur Ausgangslänge l_0, wie in Gleichung (3.2) gezeigt.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{3.2}$$

3.2.4 Resultate

Abbildung 3.3 zeigt eine Auswahl der gemessenen Deformations-Temperatur-Kennlinien (links) und der Widerstand-Temperatur-Kennlinien (rechts). Die Last der einzelnen Kennlinien verringert sich von oben nach unten.

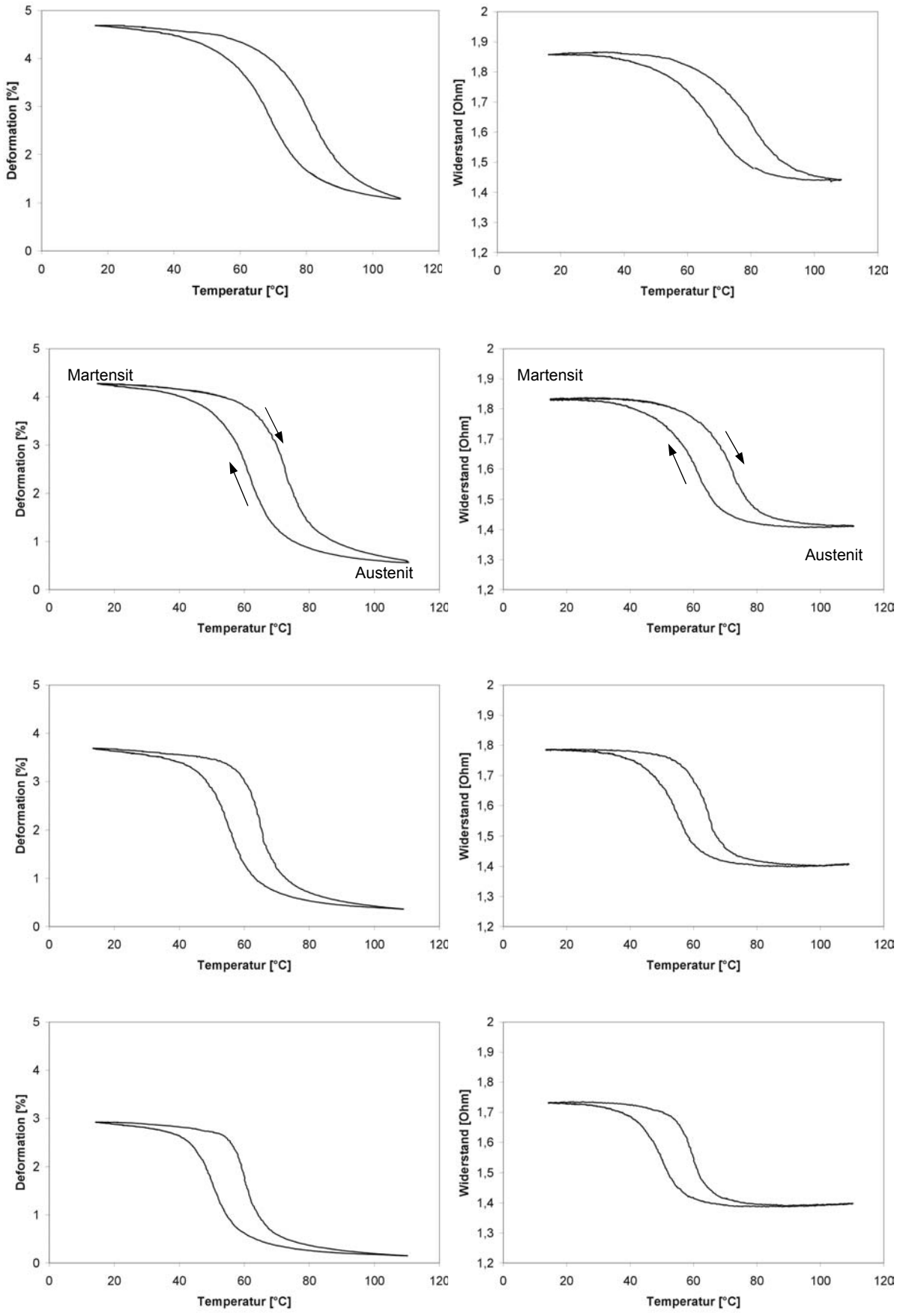


Abbildung 3.3: Dehnungs-Temperatur-Kennlinien und Widerstand-Temperatur-Kennlinien für verschiedene Lasten (von oben nach unten: 13N, 9N, 5N, 2N)

Anhand der 9N-Kennlinie soll der Kurvenverlauf erörtert werden. Bei 110°C wird der NiTi-Draht mit 9N belastet. Dadurch längt sich der Draht um 0,56% und der elektrische Widerstand beträgt 1,41Ohm. Bei Abkühlung auf 15°C erhöht sich die Deformation auf 4,28% und der Widerstand erreicht 1,83Ohm. Die Deformationszunahme ist mit dem Phasenübergang vom Austenit zu der bei der Last bevorzugten Martensitvariante zu erklären (untere Kurve). Dementsprechend ist die Zunahme des elektrischen Widerstands auf die Verlängerung des Drahtes zurückzuführen, da der Widerstand bei gleich bleibender Länge (Phasenumwandlung im lastfreien Zustand) bei Martensit kleiner ist als beim Austenit [2]. Der Phasenübergang von Austenit zu Martensit beginnt bei ca. 70°C und ist bei ca. 55°C abgeschlossen. Wird der NiTi-Draht erwärmt, findet ein Phasenübergang von Martensit zu Austenit ab ca. 75°C statt und ist bei ca. 85°C abgeschlossen. Die Kurve ist zum Startpunkt zurückgekehrt und zeigt die Reversibilität des Prozesses. Würde man den NiTi-Draht entlasten, so würde dieser zu seiner Ausgangslänge l_o zurückkehren und somit die Deformation 0% betragen.

Beim Betrachten der Kurven ist festzustellen, dass sich die Hysterese mit steigender Last der beiden Kennlinien in die rechte obere Ecke verschiebt, d.h. die Übergangstemperaturen, die Deformation und der Widerstand zunehmen. Das ist damit zu begründen, dass es mit steigender Last für das Formgedächtnismaterial schwieriger wird, aus dem Martensit Austenit zu bilden und die Rückumwandlung zum Martensit aufgrund des energetisch günstigeren Zustands des Martensits bei höherer Temperatur einsetzt.

Aus den Deformations-Temperatur- und Widerstand-Temperatur-Kennlinien der Abbildung 3.3 lassen sich durch die Eliminierung der Temperatur die Widerstand-Deformations-Kennlinie für verschiedene Lasten erstellen, welche in Abbildung 3.4 dargestellt sind.

Die 0N Kennlinie konnte nicht gemessen werden, da aufgrund der Reibung des Versuchsstandes keine vernünftigen Messdaten zu erzielen waren. Für diese Kennlinie sind zwei Messpunkte bekannt:

1. Messpunkt: Deformation ($\varepsilon_{Zweiweg}$=2,5%) des Drahtes unterhalb von M_s bei einer Temperatur von 15°C und mit einem Widerstand von 1,72Ohm

2. Messpunkt: Deformation (ε=0%) des Drahtes oberhalb von A_f bei einer Temperatur von 110°C und mit einem Widerstand von 1,38Ohm

Die Bestimmung dieser beiden Messpunkte dient als Orientierung, wobei der 0N Messpunkt für die Temperatur unterhalb von M_s in der Abbildung 3.4 eingetragen ist.

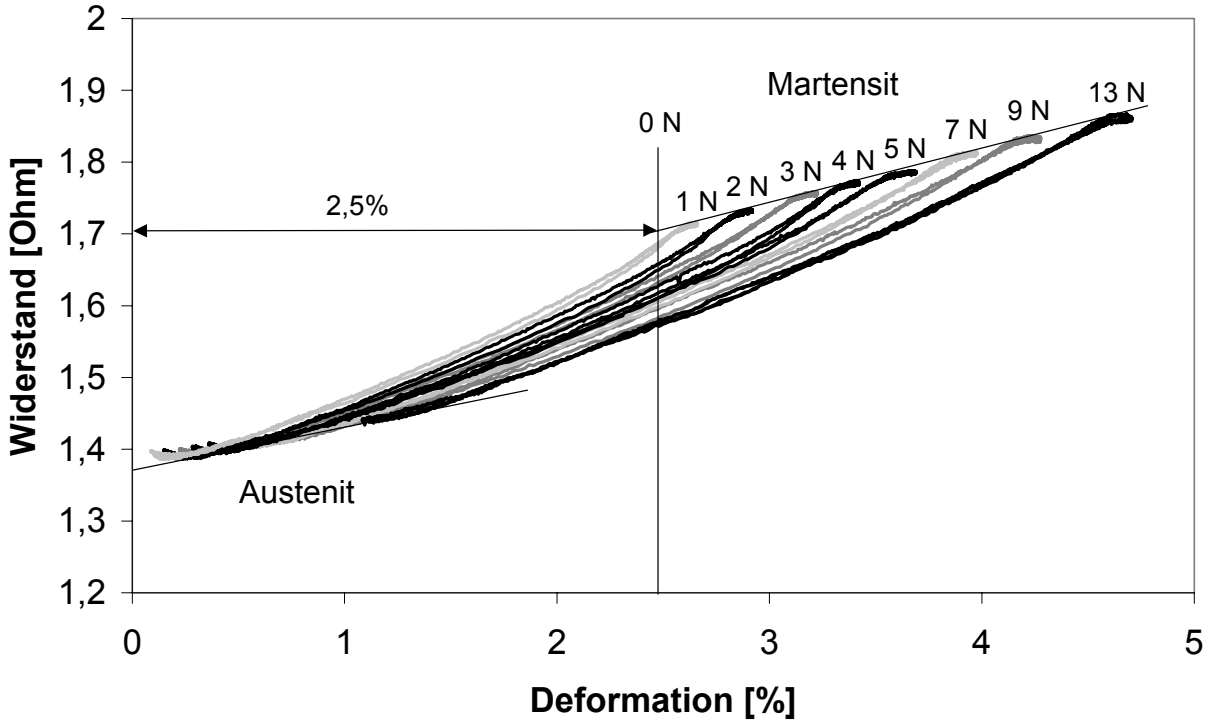


Abbildung 3.4: Widerstand-Deformations-Kennlinie für verschiedene Lasten

In der Abbildung 3.4 wird zur besseren Darstellung auf die Kennlinien 6N, 8N, 10N, 11N und 12N verzichtet. Diese zeigen qualitativ den gleichen Verlauf. Die Kennlinien in Abbildung 3.4 sind fast linear, wobei die Hysteresen fast verschwunden sind, da die Anstiege der Kennlinien im Deformations-Temperatur-Diagramm und Widerstand-Temperatur-Diagramm für Hin- und Rückweg gleich sind. In der linken unteren Ecke liegt der Draht im Austenit und in der oberen rechten Ecke im Martensit vor. Am Ende der Kurven sind leichte Bögen zu erkennen; diese sind auf das thermische Ausdehnungsverhalten und auf das thermische Widerstandsverhalten von Metallen zurückzuführen. Mit steigender Last werden die Anstiege der Kurven flacher, da bei hoher Last mehr lastorientierte Martensitvarianten gebildet werden, welche sich dann bei Temperaturerhöhung in den Austenit umwandeln.

3.2.5 Zusammenfassung

Bei einer konstanten Last gibt es eine proportionale Beziehung zwischen Deformation bzw. elektrischem Widerstand und Temperatur. Daraus folgt auch eine eindeutige Abhängigkeit von elektrischem Widerstand und der Deformation. Dementsprechend ist es möglich, aus der Kenntnis des elektrischen Widerstandes eine Aussage über die momentane Länge der Formgedächtnislegierung zu treffen, ohne die Temperatur des Drahtes zu bestimmen. Ein Beispiel dafür wäre ein freihängender Formgedächtnisdraht, an dem ein Gewicht befestigt ist, welcher durch gezieltes elektrisches Heizen das Gewicht in die gewünschte Position hebt bzw. senkt. Da die Messungen eine Lastabhängigkeit in den Widerstand-Deformationsuntersuchungen zeigen, wird im zweiten Teil der Untersuchungen eine analytische Bestimmung der Widerstand-Deformationsbeziehung am Biegebalken durchgeführt. Zusätzlich wird die analytische Beziehung zwischen Widerstand und Deformation mit einem Experiment am Biegebalken verglichen. Dies soll im Kapitel 3.3 beschrieben werden.

3.3 Untersuchung am Biegebalken

Ziel der Untersuchung soll es sein, mit Hilfe der analytischen Berechnung aus der Balkentheorie und anhand der Widerstandsänderung eine Aussage über die Deformationsänderung bei lastabhängigen Bedingungen zu treffen. Hierzu wird die eindeutige Beziehung zwischen Kraft und Durchbiegung am Balken in der Mechanik herangezogen.

3.3.1 Versuchsaufbau

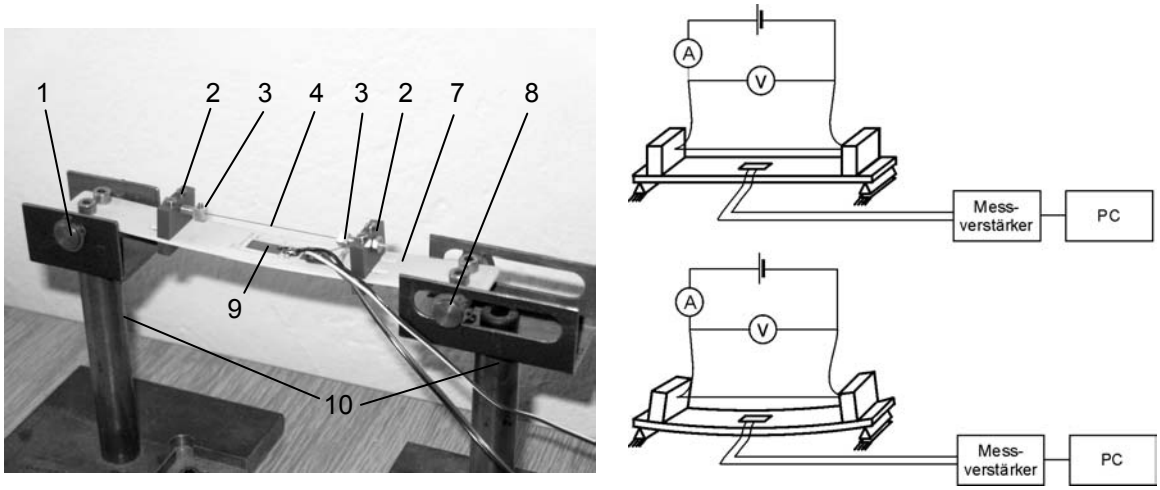


Abbildung 3.5: Foto und schematische Darstellung der Untersuchung am Biegebalken

Die Abbildung 3.5 zeigt den Versuchsaufbau für die Messung am Biegebalken (7). Der Biegebalken ist aus Polyvinylchlorid und durch ein Festlager (1) auf der linken Seite und ein Loslager (8) auf der rechten Seite an den beiden Haltern (10) fixiert. Auf dem Biegebalken sind zwei Stege (2) befestigt. Diese nehmen zwei Gewindestangen mit Klemmung (3) auf, in denen der zuvor in Kapitel 3.2 beschriebene Formgedächtnisdraht (4) mit einer Ausgangslänge l_0 von 78,1mm befestigt wird. Die Biegung wird mittels zweier Dehnungsmessstreifen registriert, von denen sich einer auf der Oberseite und der andere auf der Unterseite des Biegebalkens befindet. Die Dehnungsmessstreifen sind mit einem Messverstärker verbunden und als Halbbrücke geschaltet. Die zwei Kompensationswiderstände befinden sich im Messverstärker, welcher die Speisespannung für die Dehnungsmessstreifen liefert und das verstärkte Messsignal über eine Analog/Digital-Multifunktionskarte an einen PC zur Da-

tenerfassung weiterleitet. Zusätzlich wird die zum eingestellten Strom gehörige Spannung gemessen und ebenfalls am PC erfasst.

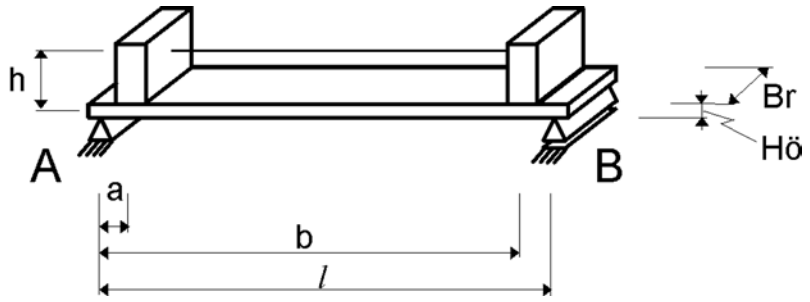


Abbildung 3.6: Abmessungen des Biegebalkens

Das Versuchsmodell weist folgende Spezifikationen und Abmessungen auf (Abbildung 3.6):

- Länge des Biegebalkens und Abstand der Lager *(l)* : 140 mm
- Abstand des ersten Steges vom Festlager A (a) : 30 mm
- Abstand des zweiten Steges vom Festlager A (b) : 110 mm
- Höhe des Abstandes des NiTi-Drahtes vom Balken (h) : 8,75 mm
- Breite des Biegebalkens (Br) : 20 mm
- Dicke des Biegebalkens (Hö) : 1,5 mm
- Experimentell bestimmter Elastizitätsmodul des Balkens (E) : 3323 N/mm^2
- Errechnetes Trägheitsmoment des Balkens (I) : 5,625 mm^2

3.3.2 Messgerätebeschreibung

- **Messverstärker des Typs MC55 der Firma HBM**
  für DMS (Halb- und Vollbrücken) und induktive Halb- und Vollbrücken; Trägerfrequenz 4,8 kHz; Genauigkeitsklasse: 0,03%

- **Personal Computer 486/66**
  PC 486/66MHz mit Messprogramm LabtechNotebook und eingebauter Multifunktionskarte (AX-5621)

- **Multifunktionskarte des Typs AX-5621 der Firma Spectra**
  16 bit A/D Wandler, Converter mit succesiven approximation Algorithmus; Messrate: 50kHz; max. Messbereich: -10V ... +10V

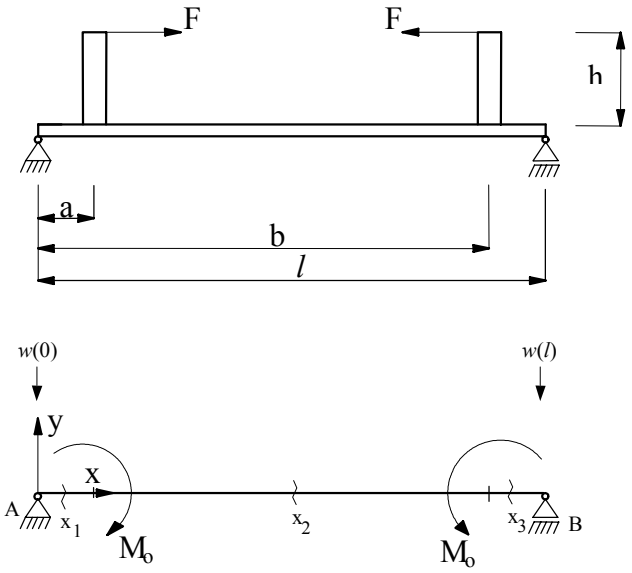
- **Dehnungsmessstreifen von der Firma HBM**
  Foliendehnungsmessstreifen des Typs 1-LY11-10/120

3.3.3 Versuchsdurchführung

Das Netzgerät ist ausgeschaltet und es fließt kein Strom durch den NiTi-Draht. Die Temperatur des NiTi-Drahtes liegt unterhalb von M_f. Der Draht ist daher vollständig martensitisch und hat eine maximale Einbaulänge von 80mm (l_0+2,5%ige-Zweiwegdeformation). Somit ist der Biegebalken gerade, es wirkt keine Kraft an den Einspannstellen von Steg und Draht und die gemessene Durchbiegung an den Dehnungsmessstreifen ist Null.

Das Netzgerät wird eingeschaltet und die Stromstärke langsam erhöht. Dabei erwärmt sich der NiTi-Draht aufgrund der Joule´schen Erwärmung. Durch den einsetzenden Phasenübergang von Martensit zu Austenit zieht sich der NiTi-Draht zusammen und übt eine Kraft an den Einspannstellen der Stege aus. Dies führt zur Verformung des Balkens, dessen Durchbiegung durch die Dehnungsmessstreifen gemessen wird. Der Balken verformt sich solange, wie ein Phasenübergang aufgrund Joule´scher Erwärmung im NiTi-Draht stattfindet. Erfolgt keine weitere Erhöhung der Joule´schen Erwärmung bzw. ist die erzeugte Kraft im Draht so groß, dass kein weiteres Austenit mehr gebildet wird, stagniert die Verformung des Balkens. Ist die maximale Verformung erreicht, so wird die Stromstärke verringert, dadurch sinkt die Temperatur des NiTi-Drahtes und der Draht verlängert sich auf seine Einbaulänge von 80mm. Dabei nimmt der Balken wieder seine gerade Form an.

3.3.4 Balkentheorie



F - wirkende Kraft

a, b, c, l - Abstände der einzelnen Punkte

h - Höhe des eingespannten Drahtes an den Stegen

x_1, x_2, x_3 - Freischneidungen

$w(0)$, $w(l)$ - Durchbiegung an der Stelle 0 bzw. l

Abbildung 3.7: Biegebalken mit Freischnitt an den Positionen 1, 2 und 3

Die Abbildung 3.7 zeigt das Biegebalkenproblem des in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Versuchsmodells. Allgemein gilt der Hooke´sche Ansatz in Gleichung (3.3) für einen statisch bestimmten Balken ohne Sprünge.

$$E \cdot I \cdot w''(x) = M(x) \tag{3.3}$$

Der hier vorgestellte Biegebalken weist zwei Sprünge auf, daher wird der Balken in 3 Bereiche unterteilt, um die Gleichungen für die Berechnung des Biegemoments $w''(\mathrm{x})$, des Biegewinkels $w'(\mathrm{x})$ und der Durchbiegung $w(\mathrm{x})$ zu bestimmen. Diese werden in der Tabelle 3.1 gezeigt.

Tabelle 3.1: Bestimmung der Biegebalkengleichungen

Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3
$w_1''(x) = 0$	$w_2''(x) = \frac{M_o}{E \cdot I}$	$w_3''(x) = 0$
$w_1'(x) = A_1$	$w_2'(x) = \frac{M_o}{E \cdot I} x + A_2$	$w_3'(x) = A_3$
$w_1(x) = A_1 \cdot x + B_1$	$w_2(x) = \frac{M_o}{2E \cdot I} x^2 + A_2 \cdot x + B_2$	$w_3(x) = A_3 \cdot x + B_3$

(3.4)

Aufgrund der wirkenden Kräfte im Bereich 2 liegt hier ein Biegemoment vor. In den Bereichen 1 und 3 ist das Biegemoment Null.

Für die ermittelten Gleichungen in Tabelle 3.1 ergeben sich 6 Konstanten, für die 6 Rand- und Übergangsbedingungen benötigt werden. Diese lauten:

1) $w_1(0) = 0$

2) $w_1(a) = w_2(b)$

3) $w_1'(a) = w_2'(b)$

4) $w_2(b) = w_3(b)$

5) $w_2'(a) = w_3'(b)$

6) $w_3(l) = 0$

(3.5)

Aus diesen Rand- und Übergangsbedingungen lassen sich nun die Konstanten bestimmen, die wie folgt lauten:

$$
\begin{aligned}
A_1 &= -\frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I \cdot l}(a^2 - b^2) + \frac{M_o}{E \cdot I}(a - b) \\
A_2 &= -\frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I \cdot l}(a^2 - b^2) - \frac{M_o}{E \cdot I}b \\
A_3 &= -\frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I \cdot l}(a^2 - b^2) \\
B_1 &= 0 \\
B_2 &= \frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I}a^2 \\
B_3 &= \frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I}(a^2 - b^2)
\end{aligned}
\tag{3.6}
$$

Aus den ermittelten Gleichungen kann unter anderem die maximale Durchbiegung an der Stelle $^{l}/_{2}$ bestimmt werden. Diese wird später für die Beziehung der Durchbiegung des Balkens und der Deformation des Drahtes benötigt und ist in der Gleichung (3.7) definiert.

$$
w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{2}\frac{M_o}{E \cdot I}\left[\frac{l^2}{4} - \frac{1}{2}(a^2 - b^2) - b \cdot l + a^2\right] \tag{3.7}
$$

Ein weiterer benötigter Zusammenhang ist die Beziehung zwischen der wirkenden Kraft an den Stegen (Abbildung 3.7) und der Deformation des dort befestigten NiTi-Drahtes. Die Abbildung 3.8 zeigt die Methode zur Bestimmung dieses Zusammenhanges.

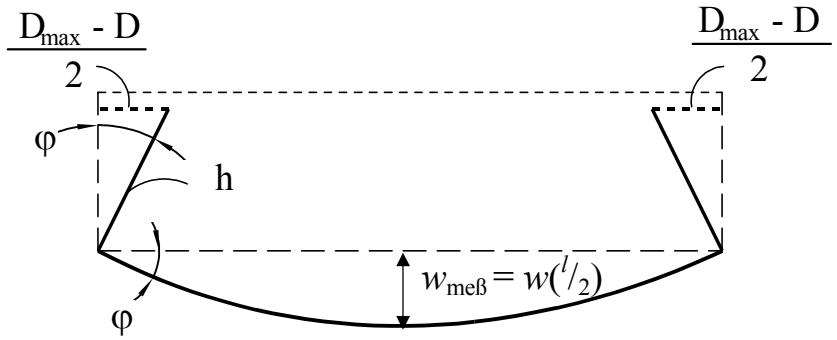


Abbildung 3.8: Biegebalken, gerade (gestrichelte Linie), gekrümmt (durchgezogene Linie)

D_{max} ist die maximal mögliche Dehnung des Drahtes und D ist die momentane Dehnung des Drahtes. Die Dehnung kann maximal 1,9mm betragen. Hat der Draht seine maximale Länge, ist die wirkende Kraft Null und der Balken nicht mehr gebogen (gestrichelte Linie). Wird der Draht beheizt, so kann dieser seine Dehnung bis auf 0mm zurückstellen. Die Durchbiegung w, der Biegewinkel φ und die wirkende Kraft des Balkens an der Stelle $^{l}/_{2}$ sind dann maximal (durchgezogene Linie).

Unter der Annahme, dass für kleine Winkel $\sin\xi \approx \xi$ gilt, lässt sich folgende Beziehung zwischen Kraft und Dehnung im Draht am Biegebalken herleiten (Gleichung (3.9).

$$\frac{D_{\max} - D}{2} = h \cdot \sin\varphi \approx h \cdot \varphi = -h \cdot w'(a) = -h \cdot A_1$$

$$\frac{D_{\max} - D}{2} = \frac{1}{2}\frac{M_o \cdot h}{E \cdot I \cdot l}(a^2 - b^2) - \frac{M_o \cdot h}{E \cdot I}(a - b)$$

$$M_o = \frac{(D_{\max} - D)E \cdot I}{\frac{h}{l}(a^2 - b^2) - 2h(a - b)} \;;\; M_o = F \cdot h \tag{3.8}$$

$$F = \frac{(D_{\max} - D)E \cdot I}{\frac{h^2}{l}(a^2 - b^2) - 2h^2(a - b)} \tag{3.9}$$

Für die formulierte Gleichung 3.8 erhält man mit den gegebenen Werten aus Kapitel 3.3.1 und der maximalen Dehnung D_{max} von 1,9mm die in Abbildung 3.9 dargestellte Kraft-Deformations-Kennlinie. Zusätzlich wird unter Berücksichtigung der Ausgangslänge des Drahtes die Dehnung in die Deformation umgerechnet.

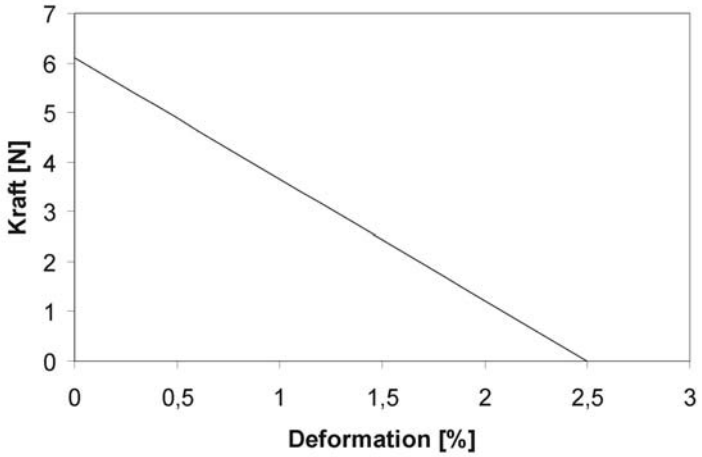


Abbildung 3.9: Kraft-Deformations-Kennlinie

Der Verlauf der Kraft-Deformations-Kennlinie in Abbildung 3.9 ist linear. Die maximal errechnete Kraft an den Stegen bzw. an den Enden des Drahtes beträgt 6,1N. Dies ist im Experiment der Fall, wenn sich aufgrund einer Temperaturerhöhung oberhalb von A_f der NiTi-Draht vollständig zusammenzieht und der Balken maximal gekrümmt ist. Bei Abkühlung des NiTi-Drahtes unterhalb von M_f verlängert sich dieser um 2,5%, wobei die Kraft den Wert Null erreicht und der Balken gerade ist.

Bei der Durchführung des Experiments am Biegebalken wird die Durchbiegung des Balkens in Abhängigkeit der Joule´schen Erwärmung des NiTi-Drahtes bestimmt. Das Widerstandsverhalten des NiTi-Drahtes wird aus dem Verhältnis von Spannung und Heizstrom ermittelt. Daraus lässt sich eine Widerstand-Durchbiegungs-Beziehung herleiten. Für einen Vergleich der Ergebnisse aus Kapitel 3.2 wird die Widerstand-Deformations-Abhängigkeit benötigt. Um diese zu erhalten, nimmt man die Gleichung (3.8) und setzt diese in Gleichung (3.7) ein. Man erhält Gleichung (3.10) und stellt diese nach der Dehnung (Gleichung (3.11)) um.

$$w\left(\frac{l}{2}\right)=\frac{1}{2}\frac{(D_{\max}-D)\cdot\left[\frac{l^2}{4}-\frac{1}{2}(a^2-b^2)-b\cdot l+a^2\right]}{\frac{h}{l}(a^2-b^2)-2h(a-b)} \tag{3.10}$$

$$D=\left[\frac{-8\frac{h}{l}(a^2-b^2)+16h(a-b)}{2a^2+2b^2-4bl+l^2}\right]\cdot w\left(\frac{l}{2}\right)+D_{\max} \tag{3.11}$$

Durch Einsetzen der konstanten Werte in Gleichung (3.11) aus Kapitel 3.3.1 erhält man die vereinfachte Gleichung (3.12) für die Bestimmung der Dehnung aus der gemessenen Biegung.

$$D=0{,}35\cdot w\left(\frac{l}{2}\right)+D_{\max} \quad ; \quad D_{\max}=1{,}9mm \tag{3.12}$$

Um die Deformation des Drahtes zu ermitteln, wird die Gleichung (3.12) genutzt und die errechneten Werte werden durch die Ausgangslänge l_0 des Drahtes ins Verhältnis gesetzt.

3.3.5 Resultate

Das in Abbildung 3.10 dargestellte Widerstand-Deformations-Diagramm zeigt das experimentelle Ergebnis des durchgeführten Versuchs am Biegebalken.

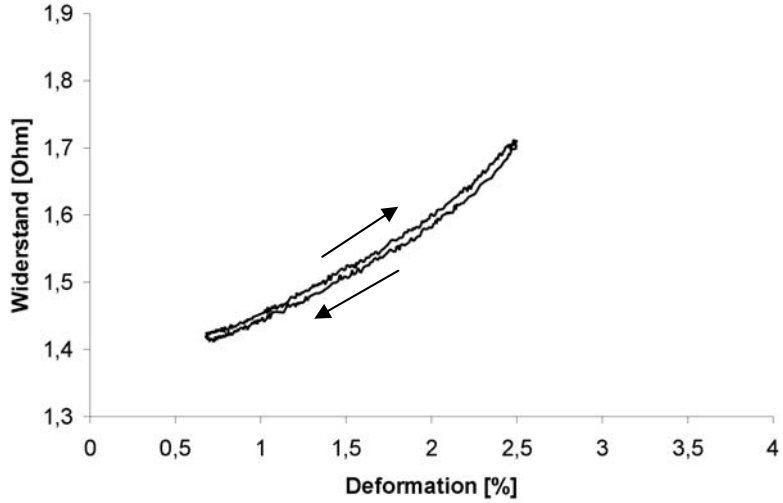


Abbildung 3.10: Gemessene Widerstand-Deformations-Kennlinie

Die Abbildung zeigt eine gekrümmte Kennlinie, welche auf die sich ändernden Lasten zurückzuführen ist. Ist der Balken gerade, so hat der NiTi-Draht seine maximale Deformation von 2,5% und einen ohmschen Widerstand von 1,71Ohm. An diesem Punkt fließt kein Strom durch den NiTi-Draht und die Temperatur des Drahtes liegt unterhalb von M_f. Der NiTi-Draht ist vollständig martensitisch. Wird die Temperatur erhöht und erreicht diese A_s, so zieht sich der NiTi-Draht aufgrund des Phasenüberganges von Martensit zu Austenit zusammen. Der NiTi-Draht kann im Experiment seine Deformation bis auf 0,6% zurückstellen. Dabei verringert er seinen Widerstand auf 1,41Ohm. Den beschriebenen Verlauf zeigt die untere Kurve in Abbildung 3.10. Eine weitere Rückstellung der Deformation ist trotz einer Temperaturerhöhung nicht möglich, da die erzeugte innere mechanische Spannung im NiTi-Draht zu groß ist, um weiteres Austenit aus dem Martensit zu bilden.

Die obere Kurve in der Abbildung 3.10 zeigt die Widerstand-Deformations-Kennlinie bei Verringerung der Joule´schen Erwärmung des NiTi-Drahtes. Sinkt dessen Temperatur unter M_s, so vergrößert sich die Deformation des NiTi-Drahtes und sein Widerstand erhöht sich. Die Kurve endet wieder im Anfangspunkt der Messung. Es ist eine kleine Hysterese festzustellen, die auf das Formgedächtnisverhalten zurückzuführen ist.

Aus den Messdaten der Widerstand-Deformations-Kennlinien der Abbildung 3.4 für verschiedene Lasten und der errechneten Kraft-Deformations-Kennlinie aus Abbildung 3.9 ist es möglich, eine Widerstand-Deformations-Kennlinie für veränderliche Lasten am Biegebalken zu konstruieren. Dazu wird die zu der Kraft im Kraft-Deformations-Diagramm der Abbildung 3.9 dazugehörige Deformation bestimmt. Mit dem Wert der Deformation ist es möglich, im Widerstand-Deformations-Diagramm der Abbildung 3.4 auf der entsprechenden Lastkennlinie den Widerstand zu bestimmen. Tabelle 3.2 zeigt die ermittelten Werte und das dazu konstruierte Diagramm ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

Tabelle 3.2: Messwertbestimmung

Kraft [N]	Deformation [%]	Widerstand [Ohm]
0	2,50	1,71
1	2,09	1,61
2	1,68	1,54
3	1,27	1,48
4	0,86	1,43
5	0,45	1,40

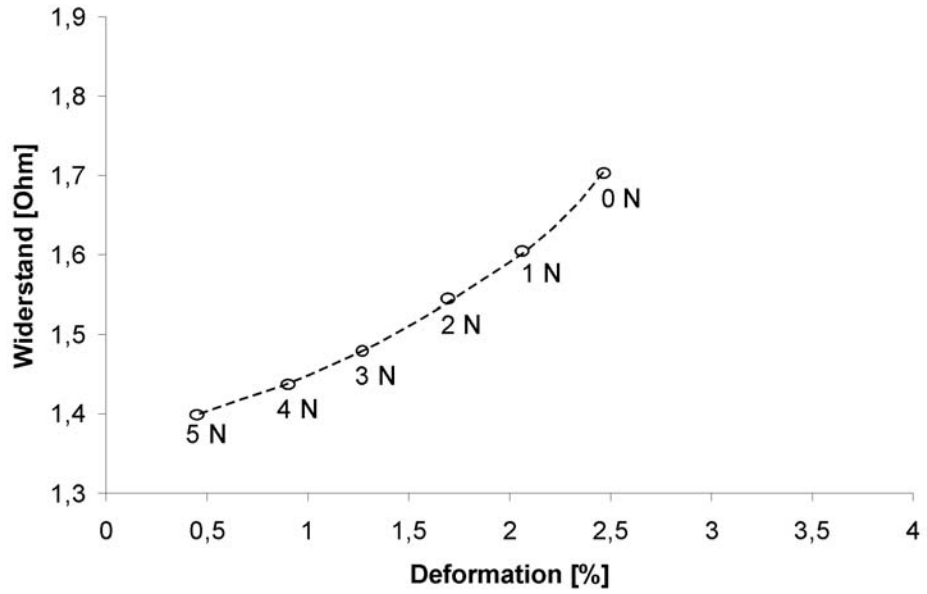


Abbildung 3.11: Ermittelte Messpunkte mit hineingelegter Widerstand-Deformations-Kennlinie

In Abbildung 3.11 sind die einzelnen Messpunkte mit einer hineingelegten Kurve verbunden. Der Verlauf der Kurve ist gekrümmt und stimmt qualitativ mit der Messkurve aus Abbildung 3.10 überein. Dies zeigt auch der direkte Vergleich in Abbildung 3.12. Die ermittelten Messpunkte liegen direkt auf der gemessenen Kurve. Der 5N Messpunkt wird von der gemessenen Kurve nicht mehr erreicht, da der NiTi-Draht im Experiment nicht in der Lage ist, seine Deformation weiter zurückzustellen. Daher ist in Abbildung 3.12 der weitere Verlauf gestrichelt eingezeichnet.

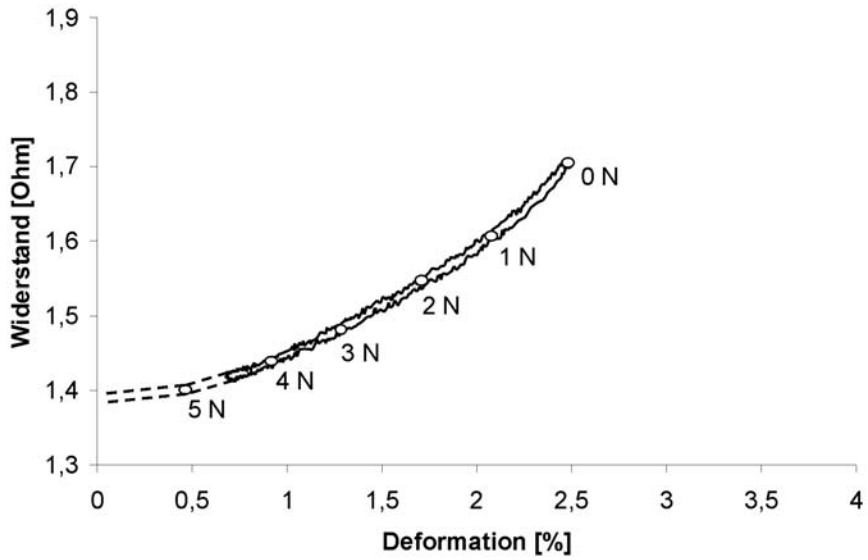


Abbildung 3.12: Ermittelte Messpunkte mit gemessener Widerstand-Deformations-Kennlinie

Der Wert der Widerstandsverringerung wird mit Abnahme der Deformation kleiner, da immer mehr Austenit gebildet wird und bei vollständiger Rückstellung der NiTi-Draht vollständig austenitisch ist.

Um die Verformung des Biegeträgers zu bestimmen, ist es möglich, anhand der qualitativen Übereinstimmung der beiden Kurven auf den Einsatz von Dehnungsmessstreifen zu verzichten. Für die Bestimmung der Durchbiegung ist lediglich die Kenntnis über das Verhalten des NiTi-Drahtes aus Kapitel 3.2.4 und der Mechanik aus 3.3.4 nötig. Aus dieser Kenntnis lässt sich ohne Hilfe einer zusätzlichen Sensorik, wie z.B. einem Dehnungsmessstreifen, direkt ein Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Widerstand herstellen. Dieser ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

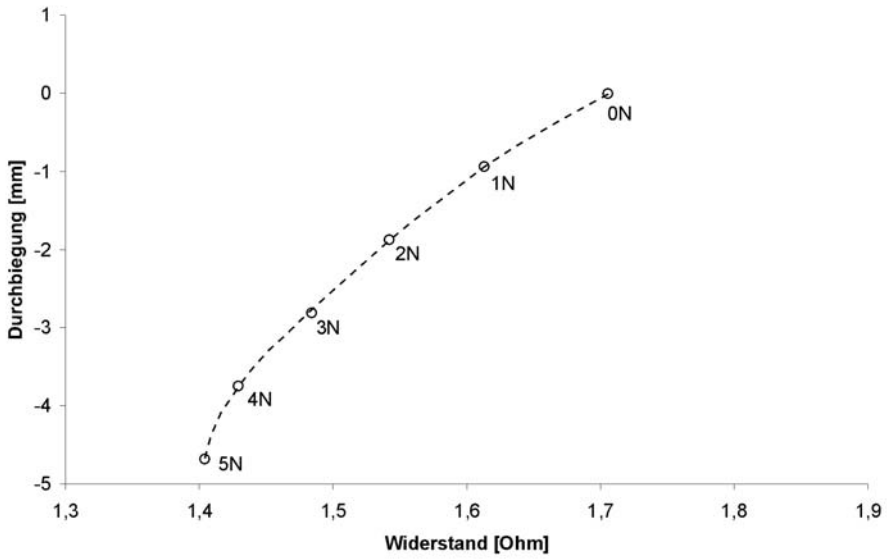


Abbildung 3.13: Ermittelte Messpunkte mit durchgelegter Durchbiegungs-Widerstand-Kennlinie

3.3.6 Zusammenfassung

Die in Kapitel 3.3 gewonnen Kenntnisse zeigen, dass es trotz einer veränderlichen Last im Versuchsaufbau und unter Nutzung der Mechanik möglich ist, den Formgedächtnisdraht aus NiTi sowohl als Aktor als auch als Sensor zu benutzen. Der Vorteil liegt darin, dass keine Sensoren und zusätzlichen Leitungen nötig sind, um Informationen über die Verformung des Biegebalkens zu erhalten. Lediglich das Widerstandsverhalten des Formgedächtnisdrahtes reicht aus, um die Durchbiegung des Balkens zu bestimmen. D.h. beim Einstellen eines bestimmten Widerstandswertes ist es möglich, eine definierte Deformation des NiTi-Drahtes und somit einen eindeutigen Durchbiegungswert zu erhalten. Anhand dieses Versuchsmodells wird deutlich, dass auch andere Konstruktionen möglich sind, bei denen es darum geht, mit den Formgedächtnislegierungen ein intelligentes Aktor-Sensor-System zu kreieren und ein Regelsystem aufzubauen.

3.4 Kühlung von Formgedächtnislegierungen durch Peltierelemente

3.4.1 Vorbetrachtung

Formgedächtnislegierungen zu erwärmen, stellt technisch kein Problem dar, sei es z.B. in einem Wärmebad, durch erwärmte Luft oder elektrisch, durch die Joule´sche Erwärmung. Der damit verbundene Phasenübergang und somit die Reaktionszeit des Formgedächtnismaterials kann im Bereich von Millisekunden liegen.

Ein Hauptproblem der Formgedächtnislegierung ist der langsame Wärmeabtransport aus dem zuvor erwärmten Material, um so möglichst geringe Abkühlreaktionszeiten zu erzielen. Abbildung 3.14 zeigt das Problem mit und ohne Anblasung eines NiTi-Drahtes. Als Versuchsobjekt wird ein NiTi-Draht mit einem Durchmesser von 1mm und einer Länge von 100mm eingesetzt. Die Übergangstemperaturen des Phasenüberganges von Martensit zu Austenit liegen zwischen 90°C und 100°C, die des Überganges von Austenit zu Martensit zwischen 70°C und 60°C. Der Versuch wird bei einer Raumtemperatur von 22°C durchgeführt. Das Anblasen erfolgt nur in der Abkühlphase des zweiten Versuchs. Die Geschwindigkeit der Luftströmung liegt bei 5km/h.

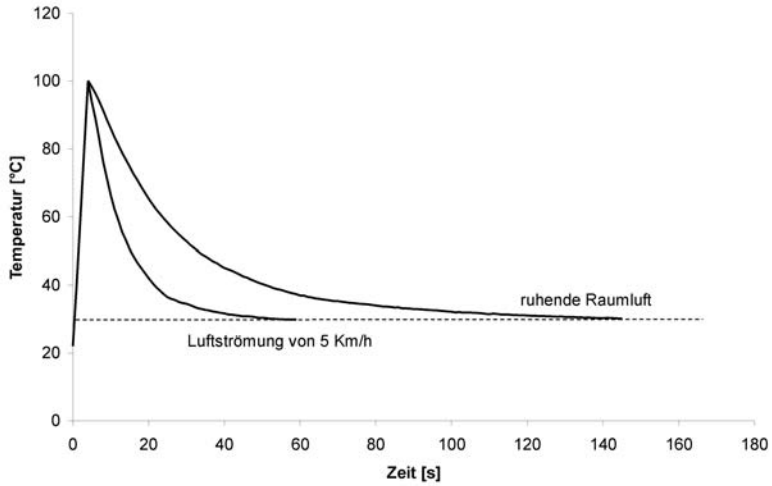


Abbildung 3.14: Heiz- und Abkühlverhalten eines NiTi-Drahts bei einer Raumtemperatur von 22°C

Der Draht wird in beiden Versuchen mit 20 Watt elektrisch beheizt und erreicht in 3 Sekunden eine Temperatur von 100°C. Nach Erreichen der 100°C wird der Strom ausgeschaltet und der NiTi-Draht kann abkühlen. Bei der Versuchsdurchführung ohne Anblasung liegt die Abkühlzeit bis zum Erreichen einer Drahttemperatur von 30°C bei ca. 140 Sekunden. Wird bei der Abkühlung hingegen der Draht mit Luft angebla-

sen, so verringert sich die Abkühlzeit bis zum Erreichen einer Drahttemperatur von 30°C um 80 Sekunden, d.h. die Abkühlung erfolgt 2,3-fach schneller.

Durch die Benutzung anderer Abkühlmedien, z.B. ein Fluid wie Wasser oder Öl, können schnelle Abkühlzeiten erreicht werden, da der Wärmeübergangskoeffizient zwischen NiTi-Draht und Fluid größer ist und das Fluid die Wärme besser abtransportiert. Hier liegen die erreichbaren Zyklen im 2Hz-Bereich [3]. Für die Erwärmung des Drahtes muss dann aufgrund des besseren Wärmeabtransportes als bei Luft eine höhere Leistung aufgebracht werden.

Meist erfolgt der abkühlende Prozess durch Wärmekonvektion in Luft, da so ein höheres Gewicht und ein größerer Bauraum in den jeweiligen Anwendungen vermieden werden. Dies bedeutet aber, wie in Abbildung 3.14 gezeigt, verhältnismäßig kleine Abkühlraten, die außerdem nicht gesteuert werden können. Eine Möglichkeit, den NiTi-Draht schnell und kontrolliert abzukühlen, ist der Einsatz von Peltierelementen, insbesondere wegen ihrer Steuerbarkeit. Außerdem können die Formgedächtnislegierungen leicht in die Peltierelemente integriert werden. Die Ergebnisse des Zusammenspiels beider elektrisch steuerbaren Elemente werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

3.4.2 Peltierelemente

Peltierelemente sind Halbleiterbauteile und nutzen den Peltier-Effekt aus, dieser Effekt geht aus dem Seebeck-Effekt hervor. Diese Effekte sind im Allgemeinen bekannt und ausführlich in der Literatur [4, 5] beschrieben. Sie werden daher hier nur kurz behandelt.

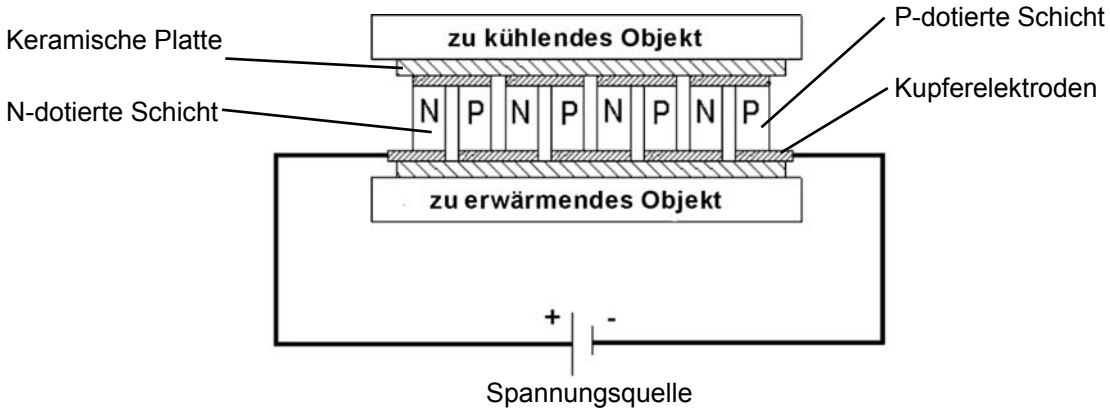


Abbildung 3.15: Schematische Darstellung eines Peltierelements

Der Peltier-Effekt ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Er besteht darin, dass der durch einen Körper fließende Strom zu einer Temperaturdifferenz führt, welcher zur Kühlung oder Erwärmung genutzt werden kann. Das Peltierelement ist daher eine Wärmepumpe, die keine Wärme vernichtet, sondern die Wärme von einer Seite zur anderen transportiert. Solch ein Körper, der in Abbildung 3.15 dargestellt ist, besteht aus mehreren in Reihe angeordneten Elementen, die aus P- und N-dotierten Schichten aufgebaut sind. Diese Elemente sind über Kupferelektroden verbunden und zwischen keramischen Platten angeordnet. Dies sorgt für hohe mechanische Stabilität, gute elektrische Isolation und gewährleistet besten thermischen Kontakt zum zu kühlenden Objekt. Wird eine Gleichspannung angelegt, so kühlt sich die eine Seite des Elements ab und die andere erwärmt sich.

Die Verwendung von Peltierelementen zur Kühlung von Formgedächtnislegierungen ist ein relativ neues Gebiet für thermo-elektrische Anwendungen. Beispiele für solche Anwendungen sind bei Shahin et al. [6] und Bhattacharya et al. [7] zu finden. Sie verwenden entweder speziell gefertigte röhrenartige Peltierelemente für runde Drähte aus Formgedächtnislegierungen oder sie integrieren die Formgedächtnislegierung zwischen den Peltierelementen. Solche Designs haben einige Nachteile: So können

bei den röhrenartigen Peltierelementen die Standard-Peltierelemente nicht verwendet werden. Bezüglich des integrierten Designs liegt das Problem in der Inkompatibilität der Kontaktflächen zwischen Formgedächtnismaterial und Halbleiter, da das Formgedächtnismaterial bei der Transformation große Dehnungen ausführt (typische Änderungen liegen bei 5%). Außerdem ist die Möglichkeit der Flexibilität des Formgedächtnisdrahtes nicht mehr gegeben.

Daher beschreibt das Kapitel 3.4.3 ein Aktorsystem aus Peltierelementen und Formgedächtnisband, welches die genannten Nachteile vermeidet.

3.4.3 Beschreibung der Aktorkomponenten und der Messerfassungsgeräte

Formgedächtnismaterial

Für die Untersuchung wurde ein Formgedächtnislegierungsband aus NiTiCu eingesetzt, da die Verwendung eines flachen rechteckigen Querschnittes die Oberfläche gegenüber der Nutzung eines runden Drahtes mit gleichem Querschnitt vergrößert. Dadurch wird ein besserer Wärmübergang erreicht [8].

Die Spezifikation des Bandes lautet wie folgt:

Breite	=	0,7	mm
Höhe	=	0,1	mm
Länge	=	50	mm
Martensit start	=	50	°C
Martensit finish	=	45	°C
Austenit start	=	60	°C
Austenit finish	=	65	°C

Durch die Zufügung von Kupfer in die NiTi-Legierung wird die Hysteresenbreite reduziert und somit der Bereich der Phasenumwandlung verkleinert, was zusätzlich zu einer Verkürzung der Heiz- und Abkühlzeit führt.

Peltierelemente

Die Auslegung der Peltierelemente wurde in [8] ausführlich beschrieben, so dass in diesem Abschnitt nur auf die technische Realisierung der ermittelten Parameter eingegangen wird.

Bei den eingesetzten Peltierelementen handelt es sich um Standard-Peltierelemente des Typs 1MC06-008-15M, welche in Abbildung 3.16 schematisch dargestellt sind.

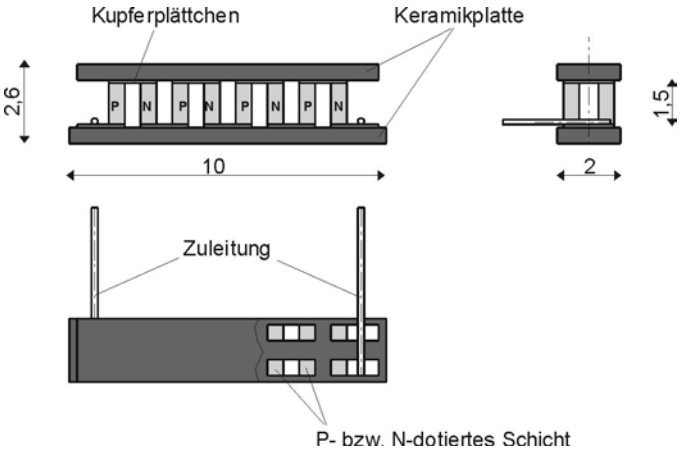


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung der eingesetzten Peltierelemente

Das Peltierelement besteht aus zwei Reihen von je 8 Beinen mit P- und N-dotierten Schichten. Diese sind durch Kupferplättchen verbunden und an den jeweiligen Enden befindet sich jeweils eine Zuleitung für die Stromversorgung. Auf der Ober- und Unterseite ist zur besseren Stabilität und zur Isolierung eine Platte aus Keramik aufgeklebt.

Beim Einsatz mit dem Formgedächtnismaterial werden die Peltierelemente, wie in Abbildung 3.17 dargestellt, zu einem Modul aus zwei Elementen zusammengefügt. Bevor die beiden Peltierelemente verbunden werden, wird jeweils längsseits auf einer Seite der Keramikplatte in der Mitte eine Nut mit einer Tiefe von 0,06mm und einer Breite von 0,8mm eingefräst. In diesem so entstandenen Kanal soll später das NiTiCu-Band gekühlt werden. Zusätzlich werden zur besseren Wärmeabgabe die äußeren Keramikplatten mit einem Kupferdraht von 0,15mm Durchmesser spiralförmig umwickelt und verlötet. Die Abbildung 3.17 zeigt neben der schematischen Darstellung das Foto eines fertigen Moduls.

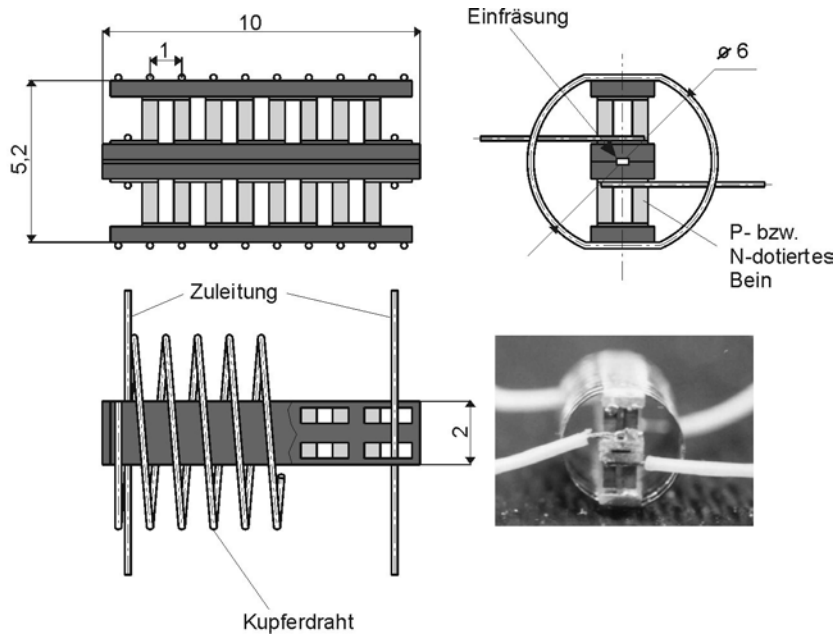


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung und Foto eines Peltiermoduls

Damit ein längeres NiTiCu-Band untersucht werden kann, werden fünf solcher angefertigten Module aus Abbildung 3.17 in Reihe geschaltet und die Zuleitungen entsprechend miteinander verbunden. Die so angefertigte Modulkette ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Die Stromzufuhr erfolgt über die rechte Seite und wird an der linken Seite vom oberen Peltierelement zum darunterliegenden Peltierelement geschleift, so dass der Strom die einzelnen Peltierelemente in Reihe durchfließt. Die einzelnen Module sind flexibel miteinander verbunden; auf diese Weise ist eine Biegung des Bandes möglich.

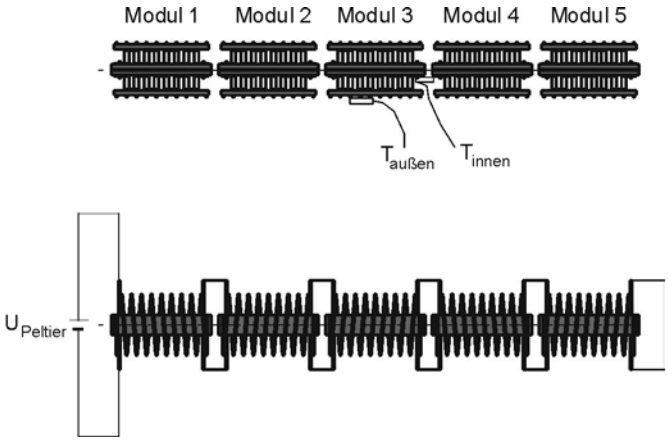


Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Modulkette

Zur Temperaturbestimmung wird an die innen- und außenliegende Keramikplatte jeweils ein Thermoelement angebracht. Die so entstandene flexible Modulkette ist in Abbildung 3.19 dargestellt. In diesen Bildern sieht man die miteinander verbundenen Zuleitungen, die angebrachten Thermoelemente und das schon eingefädelte NiTiCu-Band.

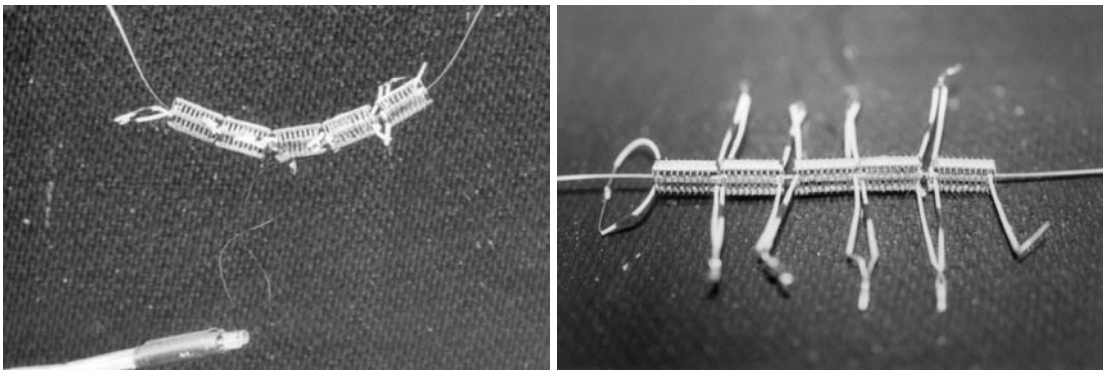


Abbildung 3.19: Flexible Modulkette aus Peltierelementen

Thermoelement mit Messdatenwandler

Zum Einsatz kommen zwei Thermoelemente des Typs K (NiCr-Ni), von denen, wie in Abbildung 3.18 gezeigt, das erste an der inneren und das zweite an der äußeren Keramikplatte befestigt ist. Der Temperaturbereich der Thermoelemente liegt in einem möglichen Messbereich von –200°C bis +1372°C. Beide Thermoelemente werden zu einem Messwandler der Firma WSE des Typs PM137 geführt, der die gewandelten Messsignale an einen Computer übermittelt. Das PM137 ist ein universell einsetzbares Messgerät zur Erfassung analoger elektrischer Messgrößen verschiedener Typen von Thermoelementen. Die Messwertausgabe erfolgt über eine Anzeige oder ein Spannungsausgangssignal im Bereich von 0 bis 10V.

Halbleiterrelais

Zum Ein- und Ausschalten des Stromes sowohl bei den Peltierelementen als auch beim verwendeten NiTiCu-Band wird ein Halbleiterrelais des Herstellers CryDom (Typ D1D10) verwendet. Mit diesem Relais wird durch eine Steuerspannung, die von einem Computer bereitgestellt wird, ein zweiter Stromkreis gesteuert. Die verwendeten Relais sind für Schaltströme bis 10A und eine Schalterspannung bis 100V ausgelegt.

Induktiver Wegaufnehmer, Messverstärker, I/O-Multifunktionskarte, PC486

Die für diese Versuchsanordnung verwendeten messtechnischen Geräte sind in Kapitel 3.2.2 behandelt worden.

3.4.4 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wird die Versuchseinrichtung der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Messwanne ohne die Befüllung mit einem Fluid genutzt. Abbildung 3.20 zeigt die entsprechende Versuchsanordnung. Das Formgedächtnisband (10) aus NiTiCu ist auf der linken und rechten Seite in einem Halter (1) kraftschlüssig verspannt. Das Band ist zur Messwanne elektrisch isoliert, damit der Stromfluss nur über das NiTiCu-Band erfolgt. Der Halter auf der linken Seite ist fest und unbeweglich an der Messwanne befestigt. Dagegen ist der rechte Halter mit einer horizontal beweglichen Gleitstange (2) verbunden. Die Gleitstange wird in einem Gleitlager geführt. Dies ermöglicht eine nahezu reibungsfreie Bewegung. Diese Art der Führung verhindert zusätzlich alle Bewegungen der Gleitstange quer zur Belastungsrichtung und gewährleistet, dass an dem Formgedächtnisband nur Normalkräfte und keine Querkräfte bzw. Torsionsmomente angreifen. An der rechten Seite der Gleitstange, außerhalb der Messwanne, befindet sich der induktive Wegaufnehmer (3) zur Erfassung der Längenänderung des Bandes. Die Längenänderung wird über einen Messverstärker der Firma HBM an einen Computer (13) übermittelt und dort aufgezeichnet. Außerdem ist an der Gleitstange eine Drahtlitze befestigt, die über eine Umlenkrolle geführt wird und an der sich eine konstante Masse (9) von 0,981kg befindet. Sie übt durch ihre Gewichtskraft eine Kraft von 10N auf den Querschnitt des NiTiCu-Bandes aus. Zum elektrischen Erwärmen der Formgedächtnislegierung wird an den Enden des Bandes - über die Halter - das NiTiCu-Band an ein Netzgerät angeschlossen (Abbildung 3.20). Ein Halbleiterrelais (11), das über einen Computer gesteuert wird, übernimmt die Pulsung des Stromes im Band.

Die Kühlung des NiTiCu-Bandes erfolgt über die aneinander angeordneten Peltiermodule (7). Sie sind, wie in der Abbildung 3.20 gezeigt, in Reihe geschaltet und über die Anschlussklemmen (8) an eine Spannungsquelle angeschlossen. Der Stromfluss kann ebenfalls durch ein Halbleiterrelais und den angeschlossenen Computer gesteuert werden. Zur besseren Wärmeleitung zwischen den Peltierelementen und dem NiTiCu-Band wird Wärmeleitpaste verwendet. Die Temperatur der äußeren (6)

und der inneren (5) Keramikplatte der Peltierelemente wird jeweils durch ein Thermoelement gemessen und über einen Messdatenwandler an den Computer übermittelt. Alle Daten werden mit dem Messprogramm LabTechNotebook (Version 9) dargestellt und erfasst.

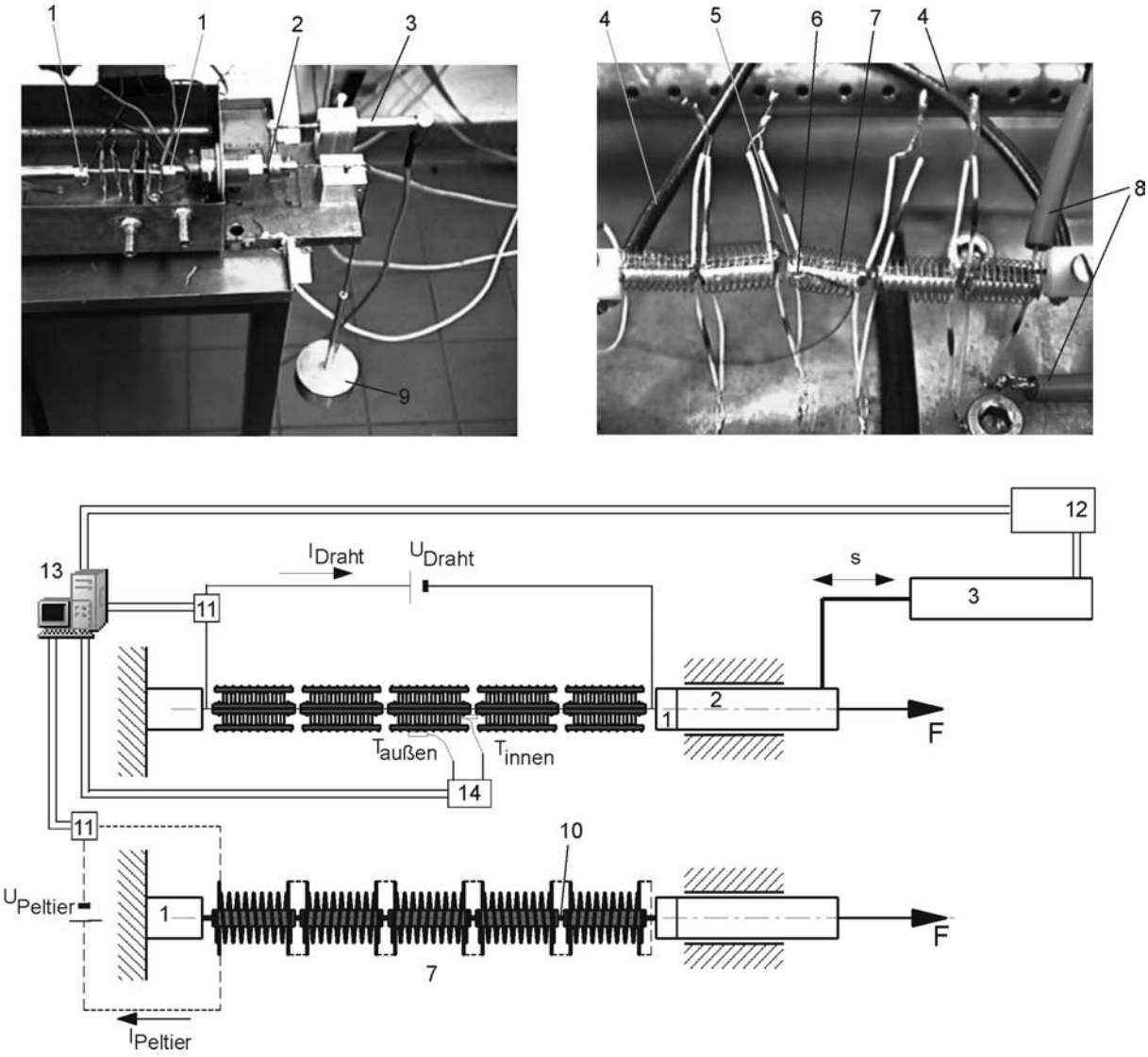


Abbildung 3.20: Versuchsanordnung zur Kühlung von Formgedächtnisdrähten mit Peltierelementen;
Großaufnahme des Versuchsstandes (links oben),
Detail der Peltiermodulkette (rechts oben)
Schematische Darstellung mit Ansicht von oben und von der Seite (unten)

3.4.5 Bestimmung des Arbeitspunktes der Peltierelemente

Zur optimalen Kühlung des NiTiCu-Bandes muss der Arbeitspunkt der Peltierelemente festgestellt werden. Dazu wird der zu kühlenden innenliegenden Keramikschicht eine veränderliche Heizleistung zugeführt. Als Heizelement wird ein schmaler Metallstreifen verwendet, der in den eingefrästen Kanal eingesetzt und elektrisch beheizt

wird. Die Bestimmung der Kennlinie erfolgt für 25°C und 28°C. Dazu wird der Strom schrittweise in den Peltierelementen erhöht und die Heizleistung in dem Metallstreifen so eingestellt, dass die geforderte Temperatur anliegt. In Abbildung 3.21 ist der Verlauf der so bestimmten Kurve für 25°C und 28°C bei einer Umgebungstemperatur von 20°C dargestellt. Die maximale Kühlleistung der Peltierelemente liegt bei einer zu haltenden Temperatur von 25°C bei 42mW und bei 28°C bei 73mW. Der Arbeitspunkt für beide Temperaturen liegt bei einem Strom von 0,3A.

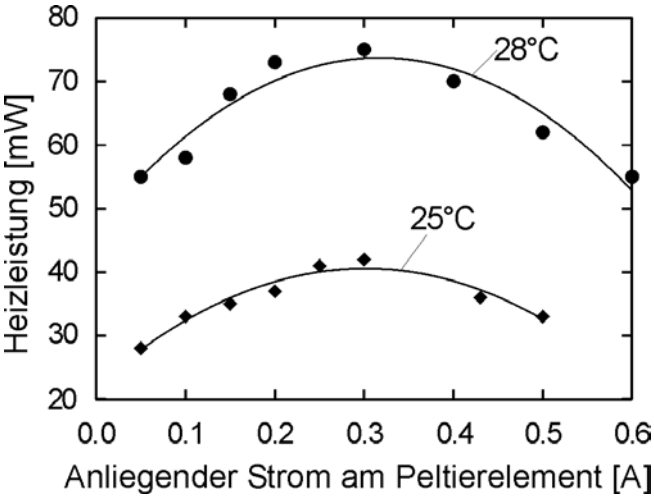


Abbildung 3.21: Abhängigkeit des Peltierstroms vom Heizstrom zum Halten einer Kühltemperatur von 25°C bzw. 28°C

Der Abfall der Kennlinie nach 0,3A und damit die Verringerung der Kühlleistung ist damit zu begründen, dass sich die Verlustleistungen (z.B. Joule´sche Erwärmung) erhöhen und abgeführt werden müssen. Außerdem macht sich der Einfluss der sich erwärmenden warmen Seite des Peltierelements durch Wärmestrahlung auf die kalte Seite bemerkbar. Eine Verbesserung der Kühlleistung wäre durch eine bessere Kühlblechkonfiguration erreichbar. Trotzdem sind die hier modifizierten Peltierelemente in der Lage, das NiTiCu-Band ausreichend zu kühlen. Für eine maximale Kühlleistung wird aufgrund der durchgeführten Untersuchung ein Strom von 0,3A für die Kühlung des NiTiCu-Bandes im Aktorsystem eingestellt.

3.4.6 Ablauf der Messung und experimentelle Ergebnisse

Es werden zwei verschiedene Untersuchungen zum Abkühlverhalten des NiTiCu-Bandes durchgeführt.

a) ohne Peltierelemente (passive Kühlung in Raumluft)

b) mit eingeschalteten Peltierelementen (aktive Kühlung)

In beiden Versuchen wird das Band periodisch für 0,4 Sekunden mit 7 Watt beheizt. Bei der ersten Versuchsreihe wird das Band, welches im Martensitgitter vorliegt, mit 10N belastet. Durch die wirkende Kraft wird eine günstig in Lastrichtung liegende Martensitvariante gebildet, was dazu führt, dass sich das Band bei einer Umgebungstemperatur von 25°C dehnt (Abbildung 3.22). Nach 5 Sekunden wird der Stromkreis erstmals durch das Halbleiterrelais geschlossen und die Joule´sche Erwärmung bewirkt, dass sich das Band in kurzer Zeit auf 75°C (obere Kurve in Abbildung 3.22) erwärmt. Durch die Temperaturerhöhung findet eine Phasenumwandlung von Martensit zu Austenit statt, dadurch zieht sich der Draht zusammen und verringert seine Dehnung (untere Kurve in Abbildung 3.22). Nach 0,4 Sekunden wird der Strom abgeschaltet. Die Temperatur im NiTiCu-Band sinkt in ca. 4,8 Sekunden auf 55°C. Während dieser Zeit verlängert sich das Band wieder auf seine ursprüngliche Länge. Aufgrund des langsamen Abkühlverhaltens des Bandes sind schnellere Taktzeiten nicht möglich.

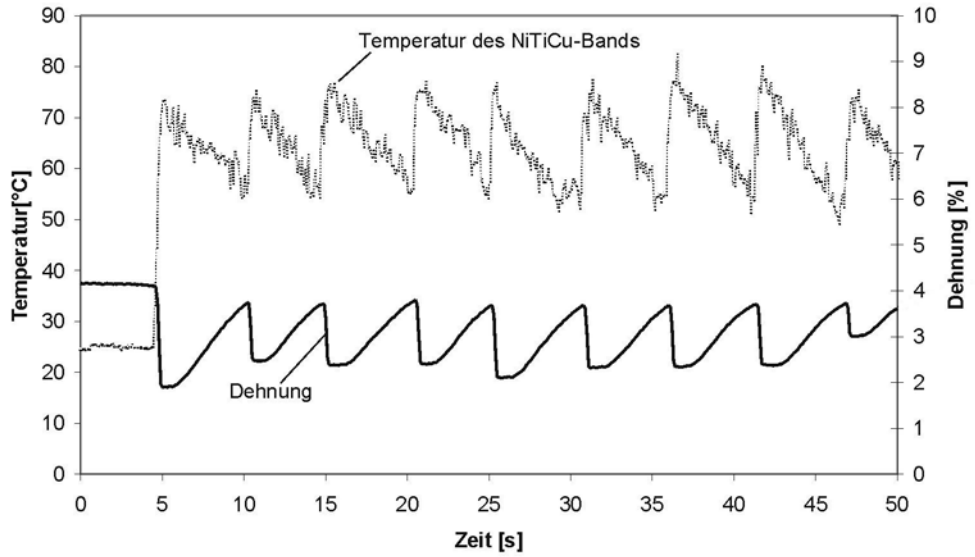


Abbildung 3.22: Verhalten des NiTiCu-Bandes bei periodischem Heizen in Luft

Im zweiten Versuch wird das Abkühlverhalten des NiTiCu-Bandes mit den zuvor beschriebenen Peltierelementen im stationären Betriebsmodus untersucht. Abbildung 3.23 zeigt das Verhalten des Bandes für den Fall des aktiven Kühlens mit dem ermittelten Strom von 0,3A. Die untere Kurve beschreibt das Dehnungsverhalten des NiTiCu-Bandes, während die oberen beiden Kurven die Temperatur der Peltierelemente an der Innenseite (kalte Seite) und der Außenseite (warme Seite) darstellen. Das Band wird ebenfalls mit 10N bei 25°C Umgebungstemperatur belastet, was zu einer Verlängerung des NiTiCu-Bandes führt. Nach 7 Sekunden werden die Peltierelemente aktiviert. Die Temperatur an der Innenseite sinkt und steigt an der Außenseite. Bei einer Zeit von 16 Sekunden wird das NiTiCu-Band zum ersten Mal für 0,4 Sekunden beheizt. Abgesehen von der Kontraktion des Bandes führt dies zu einer sofortigen steilen Temperaturerhöhung der innenliegenden Seite der Peltierelemente, während die Außenseite keine Temperaturänderung zeigt. Wird der Heizstrom im NiTiCu-Band ausgeschaltet, verringert sich die Temperatur der Innenseite. Die Peltierelemente beginnen jedoch, die erhöhte Energie der Innenseite zur Außenseite zu transportieren, was zu einem kontinuierlichen Temperaturanstieg der Außenseite führt. Die periodische Wiederholung der Heizzyklen führt zu einer reproduzierbaren Temperaturschwankung zwischen 40°C und 45°C für die Innenseite. Die Außenseite erreicht nach einigen Durchläufen eine stationäre Temperatur von 55°C.

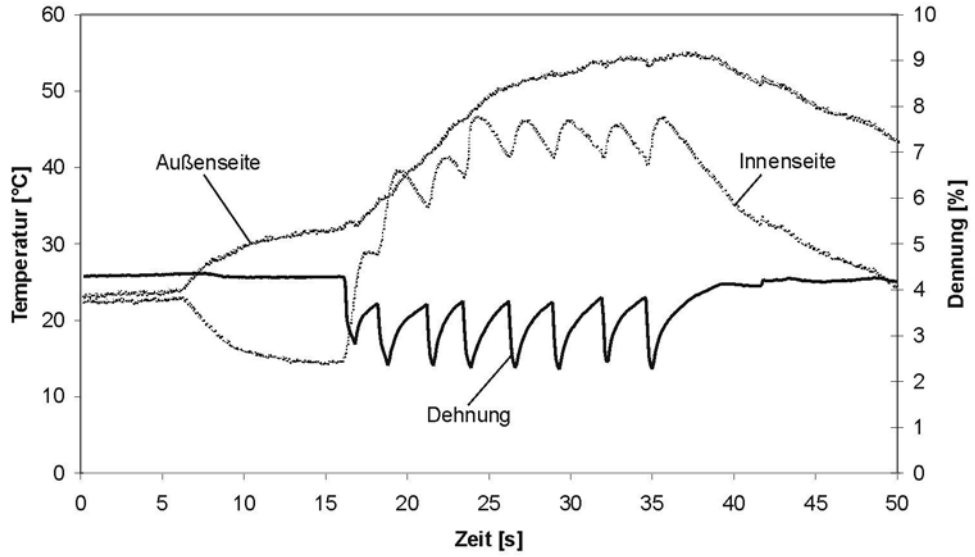


Abbildung 3.23: Verhalten des NiTiCu-Bandes bei periodischem Heizen mit aktiver Kühlung

Abbildung 3.24 (passive Kühlung) und Abbildung 3.25 (aktive Kühlung) zeigen einen vergrößerten Ausschnitt des Verhaltens der Dehnungsänderung des NiTiCu-Bandes

aus Abbildung 3.22 und Abbildung 3.23. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Dehnungsänderungen beim Heizen identisch ist. Bei beiden Untersuchungen verkürzt sich die Dehnung linear von 3,7% auf 2,3%, um also 1,4% in 0,4 Sekunden. Daraus ist zu folgern, dass die Umhüllung durch die Peltierelemente keinen Einfluss auf die Dehnungsänderung beim Heizen hat, da der Heizimpuls nur kurz erfolgt ist, bevor sich die Wärmeleitung bemerkbar macht. Hingegen zeigen die Dehnungskurven bei der Abkühlung ein unterschiedliches Verhalten. Mit Hilfe der Peltierelemente ist eine Halbierung der Abkühlzeit zu realisieren. Somit ist mit der Peltierkühlung ein Schaltrhythmus von ca. 2,9 Sekunden bei einer Dehnungsänderung von 1,4% realisierbar. Bei der passiven Abkühlungsuntersuchung liegt der mögliche Schaltrhythmus hingegen bei 4,8 Sekunden.

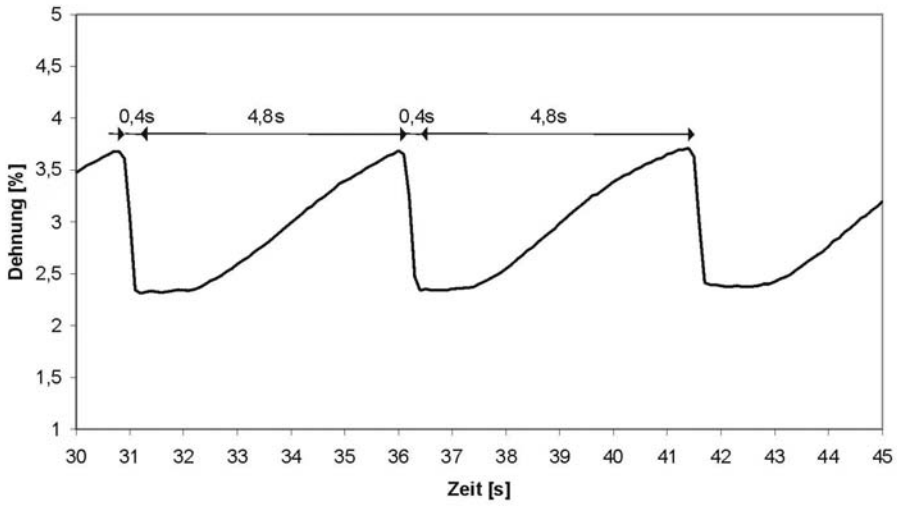


Abbildung 3.24: Zoom auf die Dehnungsänderung bei passiver Kühlung durch Luft

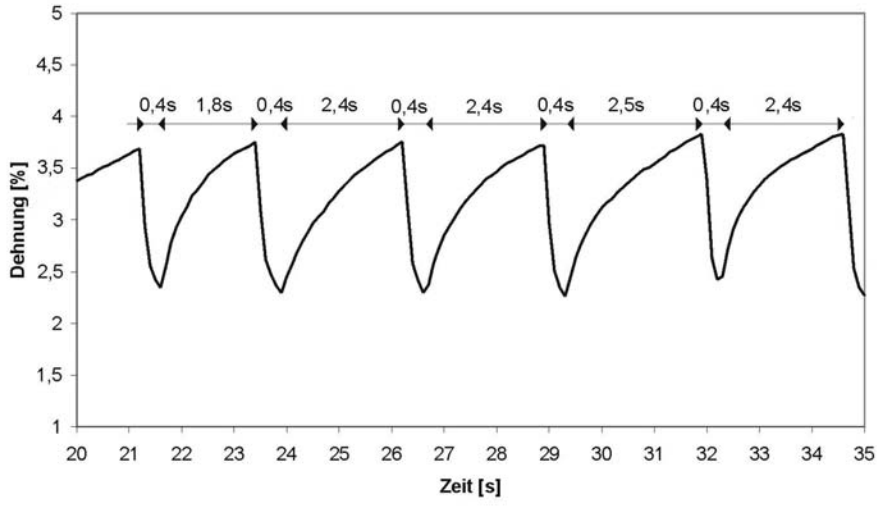


Abbildung 3.25: Zoom auf die Dehnungsänderung bei aktiver Kühlung durch Peltierelemente

3.4.7 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Die Messergebnisse zeigen einen ersten Erfolg und das Potential des Einsatzes von Peltierelementen zur Kühlung von Formgedächtnislegierungen. Die Leistungsfähigkeit der Peltierelemente ist aber noch steigerbar und somit eine weitere Reduzierung der Abkühlzeit möglich. Der Einsatz besserer Kühlbleche zur Ableitung der Wärme nach außen würde den entscheidenden Impuls liefern. Hierbei ist zu beachten, dass diese baulichen Veränderungen im Verhältnis zum eigentlichen Nutzen des Einsatzes der Formgedächtnislegierungen - Gewichts- und Bauraumreduzierung - stehen sollten. Erwärmt sich die Außenseite zu stark, wie im beschriebenen Versuch, so erfolgt eine Wärmeleitung entgegengesetzt zum Wärmeabbau des Peltier-Effekts. Diese Wärmeleitung hat zur Folge, dass die angestrebten 25°C zur Kühlung um 20°C überschritten werden. Ist hingegen die Temperatur der Außenseite und somit auch der Innenseite noch klein, wie am Anfang des Versuches, liegt die Abkühlzeit unter 2,4 Sekunden (Abbildung 3.25; t=21,5s ... 23,3s). Die Abkühlrate kann durch eine verbesserte Wärmeabgabe an die Umgebung, wie theoretisch in [8] ermittelt, auf 1 Sekunde verringert werden.

Die Möglichkeit der Temperaturabsenkung der Außenseite durch eine vorübergehende Nutzung der Peltierelemente als Wärmepumpe zur Beheizung des NiTiCu-Bandes ist aufgrund der viel höheren Reaktionszeit der Peltierelemente kontraproduktiv und würde zu einer Vergrößerung der Heizrate führen. Daher sind die Beheizung des NiTiCu-Bandes durch Pulsung und die ununterbrochene Benutzung der Peltierelemente als Kältepumpe die besten Lösungen.

Die entwickelte „Sandwichbauweise“ - Verbindung zweier Peltierelemente zu einem Modul mit einem innenliegenden Schlitz - und die Aneinanderreihung der einzelnen Module tragen zur Verformbarkeit und Beweglichkeit des Aktorpakets bei. Die Untersuchung zeigt, dass der Einsatz von Peltierelementen zum Abkühlen von Formgedächtnislegierungen in so genannten intelligenten adaptiven Strukturen möglich ist.

4 Anwendung der Formgedächtnislegierungen in adaptiven Strukturen

Anhand von zwei Beispielen - dem „Adaptiven Tragflügel“ und dem „Adaptiven Winglet“ - soll der Einsatz von Formgedächtnislegierungen in flexiblen Strukturen beschrieben werden. Die Entscheidung fiel auf diese beiden Anwendungen, da Strömungsprofile von Flugzeugen im Wesentlichen starre Flächen sind. Diese Profile besitzen zwar Ruder zur Kontrolle von Auftrieb, Widerstand und Moment, aber diese selbst sind wiederum starre Elemente. Dagegen hat die Evolution mit den Schwingen des Vogels ein adaptives „Bauteil“ entwickelt, mit dem der Vogel durch Veränderung der Flügelform seine Flugbedingungen optimieren kann. Die zwischen der konventionellen Flugzeuglösung und dem feingliedrigen Vogelflügel klaffende Lücke soll durch den Einsatz von adaptiven Strukturen verringert werden.

Allein durch aerodynamische Maßnahmen sind in den nächsten 20 Jahren Kraftstoffeinsparungen von bis zu 36% [10] zu erwarten. Bereits jetzt sind zahlreiche Aktivitäten auf diesem Gebiet zu verzeichnen, beispielsweise im Rahmen des Leitkonzepts Adaptiver Flügel (ADIF) [11]. Hier werden Teile des Flügels kommender Airbusgenerationen als adaptive Strukturen ausgelegt.

Der adaptive Tragflügel entstand als praktische Ausführung zu dem theoretischen Projekt „Echtzeit-Optimierung großer Systeme“ der DFG. Dieses beinhaltete die Entwicklung von Algorithmen, mit denen unter Echtzeitbedingungen eine optimale Ansteuerung für die Formgedächtnisdrähte berechnet werden kann.

Die Algorithmen basieren auf einer geeigneten Modellbildung des nichtlinearen, hysteretischen Materialverhaltens der Formgedächtnislegierungen. Das Modell wird anschließend in einen Optimalsteuerungscode integriert, mit dem in Abhängigkeit mehrerer Zielfunktionale jeweils optimale Heizfunktionen für die einzelnen Drähte berechnet werden. In einer Erweiterung wurde aus diesem Verfahren eine echtzeitfähige Variante entwickelt, die in der Lage ist, eine optimale Steuerung im Nanosekundenbereich zu berechnen [47].

Das adaptive Winglet ist die Fortführung der praktischen Ergebnisse aus dem adaptiven Tragflügel. Beide ausgewählten Modelle sollen die Einfachheit der Bauweise und das Leistungsvermögen des Einsatzes von Formgedächtnislegierungen zeigen.

Dabei ist bei der Regelung ein besonders gelungenes und effektives Konzept genutzt worden.

Die erfolgreichen Untersuchungen in Kapitel 3 konnten nicht in die Modelle übernommen werden. Einerseits erwies sich die Verwendung der Peltierelemente für diese Anwendung als problematisch, da das Gewicht der Modelle erheblich zunahm. Andererseits stand für den Einbau der Peltierelemente nicht genügend Bauraum zur Verfügung. Auch konnte die Messwerterfassung des Widerstandes der Formgedächtnislegierungen nicht erfolgen, da die Widerstandsänderungen sehr klein sind. Außerdem sind durch die dynamischen Bewegungen der beiden Modelle die Schwankungen der Messwerte zu groß und die Auflösung der Messkarte genügte nicht den Anforderungen.

4.1 Allgemeines zur Regelung

4.1.1 Bedeutung der Regelungstechnik

Allerorts, wo es auf die genaue Einhaltung von Prozessbedingungen ankommt, ist es erforderlich, den Prozess zu beobachten, Abweichungen von einem geforderten Verhalten zu registrieren und in geeigneter Art und Weise auf diese Abweichungen zu reagieren, so dass sich das geforderte Verhalten wieder einstellt. Zur Beobachtung müssen Signale gemessen werden, die das Systemverhalten beschreiben bzw. die Informationen über die herrschenden Zustände liefern (z.B. Temperatur, Druck, Stoffgrößen, u.a.). Der Vergleich des gemessenen mit dem geforderten Zustand sowie die geforderten Eingriffe können entweder von Menschen oder von Geräten vorgenommen werden. In beiden Fällen spricht man von Regelung. Sie ist gekennzeichnet durch die Schritte „Messen - Vergleichen – Stellen“ [50].

4.1.2 Der Regelkreis

Der Signalflussplan eines einfachen Regelkreises ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Regelstrecke ist der zu beeinflussende Teil der Anordnung und dient dazu, eine vorgegebene physikalische Regelgröße x(t) auf einen gewünschten Sollwert w(t) zu bringen und dort zu halten.

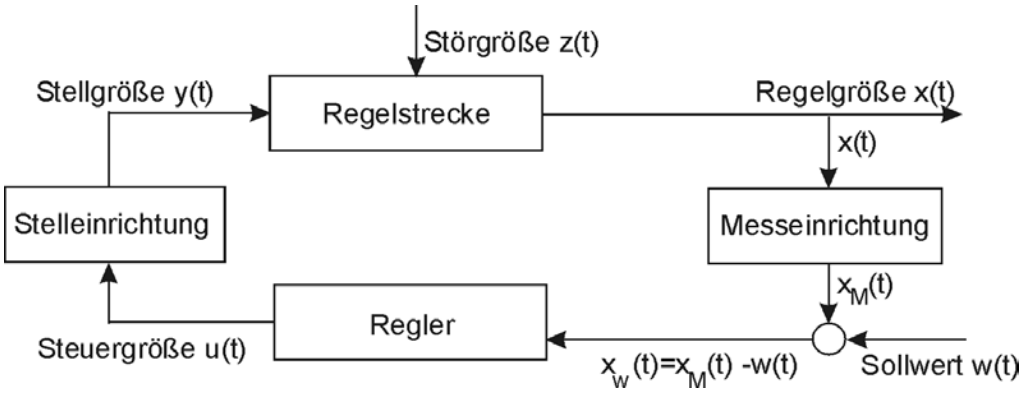


Abbildung 4.1: Regelkreis

Zur Realisierung der gestellten Aufgabe muss der Wert der Regelgröße durch eine Messeinrichtung gemessen werden. Der gemessene Wert $x_M(t)$ wird Istwert genannt. Dieser kann durch eine Störgröße z(t) beeinflusst werden. Tritt eine Differenz - eine Regelabweichung $x_w(t)$ - zwischen Soll- und gemessenem Istwert auf, so muss dieser durch eine entsprechende Einflussnahme auf die Regelstrecke entgegengewirkt werden. Dazu verarbeitet der Regler die Regelabweichung und erzeugt eine Steuergröße u(t). Diese überträgt ein Signal zur Stelleinrichtung, welche die Stellgröße y(t) ändert. Als Ergebnis des Entgegenwirkens wird die Abweichung verringert bzw. ganz beseitigt.

4.1.3 Regler

Das Hauptaugenmerk bei der Regelung ist daher auf die Auswahl eines geeigneten Reglertyps und des einzustellenden Parameters zu richten, der die Regelgröße x(t) so genau wie möglich an den Sollwert w(t) angleicht.

Zur Klassifizierung können Regler entsprechend des Wertebereiches ihres Ausgangssignals in unstetige Regler und stetige Regler eingeteilt werden.

Bei unstetigen oder auch schaltenden Reglern kann das Ausgangssignal nur bestimmte Werte annehmen. Eine Regelung auf Basis eines unstetigen Reglers ändert die Einschaltdauer der Stellgröße. Typische Vertreter sind die Zweipunktregler. Sie besitzen zwei Schaltzustände, d.h. die Stellgröße kann entweder den Wert 0% oder 100% einnehmen. Ein Beispiel hierfür wäre der Bimetallschalter eines Bügeleisens. Wird die eingestellte Temperatur (Sollwert) erreicht, schaltet der Bimetallschalter die

Heizung aus. Unterschreitet die Temperatur den Sollwert, so wird die Heizung wieder eingeschaltet.

Die Ausgangsgröße der stetigen Regler kann jeden beliebigen Wert ihres Stellbereiches (0% ... 100%) einnehmen. Stetige Regler können wie die Regelstrecken nach ihrem Zeitverhalten eingeteilt werden. Man unterscheidet drei Arten: die proportional wirkenden (P-Regler), die integral wirkenden (I-Regler) und die differentiell wirkenden (D-Regler) Regler. Mathematisch werden die Grundtypen durch die folgenden Gleichungen definiert:

$$y(t) = K_P \cdot x_w(t) \tag{4.1}$$

$$y(t) = K_I \cdot \int x_w(t) dt \tag{4.2}$$

$$y(t) = K_D \cdot \frac{dx_w(t)}{dt} \tag{4.3}$$

Weiterhin existieren Regler, deren Verhalten sowohl proportional als auch integral ist. Sie werden als PI-Regler bezeichnet. Zur Regelung besonders schwieriger Regelstrecken werden so genannte PID-Regler eingesetzt. Diese Regler weisen neben dem proportionalen und integralen Anteil noch einen differentiell wirkenden Anteil auf. Die Gleichungen dieser Reglertypen sind in Gleichung (4.4) und (4.5) dargestellt.

$$y(t) = K_P \cdot x_w(t) + K_I \cdot \int x_w dt \tag{4.4}$$

$$y(t) = K_P \cdot x_w(t) + K_I \cdot \int x_w(t)\, dt + K_D \cdot \frac{dx_w(t)}{dt} \tag{4.5}$$

Die Auswahl des geeigneten Reglertyps richtet sich nach dem geforderten Zeitverhalten und der geforderten Regelgenauigkeit der Regelstrecke.

4.1.4 Regelung von Formgedächtnislegierungen

Der Einsatz der Formgedächtnislegierungen als Aktoren zur Regelung kann in zwei Kategorien eingeteilt werden: die thermisch und die elektrisch aktivierten Aktoren. Die thermisch aktivierten Aktoren reagieren auf Änderung der Umgebungstemperatur. Dies kann sowohl mit einem Gas als auch einer Flüssigkeit erfolgen. Bei den elektrisch aktivierten Aktoren wird die Temperaturänderung durch den Joule´schen

Effekt verursacht. Diese Art der Temperaturänderung wird bei Formgedächtnislegierungen am häufigsten zur Regelung eingesetzt. Der Vorteil liegt in der direkten und sofortigen Einflussnahme auf das Längenänderungsverhalten der Legierungen.

Als Stellgröße zur Einflussnahme auf die Regelstrecke dient für die elektrisch aktivierten Formgedächtnisaktoren die elektrische Spannung s(t) und als Regelgröße können die Temperatur T(t), die Deformation D(t), die Kraft F(t) oder, wie in Kapitel 3 beschrieben, der Widerstand R(t) herangezogen werden. Diese werden mittels einer Messeinrichtung erfasst und verglichen. Meist werden aber die Deformation oder die Kraft erfasst und geregelt, da diese einfach zu messen sind. Die Temperatur als Kontrollgröße ist schwieriger zu messen, da es sich bei den eingesetzten Formgedächtnisaktoren vorwiegend um Drähte oder Bänder handelt, auf denen das Anbringen der Temperaturfühler aufgrund der schmalen Kontaktflächen kompliziert ist. Außerdem ist eine Fixierung wegen der großen Längenänderungen der Formgedächtnislegierungen problematisch. Hinzu kommt noch die Trägheit des Temperaturfühlers, da sich die Temperaturen bei solchen Anwendungen sehr schnell ändern können.

Verzichtet man auf die Messung der Temperatur, kann es aber zur Überhitzung der Formgedächtnisaktoren kommen. Dies kann die Formerinnerung vermindern oder sogar zerstören. Daher ist abzuwägen, inwieweit sich der Aufwand lohnt, die Temperatur zu kontrollieren.

Als Störgrößen kommen folgende Faktoren in Betracht:

- der sich ändernde Wärmeaustausch mit der Umgebung (Temperaturänderung, Umgebungsänderung)
- die Laständerung
- die Phasenumwandlung der Formgedächtnislegierung

Die Abbildung 4.2 zeigt den dazugehörigen Signalflussplan eines elektrisch aktivierten Formgedächtnisaktors.

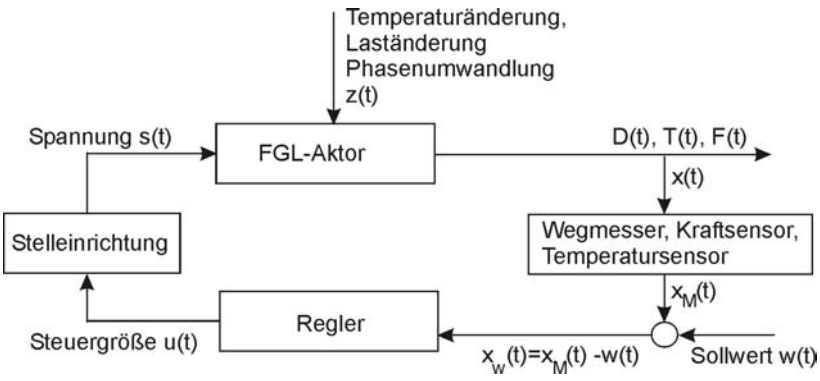


Abbildung 4.2: Signalflussplan der Regelung eines Formgedächtnisaktors

Wichtig bei der Erstellung eines Regelkreises - insbesondere für die Regelung von Formgedächtnisaktoren - ist, dass der Regelkreis stabil läuft, die Regelgröße x(t) dem Sollwert möglichst schnell folgt und, dass die Störgrößen einen nicht zu großen Einfluss auf das System nehmen. Daher muss der Regelkreis ausreichende Stabilitätsreserven haben und die Regelantwort auf Störgrößen sollte hinreichend gedämpft sein (wenige Überschwinger). Entsprechend ist der Reglertyp auszuwählen und dessen Zeitverhalten anzupassen. Für nichtlineare Systeme, wie die Regelung von Baugruppen mit Formgedächtnisaktoren (Adaptiver Tragflügel, Adaptives Winglet), existieren keine analytischen Verfahren für einen Reglerentwurf. Daher müssen der geeignete Typ und die geeigneten Einstellparameter für die spezielle Anwendungen durch Experimente gefunden werden.

Für die beiden Anwendungen wird die Proportional-Integral-Regelung (PI-Regelung) verwendet, da sowohl die reine Proportionalregelung als auch die Integralregelung Vor- und Nachteile besitzen. Die Proportionalregelung erzeugt schnelle Verformungsänderungen am Tragflügel, verhält sich aber durch große Schwankungen um den Sollwert unbefriedigend. Bei der Integralregelung ist das genau umgekehrt. Die Kombination beider Varianten, d.h. die Addition des Proportional- und des Integralgliedes kann die jeweiligen Nachteile beheben. Die Werte und weitere Informationen zu den Reglern sind in den einzelnen Kapiteln der Anwendungen zu finden.

Untersuchungen, Modellbildungen und Simulationen für die Einstellung von Reglern bei Formgedächtnislegierungen aus Drähten oder Bändern, die nicht in Systemen oder Strukturen integriert sind, finden sich in den Arbeiten von Söffker, Seelecke und da Silva [51, 52].

4.2 Modell I - Adaptiver Tragflügel

4.2.1 Vorbetrachtung

Anhand dieses Modells soll die Einfachheit der Realisierung von adaptiven Strukturen durch Formgedächtnisdrähte und deren Regelung gezeigt werden. Nutzt man den Effekt der Formgedächtnislegierungen aus und bringt sie auf einer Metallplatte als Aktoren an, so kann man aufgrund der Kontraktion beim elektrischen Beheizen der Formgedächtnisdrähte die Metallplatte verformen. Dabei übernimmt die Metallplatte die Funktion eines Biegeträgers (Kapitel 3.3) und erzeugt die erforderlichen Kräfte für die Rückdehnung der Drähte bei tiefen Temperaturen.

Das in diesem Fall gewählte Modell stellt den Querschnitt einer Flugzeugtragfläche dar (Abbildung 4.3), die den Anströmungsbedingungen entsprechend eine optimale Form annehmen soll.

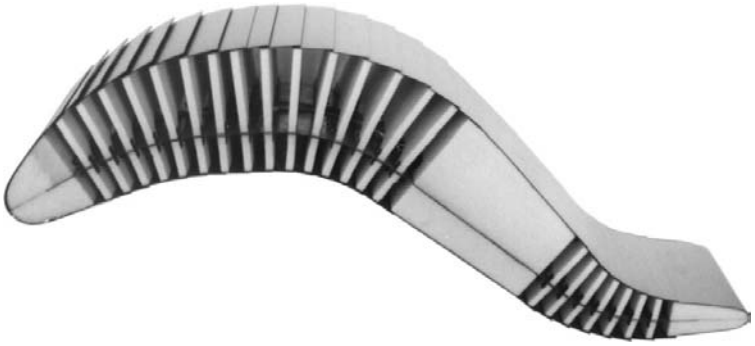


Abbildung 4.3: Verformter adaptiver Tragflügel

Die Schwierigkeit dieses Vorhabens liegt darin, die Formgedächtnislegierungen thermisch so zu aktivieren, dass sie nicht zwischen den beiden Extremzuständen pendeln, und zwar entweder

- Martensit ⇔ Austenit,
- Maximale Deformation ⇔ Minimale Deformation oder
- tiefe Temperatur ⇔ hohe Temperatur.

Auf dem Gebiet der adaptiven Strukturen und in der Robotik reichen diese Zustände nicht aus; es müssen auch die dazwischenliegenden Deformationen realisierbar sein. Dies kann nur durch eine Regelung erfolgen.

Abbildung 4.4 zeigt den Deformations-Temperatur-Verlauf einer Formgedächtnislegierung und die möglichen Deformationszustände, die über die Joule´sche Erwärmung eingestellt werden können.

Dabei ist zu beachten, dass die Formgedächtnislegierungen eine Hysterese beschreiben, die entsprechend durchlaufen werden muss. D.h. beim Erreichen von Zwischendeformationen müssen innere Hysteresen durchlaufen werden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn man durch eine Erwärmung von Punkt 1 die Deformation des Punktes 2 erreicht und danach eine höhere Deformation (Punkt 3´) einstellen möchte, so ist dies auf derselben Kurve auf der der Punkt 2 erreicht wurde durch einen Rücklauf nicht möglich. Durch die Abkühlung beim Punkt 2 wird eine innere Hysterese durchlaufen, welche den Punkt 3 mit derselben Deformation wie 3´ erreicht. Es ist aber zu erkennen, dass dies bei unterschiedlichen Temperaturen stattfindet. Soll der Punkt 3´ erreicht werden, so muss die komplette Hysterese durchlaufen werden.

Die gestrichelte Linie zeigt den möglichen weiteren Verlauf der Kurven vom Punkt 3, je nachdem, welcher Deformationszustand erreicht werden soll. Außerdem zeigt die Abbildung 4.4, dass es nicht nötig ist, eine komplette Hysterese zu absolvieren, sondern dass mit dem Durchlaufen der inneren Hysterese auch die entsprechende Deformation eingestellt werden kann.

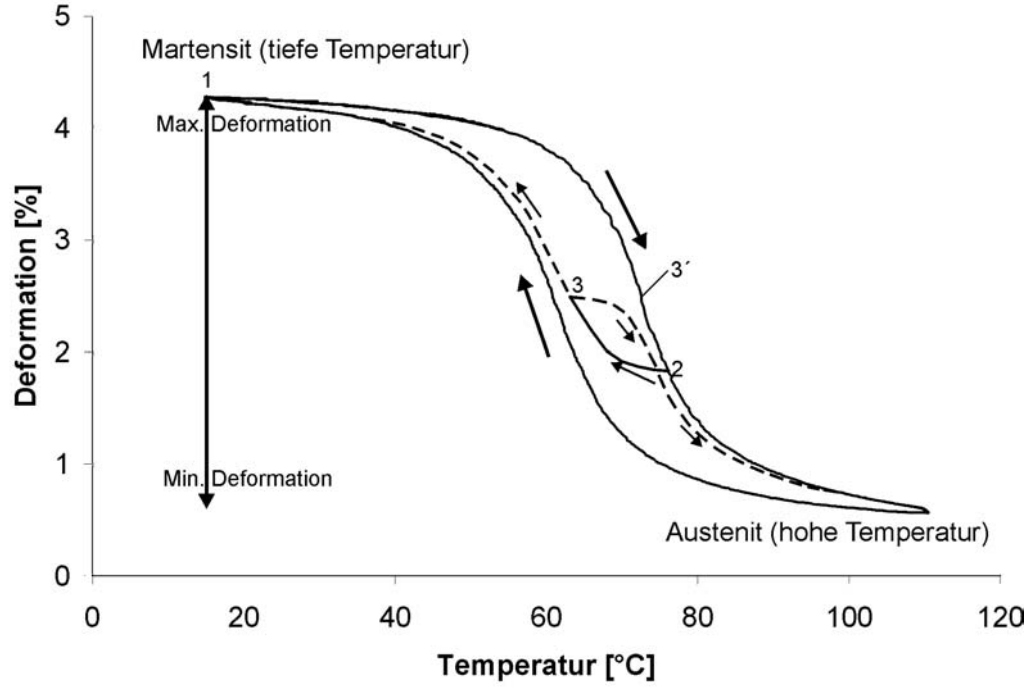


Abbildung 4.4: Deformations-Temperatur-Verlauf einer Formgedächtnislegierung bei konstanter Last

Auf diese Problematik muss bei der Regelung geachtet werden, um bei einer Regelabweichung entsprechend reagieren zu können. Dies zeigt, dass es nicht sinnvoll ist, die Temperatur als Rückführgröße zur Regelung zu benutzen, da diese keine eindeutige Beziehung zur Deformation darstellt.

Beim Modell des adaptiven Tragflügels wird die Biegung bzw. die Verformung als Kontrollgröße herangezogen. Dazu werden Dehnungsmessstreifen genutzt, die die Verformung registrieren. Dadurch ist es möglich, am adaptiven Tragflügel verschiedene Sollformen einzustellen und zu halten.

4.2.2 Modellbeschreibung

In der schematischen Darstellung der Abbildung 4.5 ist der Querschnitt des adaptiven Tragflügels im unbeheizten Zustand (oberes Bild) und im beheizten Zustand (unteres Bild) zu sehen. Der Tragflügel hat eine Länge von 570mm, eine Breite von 80mm und eine maximale Höhe von 90mm.

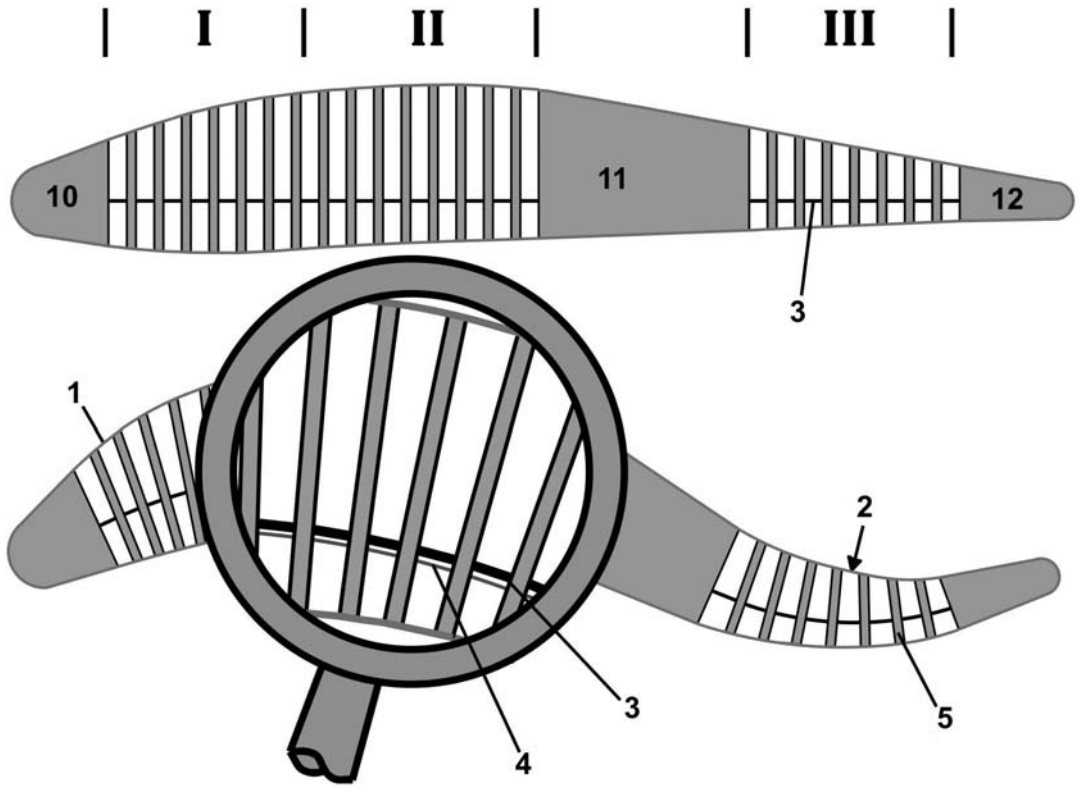


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des adaptiven Tragflügels

Das Kernstück des adaptiven Tragflügels ist das flexible Federblech (3) mit einer Dicke von 0,3mm in der Mitte des Flügels, auf dem sämtliche Aufbauten montiert sind. Es hat eine Länge von 520mm und ist 80mm breit. In dem Blech sind verschiedene Bohrungen, um die einzelnen Elemente zu montieren.

Das verformbare Federblech (3) ist mit einem aerodynamischen Mantel (2) in einer typischen Flugprofilform verkleidet. Um die Verformung nicht zu behindern, ist die Außenhaut in Schuppenform (1) auf Stegen (5) ausgelegt, wobei die einzelnen Schuppen übereinander gleiten können. Die Stege (5) sind aus Styrodur, einem grün eingefärbten extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff, der sehr leicht ist. Die auf den Stegen aufgeklebten Schuppen bestehen aus einer silberfarbigen Kunststofffolie. Abbildung 4.6 zeigt das fertige Element und die Montage auf dem Federblech (3). Jeder der 44 Stege hat aufgrund der Konstruktion eine andere Höhe (Abbildung 4.5). Die Stege besitzen zur Blechseite eine Aussparung, damit im Inneren die weiteren Elemente montiert werden können. Zur Montage und Demontage besitzen die Stege zwei Metallführungen. Diese rasten in das Klemmstück (9) ein, welches durch eine Punktverschweißung mit dem Federblech (3) verbunden ist.

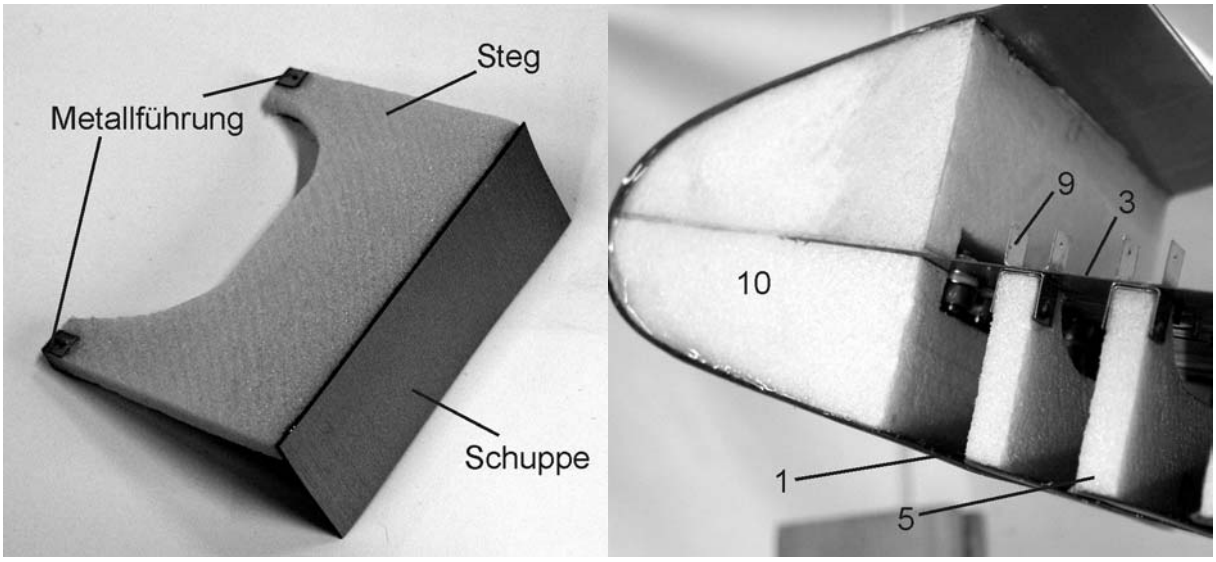


Abbildung 4.6: Steg mit Schuppe (links), Klemmstücke auf dem Federblech und montierte Stege mit Schuppen (rechts)

Vorn (10), in der Mitte (11) und am Ende (12) sind jeweils massivere Styrodurelemente geklebt, welche die Gesamtstruktur abrunden. Diese Elemente sind in der Abbildung 4.5 dargestellt.

Der Tragflügel, verfügt über 3 biegsame Teilstücke (I, II, III), wie in Abbildung 4.5 gezeigt, die konkav bzw. konvex verformt werden können. So sind in den Teilabschnitten I und II die Formgedächtnisdrähte (4) unterhalb und im Teilabschnitt III die Drähte oberhalb des Bleches (3) zueinander in Flugrichtung angeordnet. Die schematische Darstellung und das Foto in Abbildung 4.7 zeigen die 6 parallel angeordneten Formgedächtnisdrähte (4) je Teilabschnitt. Bei den verwendeten Formgedächtnisdrähten (4) handelt es sich um Drähte aus NiTi mit Zweiwegeffekt. Diese haben jeweils eine Einbaulänge von 100mm und einen Durchmesser von 0,29mm.

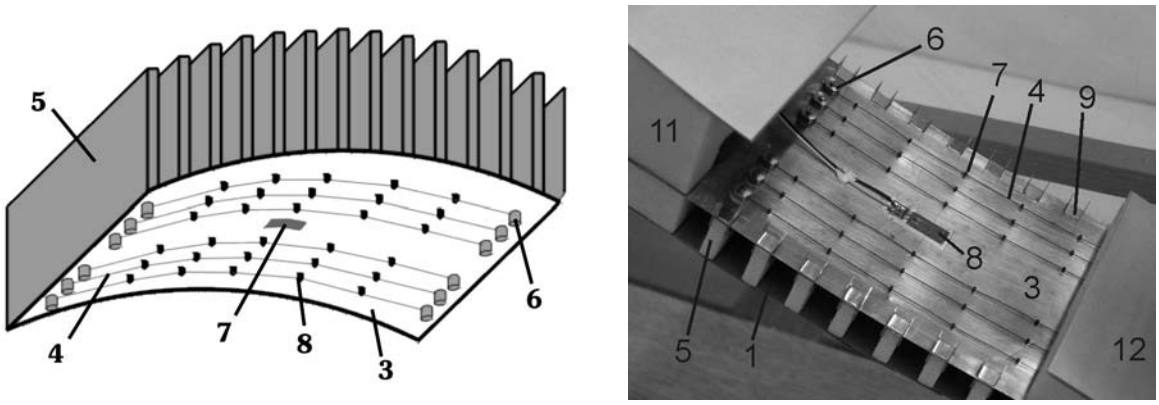


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Anordnung der Formgedächtnisdrähte auf einem Teilabschnitt (links), Foto vom hinteren Teilabschnitt (rechts)

Die Formgedächtnisdrähte (4) sind unterhalb bzw. oberhalb des zu verformenden Bleches (3) in sehr geringem Abstand zu diesem tangential in Ösen (8) beweglich geführt. Ein Halter (6) klemmt die Drahtenden am Blech (3) fest. Die Ösen (8) dienen dazu, den Draht sehr dicht am Blech (3) zu halten, da so eine größere Verformung des Bleches (3) erzielt wird. Über die Halter (6) erfolgt die elektrische Beheizung der Formgedächtnisdrähte (4). Dazu sind auf der Gegenseite des Federbleches (3) Querbleche (Abbildung 4.8) an den Haltern (6) montiert, über die parallel der Stromfluss in den Drähten erfolgt. Die parallele Anordnung und Bestromung der Drähte hat den Vorteil, dass auch dann noch eine Verformung des Federbleches erfolgt, wenn ein oder zwei Drähte reißen. Die Halter (6) und die Ösen (8) sind elektrisch vom Blech (3) isoliert.

Die Verformung des Tragflügels erfolgt über die Änderung der Heizspannung in den Formgedächtnisdrähten (4). Dazu werden Halbleiterrelais über eine D/A-Karte angesteuert. Die Halbleiterrelais sind an einem externen Netzgerät angeschlossen, welches die nötige Leistung zur Beheizung der Formgedächtnisdrähte bereitstellt. Die

Verformung des adaptiven Tragflügels wird über zwei Dehnungsmessstreifen (7) je Teilabschnitt erfasst und über eine Wheatstonesche Messbrücke an eine entsprechende A/D-Karte übertragen. Dazu sind zwei Dehnungsmessstreifen in der Mitte jedes Teilabschnittes auf die Ober- und Unterseite geklebt.

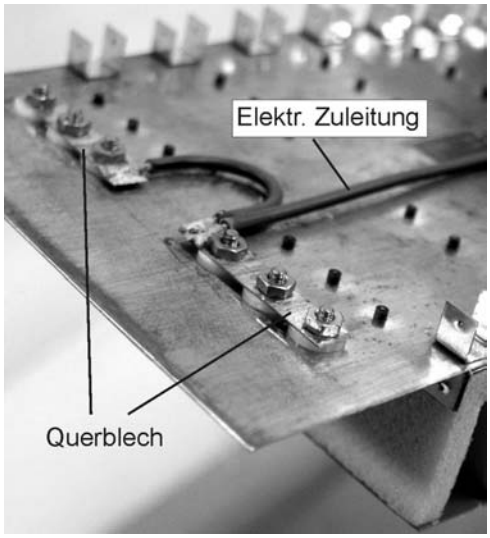


Abbildung 4.8: Anschluss der Stromversorgung

Die Abbildung 4.9 zeigt den adaptiven Tragflügel (C) im Acrylwindkanal (D). Auf dessen linker Seite befinden sich 4 Ventilatoren (A), die eine Luftströmung erzeugen. Der Anströmungswinkel kann durch die Lamellen (B) verändert werden. Über einen Computer oder durch einen Joystick (F) kann der gewünschte Anströmungswinkel eingestellt werden. In beiden Fällen wird dies durch einen Stellmotor (E) realisiert, der sich unterhalb der Lamellen befindet. Der Anströmungswinkel kann Werte zwischen 0° und 20° annehmen und wird an einen Computer übertragen. Dieser errechnet die daraus resultierende Sollform und veranlasst die Regelung.

Für die Regelung wird ein Target-Computer (Abbildung 4.10) benutzt, auf dem eine Software die Funktion des Regelgliedes übernimmt und in dem sich die Input/Output-Messkarten (I/O-Messkarten) befinden. Für die Programmierung der Regelungssoftware und Weiterverarbeitung der Daten steht ein Host-Computer zur Verfügung. Dazu ist der Host-Computer mit der mathematischen Simulationssoftware Matlab5.2/Simulink2.2, der Übertragungssoftware RealLink32 und dem C-Compiler WatCom11.0 ausgestattet. Zwischen Host und Target besteht über ein Netzwerkkabel eine direkte Verbindung. Ist der Regelalgorithmus (Regelungssoftware) auf den Target-Computer überspielt, wird die Regelung aktiviert. Zur Auswertung der Rege-

lung können zusätzlich die Messdaten erfasst und nach Beendigung des Regelvorgangs vom Target-Computer auf den Host-Computer übertragen werden.

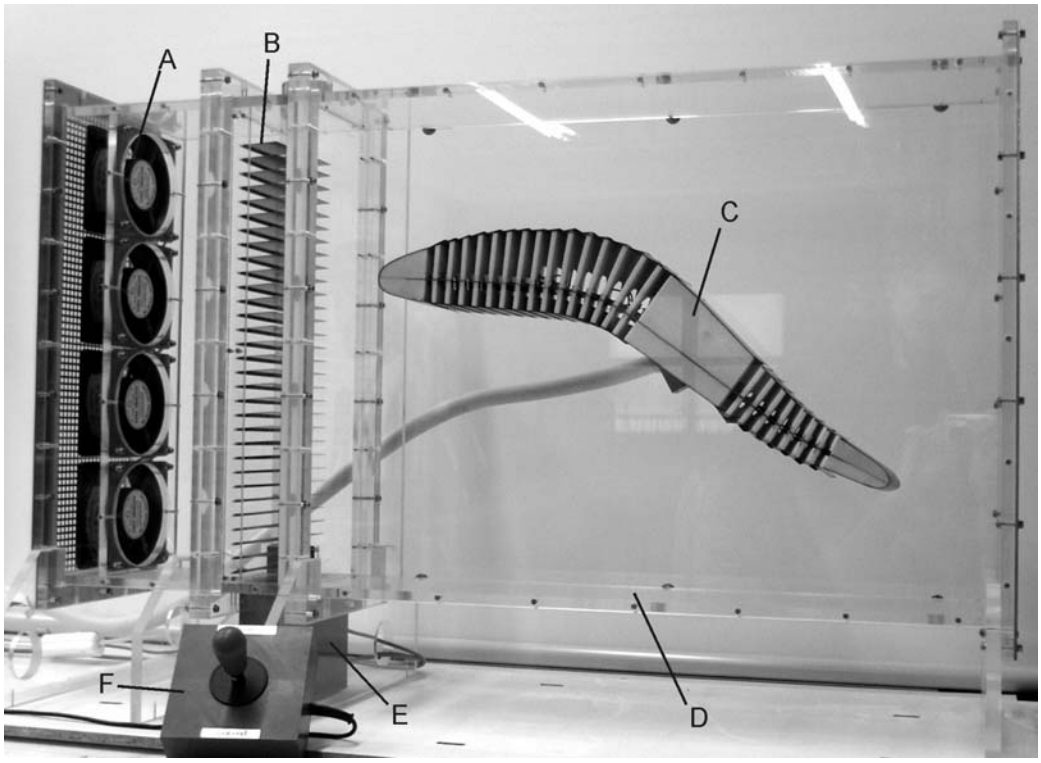


Abbildung 4.9: Adaptiver Tragflügel im Windkanal

4.2.3 Regelalgorithmus und technische Realisierung

Die Abbildung 4.10 zeigt schematisch den Gesamtaufbau des Versuchsstandes zur Durchführung der Regelung.

Der zu realisierende Regelkreis soll die Verformungen der drei Teilabschnitte erfassen und anhand der Differenz der Sollform zur Istform die elektrische Heizleistung in den Formgedächtnisdrähten ändern. Ziel ist es, die schnellstmögliche und optimale Einstellung der Sollform zu erreichen.

Die Sollform bzw. der Sollwert bestimmt sich aus der vorherrschenden Anströmungsrichtung der Lamellen, aus der die dazugehörige Profilform folgt. Der Sollwert wird mit dem momentanen Istwert verglichen. Der Istwert ergibt sich aus der vorliegenden Flügelform, die durch die Abfrage von Dehnungsmessstreifen (DMS; HBM, 6/350LY11) ermittelt 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-Computer ermittelt und durch eine Änderung der Heizleistung mittels D/A-Karte (CIO-DAC16/12) in den Formgedächtnisdrähten korrigiert.

Die Heizleistung wird über ein externes Netzgerät bereitgestellt, welches eine konstante Spannung U_0 an jeden einzelnen Draht liefert. Die Halbleiterrelais ermöglichen das Ein- und Ausschalten des Stromkreises, was zu einer Erwärmung bzw. zu einer Abkühlung der Drähte und damit zur Verformung bzw. Nichtverformung des Tragflügels führt. Wie in Kapitel 4.2.1 gefordert, sollen aber auch die dazwischenliegenden Verformungen eingestellt werden. Da das Netzteil eine konstante Gleichspannung zur Verfügung stellt, muss die Spannung in den Formgedächtnisdrähten veränderlich gepulst werden, so dass sie einen Mittelwert annimmt. Man spricht vom Grundprinzip der Pulsweitenmodulation.

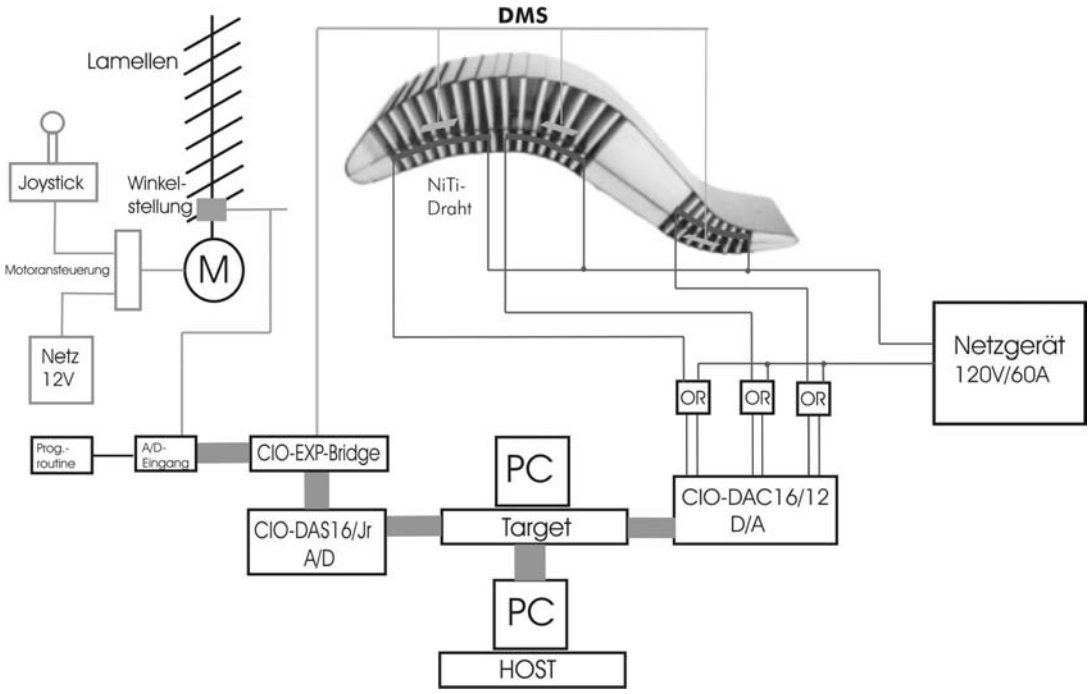


Abbildung 4.10: Blockschema zur Regelung

Um dies zu realisieren, werden die genannten Relais und ein Steuerprogramm benötigt, das die Breite des Pulses berechnet. Dazu wird eine maximale Anschaltdauer t_F für die konstante Spannung U_0 festgelegt. Die Spannung wird effektiv für eine Anschaltdauer t_P geschaltet, wobei für t_P gilt:

$$0 \leq t_P \leq t_F \tag{4.6}$$

Dadurch wird gewährleistet, dass die Zeit t_P nach Verstreichen von t_F neu bestimmt wird. Die Anschaltdauer t_P für das Zeitfenster t_F ist eine Funktion der momentanen Verformungsabweichung $x_w(t)$. Die Verformungsabweichung ergibt sich aus der aktuellen Differenz des Sollwerts $V_{Soll}(t)$ vom Istwert $V_{Ist}(t)$ (Gleichung (4.7)).

$$x_w(t) = V_{Soll}(t) - V_{Ist}(t) \tag{4.7}$$

Die Herleitung der Berechnungsvorschrift soll Abbildung 4.11 verdeutlichen.

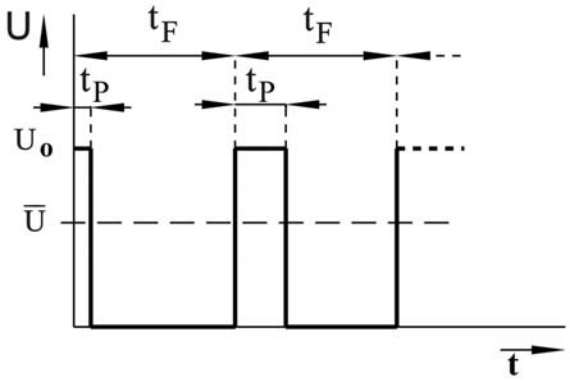


Abbildung 4.11: Darstellung der Pulsweitenmodulation

Je nach Länge des Pulses t_P werden die Formgedächtnisdrähte mehr oder weniger beheizt, so dass sich aus der Summe der einzelnen Heizimpulse t_P eine entsprechende Mittelheizspannung $\overline{U}$ ergibt (Gleichung (4.8)).

$$\overline{U} = \frac{1}{t_F} \int_{t=0}^{t=t_P} U_0(t) = \frac{1}{t_F} U_0 t_P \tag{4.8}$$

Die Dauer des Pulses t_P (Gleichung (4.9)) und damit die Einschaltdauer der Halbleiterrelais richtet sich nach der benötigten Heizspannung $\overline{U}$, der Amplitude der eingestellten Spannung (U_0) und der festgelegten Anschaltdauer (t_F).

$$t_P = \frac{\overline{U}}{U_0} t_F \tag{4.9}$$

Die mittlere Heizspannung ist die im Regelkreis benötigte Stellgröße y(t) (Kapitel 4.1). Diese ergibt sich, wie in Gleichung (4.10) gezeigt, aus der Differenz zwischen

Sollwert (geforderte Verformung des Tragflügels) und Istwert (momentane Verformung des Tragflügels) und dem ermittelten Proportional- und Integralfaktor (k_P, k_I).

$$y(t) = \overline{U} = k_P \cdot (V_{Soll} - V_{Ist}) + k_I \int \left[V_{Soll} - V_{Ist} \right] dt \qquad (4.10)$$

Es ist zu beachten, dass bei einer Rückstellung der Verformung nach der Gleichung (4.10) eine negative Spannung durch die Formgedächtnisdrähte fließt. Diese negative Spannung ist als Stellgröße für die Regelung nicht nutzbar, da eine negative Spannung ebenfalls zu einer Erwärmung führt. Daher wird die Spannung bei einem negativen Wert ausgeschaltet, so dass die Formgedächtnisdrähte abkühlen, sich längen und damit die Verformung des Tragflügels zurückgestellt wird.

Die Faktoren k_P und k_I bestimmen den Einfluss von Proportional- und Integralglied und müssen dem System des Tragflügels so angepasst werden, dass die Regelung den gewünschten Effekt erzielt. Daher müssen die Proportional- und Integralglieder iterativ bestimmt werden. Für die einzelnen Teilabschnitte des Tragflügels ergeben sich die in Tabelle 4.1 ermittelten Werte.

Tabelle 4.1: Proportional- und Integralglied der Teilabschnitte des adaptiven Tragflügels

Abschnitt (Abbildung 4.5)	k_P	k_I
I	3	0,08
II	1	0,08
III	1,5	0,08

Wie im Kapitel 4.1.4 beschrieben, macht es Sinn, den Proportional- und Integralregler zu kombinieren, um so die Nachteile nur eines einzelnen Reglertyps zu mindern. Für das Anfahrverhalten übernimmt der Proportionalterm die dominante Rolle, da der Integralterm sehr klein ist, d.h. je größer k_P gewählt wird, desto schneller wird der Sollwert erreicht. Damit nehmen beim Erreichen des Sollwertes auch die Schwankungen um den Sollwert zu. Daher darf dieser Wert im beschriebenen Anwendungsfall nicht zu groß sein, da ansonsten der Tragflügel schwingt. Kleine Schwingungen des Proportionalterms werden vom Integralterm geglättet.

Die Integralglieder sind für alle drei Abschnitte gleich gewählt, nachdem die Regelabweichung weitestgehend durch das Proportionalglied beseitigt wurde. Hier zeigen die drei Abschnitte gleiche Verhaltensweisen. Dagegen weisen die Proportionalglieder unterschiedliche Werte auf, da hier die Lage des Abschnittes und die Bauform des Tragflügels Einfluss nehmen.

Zur Bestimmung wird die Abtastrate auf einen kleinen Wert eingestellt, damit die Zeitpunkte zwischen der Abtastung der Regelgröße möglichst klein sind. Dazu wird das Zeitfenster auf den Wert t_F=0,005s eingestellt. Ein kleines t_F wirkt sich glättend bzw. beruhigend auf das Verhalten der Teilabschnitte des Tragflügels aus. Nach der Bestimmung von k_P und k_I wird das Zeitfenster vergrößert, und zwar solange, wie sich das Verhalten der Regelung nicht ändert. Für den Tragflügel liegt dieser Wert bei t_F=0,07s. Der Wert wird gewählt, da eine hohe Abtastrate eine hohe Leistung der Rechenkapazität erfordert. Diese ist für die drei Abschnitte des Tragflügels vorhanden, aber nicht nötig, da das eingestellte Zeitfenster von 0,07s ausreicht, eine stabile Regelung am adaptiven Tragflügel zu realisieren.

Die ermittelten Werte für k_P, k_I und t_F sind im Regelalgorithmus integriert. Dieser kann auf einem Mikroprozessor gespeichert werden oder, wie beim adaptiven Tragflügel, auf einem speziell ausgestatteten Computer (Host-Computer) mit einer bestimmten Software programmiert werden. Eine solche Software ist Simulink, ein Modul, welches Bestandteil im mathematischen Programm Matlab ist. Es dient u.a. dazu, Messwerte über A/D-Karten zu erfassen und D/A-Karten so anzusteuern, dass entsprechende Aktionen ausgeführt werden. Die Benutzeroberfläche ist in erster Linie grafisch gestaltet und orientiert sich an der Gestaltung von Signalflussplänen. Die benötigten Elemente zur Regelungsgestaltung sind Symbole aus einer Datenbank, die auf der Arbeitsfläche angeordnet und miteinander verknüpft werden. Der so entstandene Signalflussplan dient zur Erfassung der Messwerte, welche automatisch ausgewertet und aus denen neue Signale zur Regelung des Experiments generiert werden. Der fertige Regelalgorithmus wird mit dem C-Compiler WatCom kompiliert und mit der Hilfe der Übertragungssoftware RealLink32 übers Netzwerk auf den Target-Computer überspielt und dort ausgeführt.

Der überspielte Regelalgorithmus auf dem Target-Computer kann durch den Host-Computer gestartet werden. Nach dem Start übernimmt der Target-Computer autark

die Regelung. Die anfallenden Messdaten werden zusätzlich aufgezeichnet und an den Host-Computer übermittelt.

Die Regelstruktur ist sehr komplex und soll daher nur kurz erläutert werden. Die Abbildung 4.12 zeigt einen Überblick über den hergestellten Regelalgorithmus in Simulink. Die dort dargestellten Bausteine beinhalten zusammengefasste Strukturen, die meist weitere Unterstrukturen aufweisen. Das Zusammenfassen hat den Vorteil, dass der Überblick über den Regelalgorithmus erhalten bleibt und die so entstandenen Bausteinstrukturen einzeln auf ihre Funktion getestet werden können.

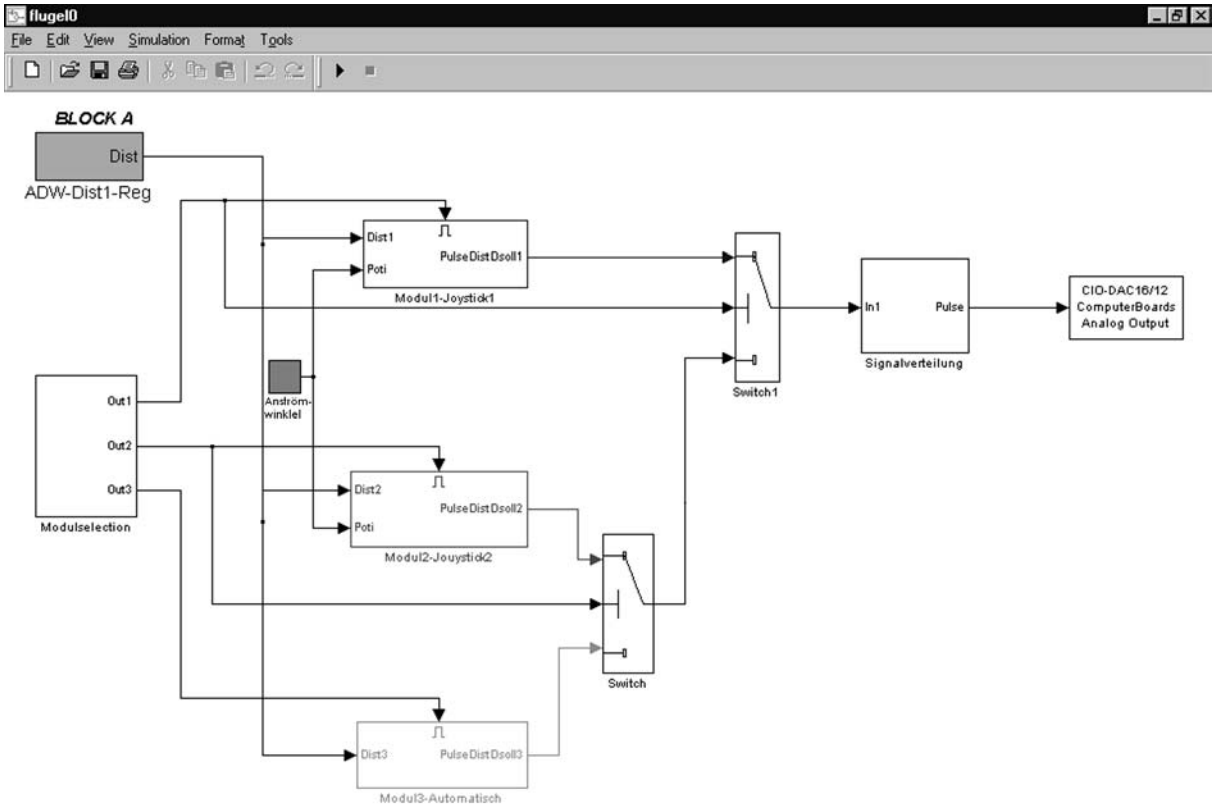


Abbildung 4.12: Darstellung des Signalflussplanes in Simulink

Der Baustein „Block A“ beispielsweise beinhaltet die Struktur zum Auslesen der Analog-Daten der Dehnungsmessstreifen. Die Struktur dieses Bausteins ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Da der Tragflügel drei Bereiche zur Dehnungsmessung hat, müssen diese entsprechend ausgelesen werden (ADC9, ADC10, ADC11). Die ausgelesenen Messwerte dieses Bausteins werden zu den Modulen 1 bis 3 geführt (Abbildung 4.12), in denen sich jeweils der Regler befindet und die Pulsmodulation erfolgt. Der Baustein „Modulselection“ dient dazu, eine entsprechende Programmroutine (Modul 1, Modul 2 oder Modul 3) extern durch einen Drehschalter aufzurufen. Diese Aus-

wahl wurde angelegt, um auf Messen und Ausstellungen die Möglichkeit zu haben, verschiedene Verformungsabläufe darzustellen. Die Module beinhalten folgende Regelalgorithmen:

- **Modul 1 :** *Gleichmäßige Verformung*
  Je nach Winkelstellung der Lamellen verformen sich die einzelnen Teilstücke des Tragflügels gleichmäßig, d.h. bei einem Anströmungswinkel von 0° sind alle Teilstücke des Tragflügels gerade. Mit zunehmendem Anströmungswinkel verformen sich die Teilstücke, bis sie bei einem Winkel von 20° maximal gekrümmt sind.

- **Modul 2:** *Unterschiedliche Verformung*
  Die einzelnen Abschnitte des Tragflügels verformen sich je nach Anströmungswinkel unterschiedlich, d.h. je nach Winkel können die Abschnitte gerade, leicht gekrümmt, mittelgekrümmt oder maximal gekrümmt sein.

- **Modul 3:** *Automatische Verformung*
  Beim Modul 1 und Modul 2 wird die Stellung der Lamellen und damit der Anströmungswinkel durch den Joystick verändert. Dieser wird bei Modul 3 nicht benötigt, da der Computer den Anströmungswinkel vorgibt und daraus die Sollform der einzelnen Abschnitte festlegt.

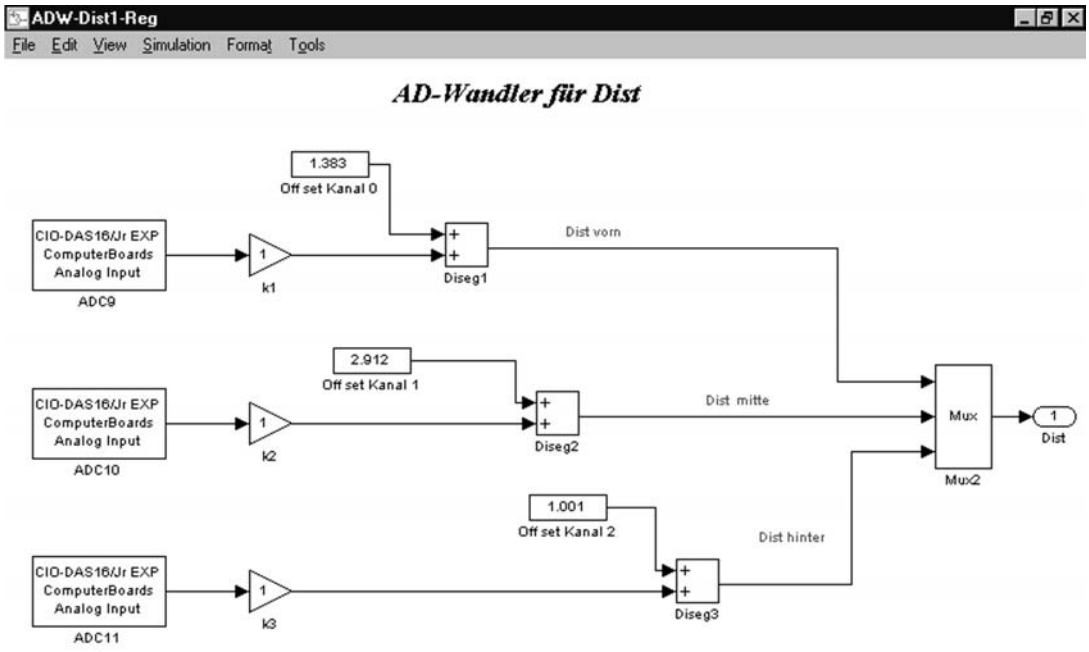


Abbildung 4.13: Unterstruktur des Bausteins „Block A“

Die errechneten Signale zur Steuerung, die entweder vom Modul 1, 2 oder 3 erzeugt werden, werden rechts über die „Switches“ und die Signalverteilung an die entsprechende Ausgabekarte (CIO-DAC16/12) gegeben. Diese Karte steuert die Halbleiterrelais und damit die mittlere Heizspannung in den Drähten.

4.2.4 Auswahl der Formgedächtnislegierung

Bevor eine Formgedächtnislegierung in einer adaptiven Struktur Verwendung findet, muss ihr Verhalten im Vorfeld untersucht werden. Dazu stehen im Labor des Fachgebiets Thermodynamik entsprechende Apparaturen zur Verfügung, um das Kraft-Temperatur-Verhalten, Kraft-Deformations-Verhalten und Deformations-Temperatur-Verhalten zu untersuchen. Diese Ergebnisse geben Hinweise auf die Gitterumwandlungstemperaturen, die Hysteresenbreite, die Rückstellkräfte und den Elastizitätsmodul. Im adaptiven Tragflügel kam der Zweiweg-NiTi-Draht aus Kapitel 3 zur Anwendung, da dieser die Vorraussetzungen am besten erfüllte. Die Verwendung des Zweiwegeffektes hat den Vorteil, dass der Formgedächtnisdraht die Rückstellung der Biegung des Federbleches im adaptiven Tragflügel unterstützt. Ansonsten würde die Kraft des Bleches nicht ausreichen, um den Formgedächtnisdraht nach seiner Kontraktion wieder vollständig in seine Ausgangslänge zurück zu dehnen.

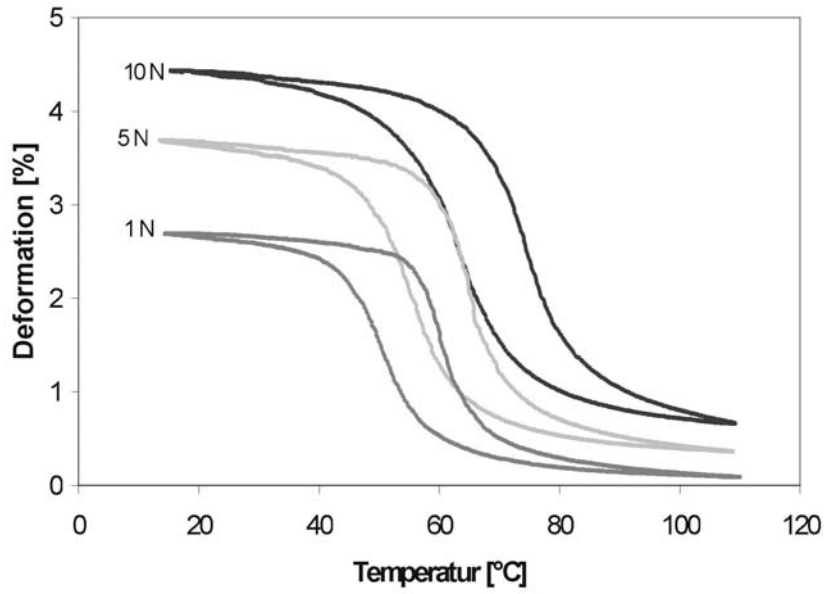


Abbildung 4.14: Deformations-Temperatur-Diagramm des verwendeten NiTi-Drahtes

In Abbildung 4.14 sind 3 Messungen für jeweils eine konstante Last (1N, 5N, 10N) im Deformations-Temperatur-Diagramm des verwendeten Formgedächtnisdrahtes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit wachsender Last die Hysterese zu höherer Temperatur und Deformation steigt. Wichtig ist, dass der Draht seine vollständige martensitische Umwandlung im lastfreien Zustand bei Raumtemperatur abgeschlossen hat, damit der Draht wieder seine Ausgangsdeformation erreicht.

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

Damit der Tragflügel ausreichend verformt werden kann, muss ein entsprechender Formgedächtnisdrahtquerschnitt gewählt werden, um für eine maximale Verformung die Kraft von ca. 60N aufzubringen. Die Last, die auf den Querschnitt wirkt, darf eine zulässige Spannung (Tabelle 2.1) nicht überschreiten, damit genügend Lastzyklen erfolgen können. Für eine schnelle Erwärmung des Drahtes und eine schnelle Abgabe der Wärme an die Umgebung beim Abkühlen wurde der Querschnitt auf 6 Drähte mit einem Durchmesser von 0,29mm verteilt. Somit wirkt bei maximaler Verformung eine Spannung von ca. 150MPa je Draht und liegt damit im Bereich des zulässigen Wertes.

Die Drähte werden beim Einbau, zusätzlich zu ihrer Zweiwegdehnung von 2,5%, um weitere 1,7% gedehnt. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass sie genügend Kraft zur maximalen Verformung des Tragflügels bei der Kontraktion aufbringen.

4.2.5 Beschreibung der Messgeräte und Bauelemente

In diesem Kapitel sind die wichtigsten Geräte zur Erfassung und Steuerung des adaptiven Tragflügels aufgelistet.

- **Formgedächtnislegierung**
  6 NiTi-Drähte je Abschnitt mit 2,5% - Zweiwegeffektlängenänderung
  Einbaulänge = 100mm; Drahtdurchmesser = 0,29mm;
  Übergangstemperaturen : A_s = 55 °C, A_f = 65 °C, M_s = 60 °C, M_f = 45 °C

- **CIO-EXP-Bridge16 der Firma ComputerBoards**
  16 Eingänge zur Erfassung der Deformation der Dehnungsmessstreifen (DMS); Messung der DMS in Halb- und Vollbrückenschaltung; Speisespannung 5V; Ausgangssignalverstärkung x1, x10, x100, x1000.

- **CIO-DAS16jr der Firma ComputerBoards**
  12bit A/D-Wandlerkarte zur Messung der Winkelstellung der Lamellen und der Verformung der DMS über die CIO-EXP-Bridge 16; max. Abtastrate 130kHz; 16 single ended oder 8 differential Eingänge.

- **CIO-DAC16 Firma ComputerBoards**
  12bit D/A-Wandlerkarte mit 16 anlogen Ausgängen; Ausgangsspannungen, 0...10V, 0...5V, -10...10V, -5...5V (4-20mA)
  Zur Ansteuerung der Halbleiterrelais.

- **3 Halbleiterrelais des Typs D1D10 vom Hersteller CryDom**
  Die verwendeten Relais sind für Schaltströme bis 10A und Schaltspannungen bis 100V ausgelegt. Die Relais dienen zum Ein- und Ausschalten des Heizstromes in den Formgedächtnisdrähten.

- **Dehnungsmessstreifen der Firma HBM**
  Foliendehnungsmessstreifen des Typs 1-LY11-10/120 zur Erfassung der Verformung der jeweiligen Teilstücke am Tragflügel. Zwei DMS je Teilstück, die mit den Ergänzungswiderständen auf der CIO-EXP-Bridge 16 geschaltet sind.

- **Netzgerät PCY 120-60 der Firma Heinzinger**
  Hochpräzises doppelstabilisiertes, lineargeregeltes Universalnetzgerät zur Versorgung der Formgedächtnisdrähte mit Heizstrom.
  Ausgangsspannung bis 120V; Ausgangsstrom bis 60A.

- **Host-Computer**
  AMD-K6 350MHz, 128MB Arbeitsspeicher, Windows NT
  Zur Erstellung des Regelungsalgorithmus.

- **Target-Computer**
  AMD-K6 350MHz, 98MB Arbeitsspeicher, DOS mit RealLink32 Software
  Zur Durchführung der Regelung.

4.2.6 Versuchsdurchführung und Resultate

Das Modell des adaptiven Tragflügels mit dem angepassten Regelalgorithmus wird hinsichtlich seiner Regelbarkeit und Regelgenauigkeit untersucht. Die Verformung der drei Teilstücke wird über die elektrische Spannung der DMS erfasst. Diese wird genutzt, um einen guten Vergleich von Soll- und Istwert zu erhalten. Dazu wird die elektrische Spannung, als Wert für die Krümmung der Teilstücke, als Sollwert vorgegeben und mit dem Istwert der DMS verglichen. Es werden 3 Untersuchungen durchgeführt, wobei die Sollwerte vom Computer vorgeben werden.

Bei den ersten beiden Untersuchungen wird eine sprungförmige Sollvorgabe mit jeweils unterschiedlichen Heizspannungen U_0 vom Netzgerät gewählt. Dies ermöglicht eine Messung der Reaktionszeit des Systems. Die dritte Untersuchung wird mit einer rampenförmigen Sollvorgabe durchgeführt. Hierbei wird untersucht, wie gut das Modell der Sollvorgabe folgen kann.

In Abbildung 4.15, Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 sind die Kurvenverläufe der einzelnen Teilabschnitte des Tragflügels mit I, II und III bezeichnet und die Indices geben die Kurve des Sollwerts (s) bzw. des Istwertes (i) an.

Sprungförmige Sollvorgabe

Die Abbildung 4.15 zeigt das Verhalten des Tragflügels bei einer eingestellten Heizspannung von 2,5V. Dabei fließt in jedem einzelnen Formgedächtnisdraht ein Strom von 0,48A, d.h. bei jedem Puls wird ein Formgedächtnisdraht mit einer Leistung von 1,2W beheizt. Für einen Teilabschnitt wird daher eine Leistung von 7,2W je Puls benötigt.

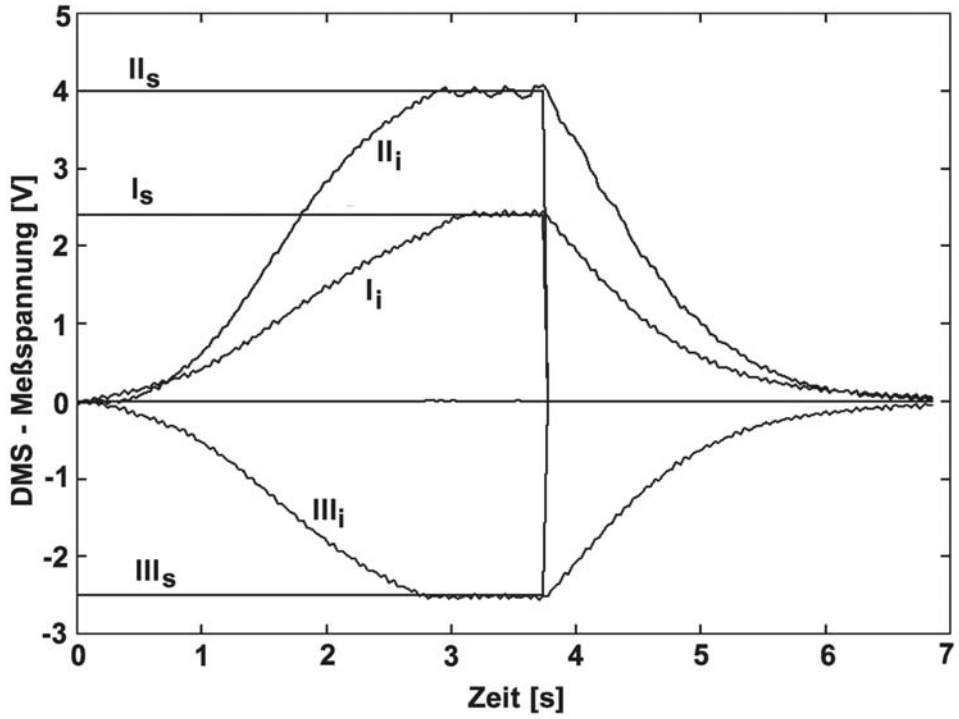


Abbildung 4.15: Regelung bei einer anliegenden Spannung von 2,5V

Die vorgegebenen Sollwerte liegen im Teilabschnitt I bei +2,4V, im Teilabschnitt II bei +4V und im Teilabschnitt III bei –2,5V. Die Vorzeichen sind bedingt durch die jeweilige Verformungsrichtung. Die Sollvorgabe von 4V entspricht der maximal möglichen Verformung eines Tragflügelabschnittes; dabei wird ein Biegewinkel von ca. 45° erreicht. Abbildung 4.16 zeigt die maximale Verformung des hinteren Teilabschnittes III. Die Sollwertvorgaben der anderen Abschnitte entsprechen einem Winkel von ca. 28°.

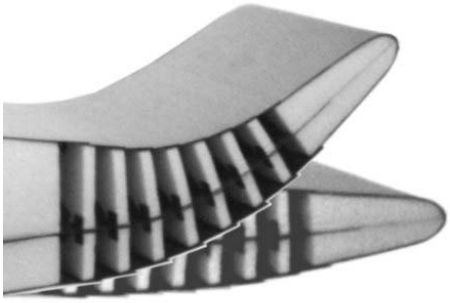


Abbildung 4.16: Hinterkante des Tragflügels im Abschnitt III (gerade und maximal gebogen)

Die eingestellten Sollwerte werden beim Zeitpunkt t=0s gesetzt (Abbildung 4.15). Der adaptive Tragflügel ist zu diesem Zeitpunkt gerade, daher haben die Istwerte die

DMS-Spannung von 0V. Die Zeitdauer bis zum Erreichen der Sollvorgabe liegt bei 2,8s. In der Abbildung ist zu erkennen, dass es in den einzelnen Teilabschnitten kleine Schwankungen des Istwertes um den Sollwert gibt. Diese sind aber sehr klein und mit dem Auge am Tragflügel nicht sichtbar und daher für diesen Anwendungsfall tolerierbar. Bei 3,8s wurde der Sollwert auf 0V geändert, d.h. der Flügel soll in seine gerade Ausgangsform zurückkehren. Diese wird nach 3s erreicht.

Im zweiten Versuch werden die gleichen Sollwerte vorgegeben, nur die eingestellte Heizspannung U_0 am Netzgerät wird auf 4V erhöht. Dabei fließt ein Strom von 0,77A durch jeden Draht. Das entspricht einer Heizleistung von 18,6W je Puls für einen Teilabschnitt. Durch die 2,5-fache Erhöhung der Heizleistung werden die geforderten Sollwerte in 1,4s und somit in der Hälfte der Zeit erreicht. Die Erhöhung der Heizleistung hat ein leichtes Überschwingen zur Folge. Durch eine Verkleinerung der Abtastrate kann dies vermieden werden. Bei einer Zeit von 2,4s wird der Sollwert auf 0V geändert. Die Istwerte brauchen ca. 5s, bis sie diesen Wert erreicht haben, da die Formgedächtnisdrähte abkühlen müssen.

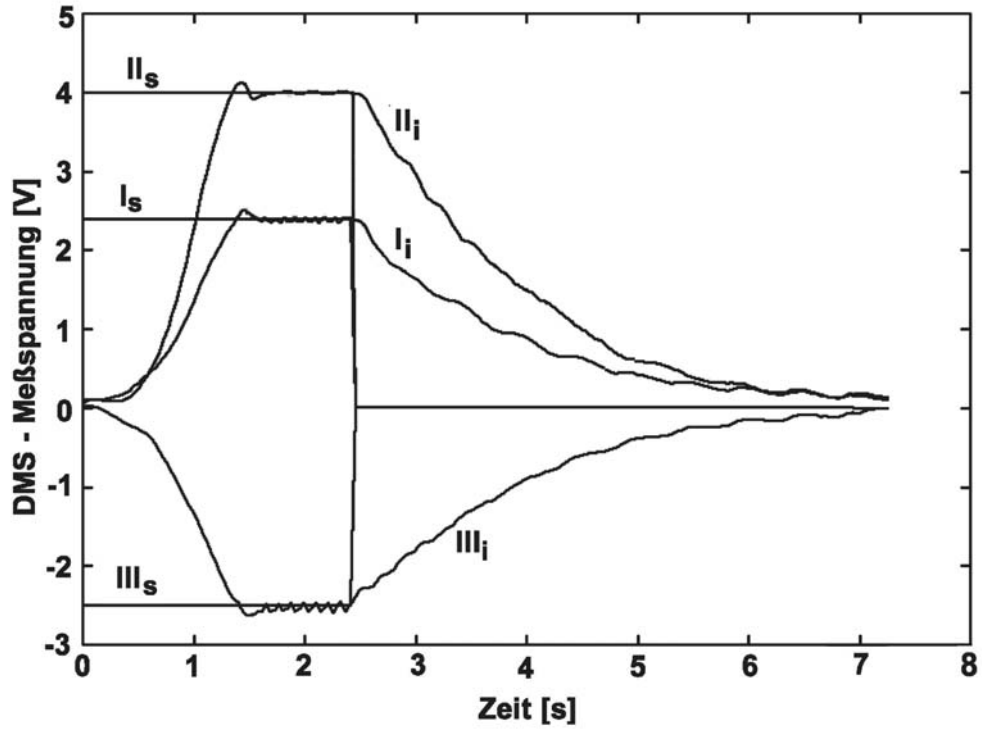


Abbildung 4.17: Regelung bei einer anliegenden Spannung von 4V

In der Gegenüberstellung mit dem ersten Versuch braucht der Tragflügel 2s länger bis er wieder gerade ist. Das ist damit zu begründen, dass am Anfang der Erwär-

mung mehr Energie in das System fließt. Die höhere Wärmeleitung führt in den Haltern, in die die Formgedächtnisdrähte geklemmt sind, zu einer starken Erwärmung. Geben diese dann die Wärme wieder an die Drähte zurück, dauert die Abkühlung länger.

Die Versuche zeigen auch eine Schwäche der Formgedächtnislegierung: ihr langsames Abkühlverhalten. Dadurch sind keine hohen Frequenzen in der ständigen Änderung zwischen maximaler und minimaler Verformung möglich. So kann das Heizen bis zur maximalen Verformung im Millisekundenbereich liegen, die Abkühlgeschwindigkeit hängt aber von dem Wärmeaustauschkoeffizienten zwischen Formgedächtnisdraht und Umgebung ab.

Rampenförmige Sollvorgabe

Im dritten Versuch liegt die Besonderheit des Regelalgorithmus, und zwar das präzise Nachfahren und Halten von Verformungen des Tragflügels durch die Formgedächtnisdrähte. Abbildung 4.18 zeigt diesen Versuch für eine am Netzgerät fest eingestellte Heizspannung von 2,5V.

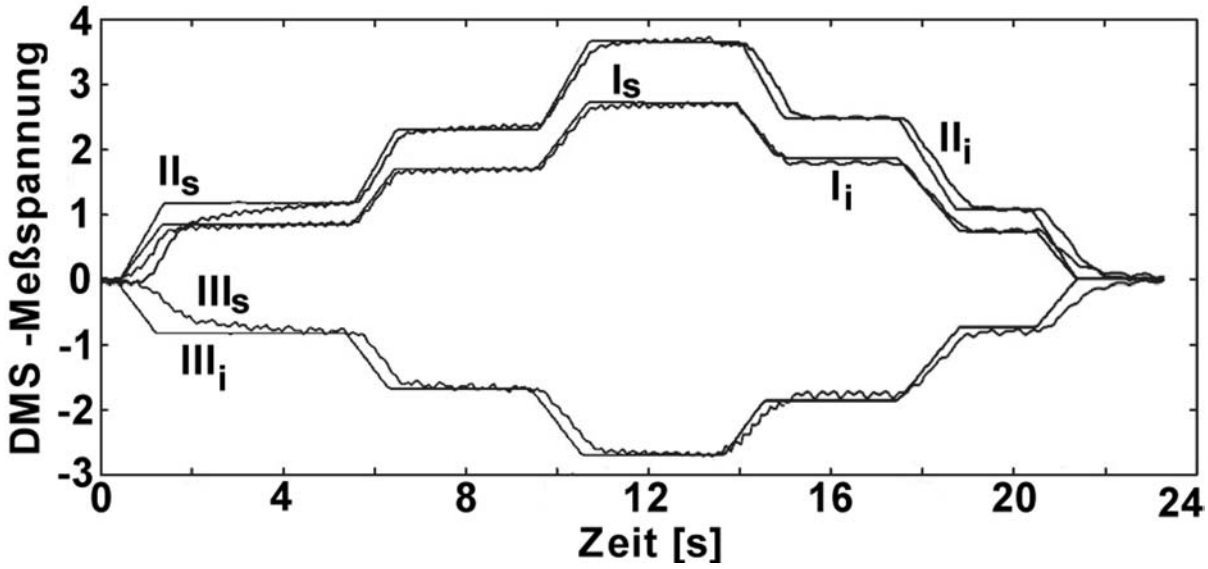


Abbildung 4.18: Rampenförmige Vorgabe der Sollwerte

Für jeden Teilabschnitt (I, II, III) wurden rampenförmige Sollwerte vorgegeben und bei einem festgelegten Wert für einige Sekunden festgehalten. Der Tragflügel hat zu Beginn des Versuches eine gerade Form, so wie dies auch vom Sollwert (alle 3 Teil-

bereiche 0V) gefordert wird. Die einzustellenden Sollwerte und Zeiten sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2: Vorgegebene Sollwerte

Zeiten [s]	Sollwert des Teilabschnittes [V]		
	I	II	III
0 ... 0,3	0	0	0
0,3 ... 1,3	von 0 auf 0,8	von 0 auf 1,2	von 0 auf -0,8
1,3 ... 5,3	0,8	1,2	-0,8
5,3 ... 6,3	von 0,8 auf 1,8	von 1,2 auf 2,4	von -0,8 auf -1,8
6,3 ... 9,3	1,8	2,4	-1,8
9,3 ... 10,3	von 1,8 auf 2,8	von 2,4 auf 3,7	von -1,8 auf -2,8
10,3 ... 13,6	2,8	3,7	-2,8
13,6 ... 14,6	von 2,8 auf 1,9	von 3,7 auf 2,5	von -2,8 auf -1,9
14,6 ... 17,5	1,9	2,5	-1,9
17,5 ... 18,5	von 1,9 auf 0,7	von 2,5 auf 1,1	von -1,9 auf -0,7
18,5 ... 20,4	0,7	1,1	-0,7
20,4 ... 21,4	von 0,7 auf 0	von 1,1 auf 0	von -0,7 auf 0
21,4 ... 23,5	0	0	0

Es ist zu erkennen, dass der Istwert dem Sollwert gut folgt. Bei Beginn der Messung ist das System noch etwas träge, da 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 liegt im Bereich von einer Zehntelsekunde. Auch die Haltepunkte der Strukturverformung werden exakt eingestellt. Beim Rückstellen der Verformung sind die gleichen Ergebnisse festzustellen. Nur bei der letzten Rampe ist wieder ein trägeres Verhalten sichtbar. 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 der Formgedächtnisdraht (Abbildung 4.4) in die Nähe der Umgebungstemperatur (T_0=23°C), verlangsamt sich die Abkühlung des Drahtes und damit die Rückstellung seiner Deformation.

4.2.7 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass es durch die geeignete Auswahl der Formgedächtnislegierung und eines angepassten Regelalgorithmus möglich ist, exakte Regelungen von Formgedächtnislegierungen durchzuführen. Die Regelung der Drähte mittels Pulsmodulation ermöglicht es, jede gewünschte bzw. optimale Form einzustellen. Das hier eingesetzte Modell des adaptiven Tragflügels reagiert automatisch auf die sich ändernde Anströmung und ändert seine Profilform entsprechend der vorgegeben Sollform.

Die Schwingungen des Istwertes um den Sollwert können durch weitere Optimierungen des Proportionalglieds, des Integralglieds, der Pulsweite und der Heizspannung vermindert werden. Dabei ist besonders auf die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Faktoren zu achten.

Bei der sprungförmigen Sollvorgabe wird durch eine Erhöhung der Heizspannung der vorgegebene Sollwert schneller erreicht, dies bedeutet, dass die Zeitdauer für das Erreichen der Verformungssollwerte vom Betrag der hineingesteckten Joule´schen Wärme abhängt. Es ist jedoch wichtig, die Abkühlphase zu berücksichtigen, da sich durch die erhöhte Energiezufuhr am Anfang die Umgebung und die Kontaktstellen um die Formgedächtnisdrähte stärker erwärmen. Dies führt zu einer längeren Abkühlzeit. Beide Versuche mit sprungförmiger Sollvorgabe zeigen, dass ein Zyklus (gerader → verformter → gerader Tragflügel) die gleiche Zeitspanne aufweist. Daher ist je nach Anwendungsfall abzuwägen, ob sich eine erhöhte Energieaufwendung rentiert, um eine schnellere Verformung zu erzielen oder ob diese nicht nötig ist.

Beim rampenförmigen Versuch liegt der Istwert relativ dicht am Sollwert und kann ihm an den Rampen gut folgen. Am Anfang, wenn der Formgedächtnisdraht noch bei Raumtemperatur vorliegt, hängt der Istwert dem Sollwert nach. Der Draht hat zu diesem Zeitpunkt eine Temperatur von 23°C und muss auf ca. 55°C (Abbildung 4.14) beheizt werden, bevor die Längenänderung und damit Phasenumwandlung von Martensit zu Austenit einsetzt. Dies führt zu dem verzögerten Anlauf und kann nur behoben werden, wenn die Drähte mit ca. 40°C vorgewärmt werden. Dies würde aber zu einem erhöhten Energiebedarf des Systems führen.

Bei der schrittweisen Rückstellung der Verformung ist die Rampe nicht zu steil, so dass der Istwert gut auf dem Sollwert liegt. Die Formgedächtnisdrähte haben genügend Zeit, die Wärme an die Umgebung abzugeben. Bei sehr flachen Abkühlrampen

bzw. bei langsamen Verformungsrückstellungen müssen die Drähte entsprechend zwischenbeheizt werden, da andernfalls der Istwert den Sollwert unterschreitet. Wie wichtig der Wärmegradient ist, zeigt die letzte Abkühlrampe. Hier ist der Temperaturunterschied zwischen den Drähten und der Luft nicht mehr so groß, so dass die Drähte länger zum Abkühlen brauchen. Dies hat zur Folge hat, dass der Istwert dem Sollwert nicht mehr folgen kann. Daher müssten an dieser Stelle die Drähte unterstützend gekühlt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass ein Regler mit einem Proportional-Integralglied mit fest eingestellten Koeffizienten für die Einhaltung der Sollwerte ein gutes Führungsverhalten erzeugt. Die Proportionalkoeffizienten haben aber je nach Abschnitt unterschiedliche Werte, da hier die Bauform Einfluss auf die Regelung nimmt.

Es ist abschließend festzustellen, dass der Einsatz und die Regelung von adaptiven Strukturen mit Formgedächtnislegierungen, wie beim Modell des adaptiven Tragflügels, möglich sind und gut funktionieren. Die Möglichkeit, dass sich eine gesamte Tragfläche der Strömung optimal anpasst, wird sicherlich erst in 20 bis 30 Jahren erfolgen. Kleinere Bereiche der Anpassung der Tragfläche, wie Landeklappen, Wölbungen auf der Außenhaut oder Winglets, sind aber durchaus denkbar. Dies soll das Anwendungsbeispiel im Kapitel 4.3 verdeutlichen.

4.3 Modell II - Adaptives Winglet

4.3.1 Vorbetrachtungen

Winglets sind an den Enden der Tragflächen moderner Flugzeuge angebrachte Verlängerungen, die entweder, wie bei den neuen Flugzeugen von Boeing oder bei den großen Flugzeugen von Airbus (Airbus A330 oder Airbus A340), schräg nach oben zeigen oder, wie bei den kleineren Airbus-Flugzeugen (Airbus A320), nach oben und unten angeordnet sind. Abbildung 4.19 zeigt die erste Boeing mit starren Winglets.

Abbildung 4.19: Boing 737-33A mit Winglets der Airline Air Plus Comet [53]

Die größten Winglets hat die Boeing 737-800 mit einer Höhe von 2,40 Meter. Sie bestehen aus Aluminium und haben verstärkte Flügelspitzen. Winglets sind gleichermaßen an Kurzstreckenjets als auch an großen Interkontinentalflugzeugen, aber auch an Segelflugzeugen zu finden. Neue Flugzeug-Typen werden meist sofort damit ausgerüstet, ältere umgebaut. Winglets sind keine moderne Erfindung der heutigen Zeit, es gab bereits vor dem zweiten Weltkrieg Fluggeräte mit ähnlichen Winglets.

Luftwirbel, die am Ende der Flugzeugflügel entstehen (Abbildung 4.20) und den Luftwiderstand erhöhen, sind die am meisten störenden Faktoren in der Luftfahrt. Sie entstehen beim Auftrieb durch den Ausgleich der Überdruckluft auf der unteren und dem Niederdruckbereich auf der oberen Flügelseite. Zwei entgegengesetzt kreiselnde Wirbel bilden eine Art Mini-Tornado, den das Flugzeug hinter sich her zieht. Je größer die Wirbel, desto mehr Energie muss das Flugzeug aufwenden, um vorwärts zu kommen.

Bisher werden die Winglets nicht verstellt, sondern sind lediglich starr an den Flügelenden befestigt. Sie sind so ausgelegt, dass sie beim Erreichen der Reiseflughöhe optimal zur Reduzierung des Kerosinverbrauchs eingestellt sind und können nicht auf sich ändernde Strömungs- und Flugbedingungen, wie Gewichtsabnahme durch den Kerosinverbrauch, Temperaturänderung, Kurvenflüge, Start und Landung, reagieren. Mit starren Winglets kann eine Verbesserung der Flugleistung von fünf bis zehn Prozent gegenüber herkömmlichen Flügeln erreicht werden. Dies geschieht durch günstige Verteilung des Abwindfeldes, das durch die freien Wirbel hinter der Tragfläche erzeugt wird. So kann der induzierte Widerstand verkleinert werden. Zusätzlich sorgen Winglets für eine bessere Leistung im Steigflug eines Flugzeuges. Außerdem wird der Lärm bei Start und Landung reduziert und die Maschine braucht kürzere Start- und Landebahnen.

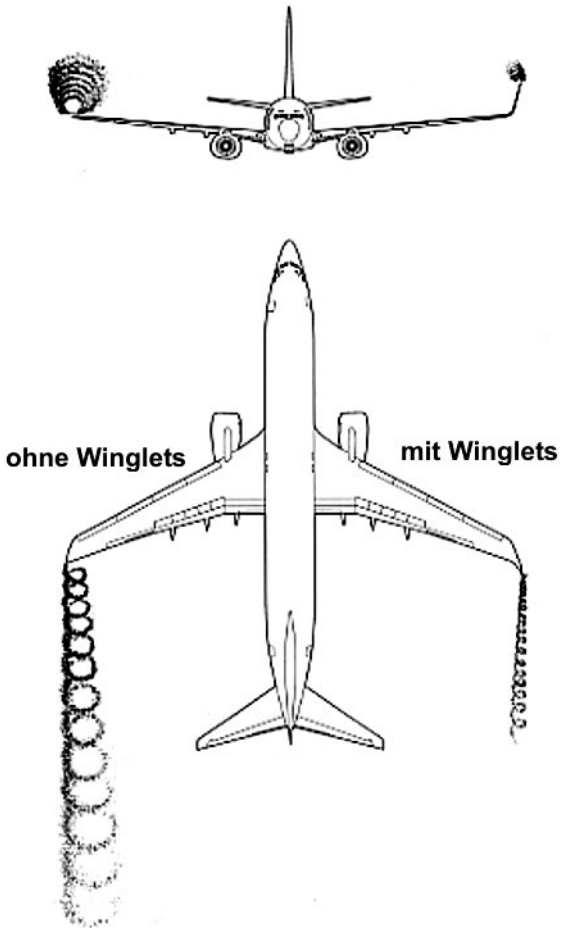


Abbildung 4.20: Darstellung der Luftwirbel am Ende der Tragfläche mit und ohne Winglet [54]

Durch ein adaptives Winglet lässt sich die Flugleistung weiter verbessern, da sich das Winglet optimal und automatisch auf die vorliegende Flugsituation einstellt. Wie

beim adaptiven Tragflügel werden zur Veränderung der Form des Winglets Formgedächtnislegierungen eingesetzt. Dabei soll das konstruierte adaptive Winglet beliebige Formen bzw. Stellungen einnehmen. Auch hier müssen die eingesetzten Formgedächtnisdrähte nicht nur die beiden Extremzustände der minimalen austenitischen und maximalen martensitischen Dehnung einnehmen, sondern ebenso jeden dazwischenliegenden Dehnungszustand. Wegen der Temperaturabhängigkeit der Dehnung lassen sich die Formgedächtnisdrähte durch elektrisches Heizen regeln. Je nach Heizleistung erwärmen sie sich stärker oder schwächer. Das Konzept der Regelung aus Kapitel 4.2 wurde für das adaptive Winglet übernommen. Lediglich die Einstellparameter mussten geändert werden.

Für das Winglet wurde für Messen und Ausstellungen ein transportabler Windkanal gebaut. Dieser lieferte bisher kein gleichmäßig verteiltes Strömungsfeld und konnte aus zeitlichen Gründen noch nicht optimiert werden. Dadurch ist es nicht möglich, das Winglet anhand der Auftriebs- und Widerstandskraft zu regeln, da diese zu stark schwanken. Deshalb wurde von der automatischen Anpassung des Winglets durch die Verbesserung der Auftriebskraft als Regelgröße abgesehen und der Anstellwinkel der Tragfläche im Windkanal als Messgröße für die Sollvorgabe herangezogen.

4.3.2 Modellbeschreibung und Versuchsstand

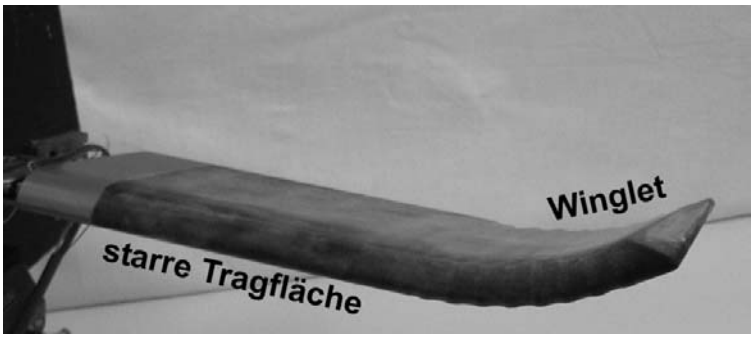


Abbildung 4.21: Tragflügel mit adaptivem Winglet

Abbildung 4.21 zeigt die Tragfläche eines Flugzeuges mit einer aerodynamischen Profilform, an deren Ende sich das adaptive Winglet befindet. Die Tragfläche mit Winglet hat eine Breite von 175mm und beträgt an der höchsten Stelle 30mm. Das Modell hat eine Gesamtlänge von 370mm, wobei das Winglet davon 160mm aufweist. Die starre Tragfläche (Abbildung 4.22) besteht komplett aus Balsaholz, um so

ein möglichst geringes Eigengewicht des Modells zu realisieren. An der starren Tragfläche befindet sich auf der einen Seite die Befestigungsmöglichkeit für den Versuchsstand und auf der anderen die Verschraubungsmöglichkeit für das Winglet. Innerhalb der Tragfläche existiert ein Kanal für die Zuleitungen (4).

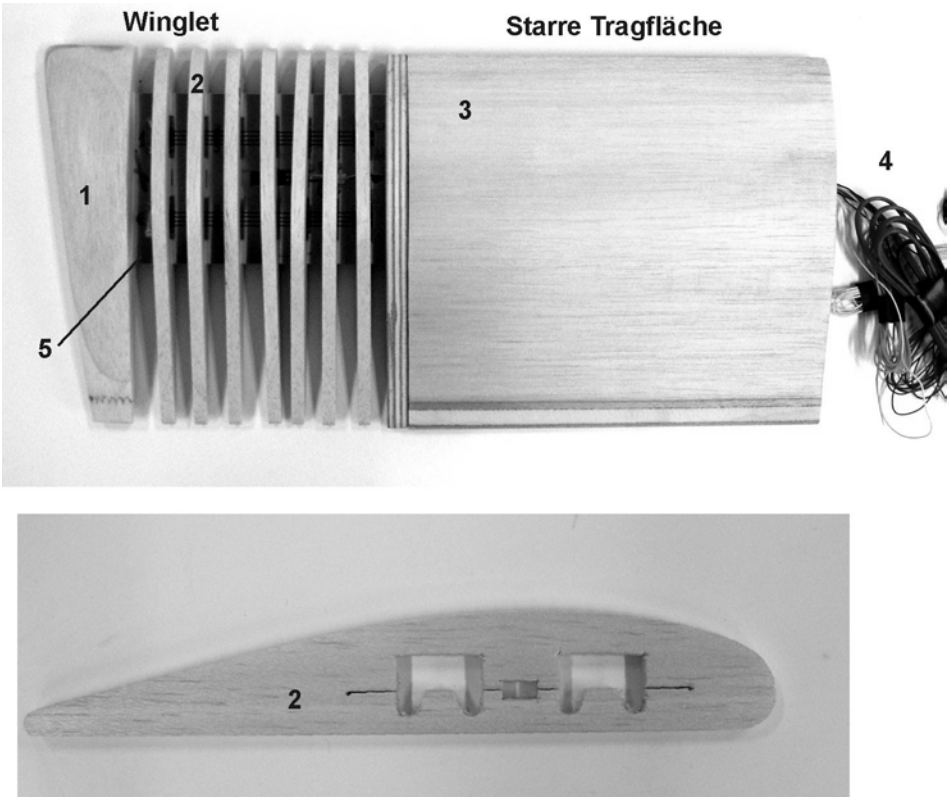


Abbildung 4.22: Tragfläche mit Winglet ohne Umhüllung (oben), einzelner Steg (unten)

Das Kernstück des Winglets ist ein Federblech (5) mit einer Länge von 170mm, einer Breite von 80mm und einer Blechdicke von 0,3mm. Auf dem Blech (5) sind die gesamten Aufbauten, wie die sieben Stege (2) aus Balsaholz und an der Außenseite das Wingletabschlussstück (1), montiert. Das Wingletabschlussstück (1), ebenfalls aus Balsaholz, verspitzt sich nach außen und ist an den Kanten abgerundet. Die Stege (2) sind 5mm dick und haben in ihrem Inneren drei Aussparungen, um dort die weiteren Bauteile im Inneren des Winglets anzubringen. Sie werden bei der Montage auf das Federblech geschoben, dort verklebt und haben zueinander einen Abstand von 10mm. Die Stege (2) und ihr Abstand sind so gewählt, dass das Winglet die entsprechenden Bewegungen vollführen kann. Des Weiteren sind auf dem Blech (5) acht Formgedächtnisdrähte (6) in Längsrichtung der Tragfläche angebracht. Abbildung 4.23 zeigt das Federblech mit den montierten Formgedächtnisdrähten (6), wobei die Stege (2) zur starren Tragfläche verschoben wurden. Daher ist nur die

Hälfte des Bleches (5) dargestellt. Der komplette Aufbau ist in der schematischen Darstellung der Abbildung 4.25 zu sehen.

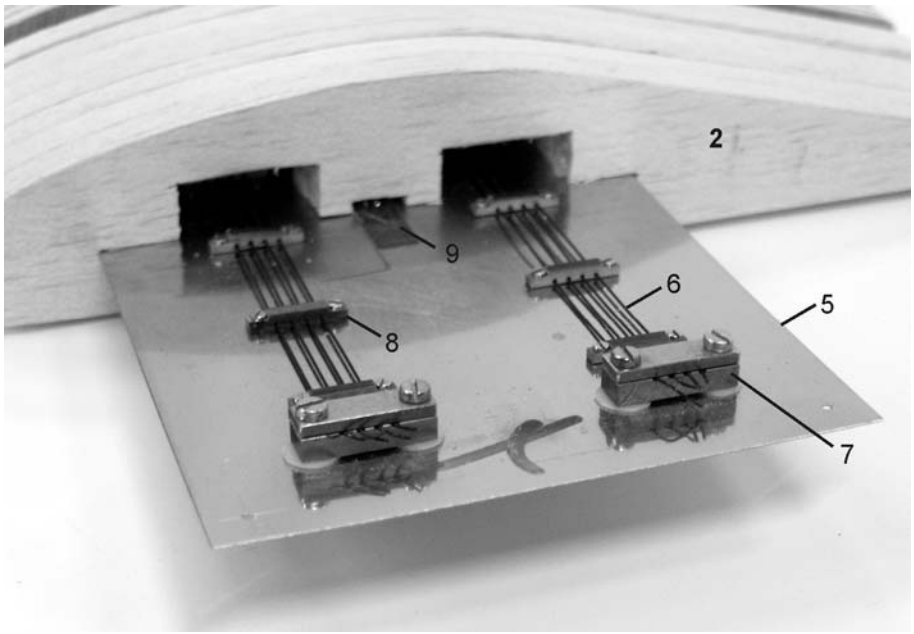


Abbildung 4.23: Federblech mit Aufbauten

Die Formgedächtnisdrähte sind in Klemmsteinen (7) zu je zwei Paketen mit vier Drähten zusammengefasst. Das hat den Vorteil, dass die Pakete außerhalb auf einer Vorrichtung montiert werden können und alle Drähte die gleiche Vordehnung erhalten. Dadurch ziehen sämtliche Drähte (6) beider Pakete gleichmäßig und es kommt zu keiner Verdrehung des Bleches (5). Die Formgedächtnisdrähte (6) werden zusätzlich durch fünf Pertinaxhalter (8) - ein Hartgewebematerial - je Paket geführt. Diese haben vier 0,4mm Bohrungen, in denen die Formgedächtnisdrähte freibeweglich und in geringem Abstand zum Blech (5) gehalten werden. Durch die Führung der Drähte in den Pertinaxhaltern (8) kann eine stärkere Verformung des Federbleches (5) realisiert werden. Die Erhöhung der Anzahl der Drähte (6) von sechs auf acht Stück und die optimierte Montage gegenüber dem adaptiven Tragflügel ermöglichen eine größere Verformung des Federbleches (5). So erbrachten Vorversuche eine Verformung des Bleches (5) bis zu einem Winkel von 70°. Abbildung 4.24 zeigt das unummantelte Winglet in der geraden Form und in der maximalen Verformung.

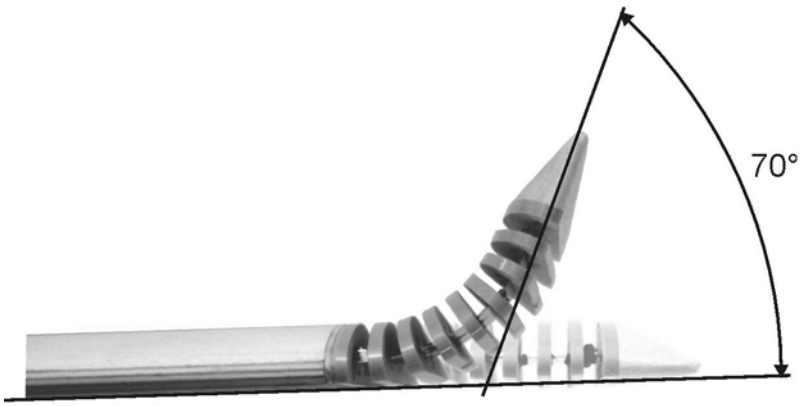


Abbildung 4.24: Unummanteltes Winglet in gerader und gekrümmter Form

Bei den verwendeten Formgedächtnisdrähten (6) werden die gleichen Zweiweg-NiTi-Drähte wie beim adaptiven Tragflügel in Kapitel 4.2 benutzt. Die entsprechenden Parameter sind dort zu entnehmen. Die Drähte werden bei tiefer Temperatur - in der Martensitstruktur – zusätzlich zu der 2,5%igen Zweiwegdehnung um 1,7% gedehnt und erhalten so eine Einbaulänge von 100mm. Auf der Ober- und Unterseite des Federbleches (5) befindet sich jeweils ein Dehnungsmessstreifen (9) zur Messung der Verformungen. Die elektrische Stromzufuhr und damit das Beheizen der Formgedächtnisdrähte (6) erfolgt durch elektrische Zuleitungen (4) an den Klemmsteinen von der Unterseite des Bleches (5). Sowohl die Klemmstücke (7) als auch die Halter (8) sind elektrisch vom Federblech (5) isoliert, so dass der Stromfluss ausschließlich über die Formgedächtnisdrähte (6) erfolgt.

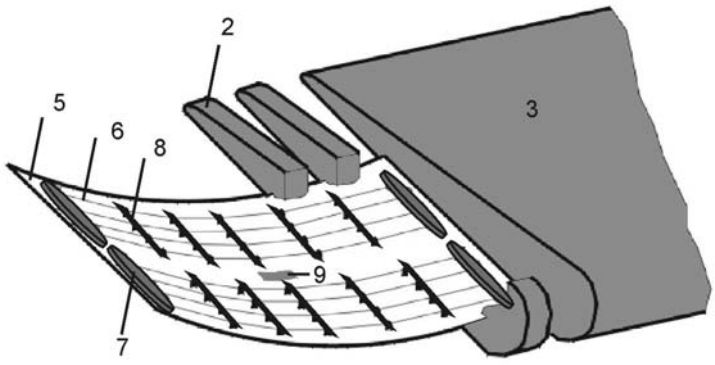


Abbildung 4.25: Schematische Darstellung des adaptiven Winglets

Ist das Winglet vollständig montiert, so wird eine gummiartige Außenhaut (Abbildung 4.21) auf die Struktur gezogen, die ihr aerodynamische Eigenschaften verleiht. Die Außenhaut ist so elastisch, dass sie die Verformungen des Winglets nicht behindert. Damit die Außenhaut auch bei einer Verformung des Winglets an den Stegen anliegt, wird sie mit diesen Stegen verklebt.

Der komplett zusammengebaute Tragflügel (3) wird durch den Befestigungswinkel (10) und zwei Schrauben (Abbildung 4.26) am Versuchsstand montiert. Der Winkel (10) befindet sich auf einem Federblech (11), auf welches jeweils ein Dehnungsmessstreifen (12) auf Ober- und Unterseite zur Messung der Auftriebskraft geklebt ist. Zu diesem Federblech (11) befindet sich in einem Winkel von 90° ein zweites Federblech (13) mit jeweils einem Dehnungsmessstreifen (14) auf der Ober- und Unterseite zur Messung der Widerstandskraft.

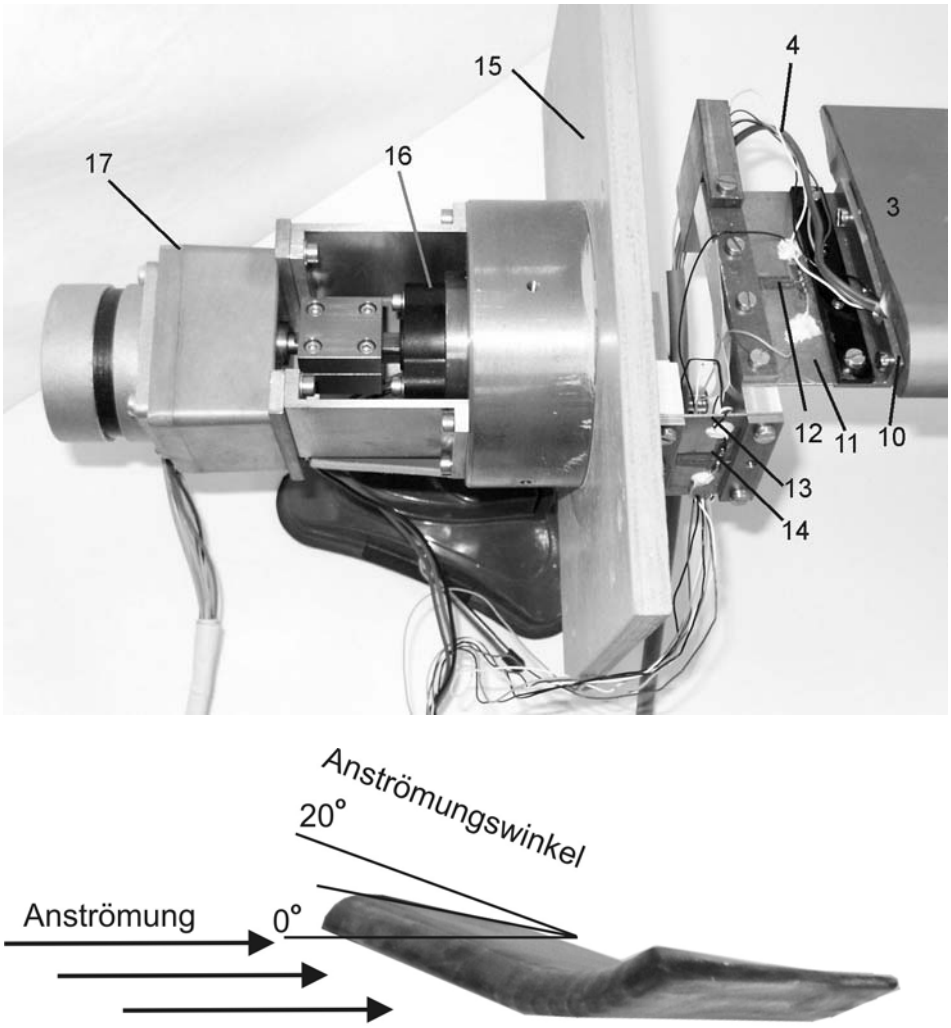


Abbildung 4.26: Fertig montierter Tragflügel mit Winglet am Versuchsstand (oben)
Anströmung des Tragflügels mit Winglet (unten)

Über die Zuleitungen (4) erfolgen die Messwerterfassung der Dehnungsmessstreifen (9, 12, 14) und die elektrische Beheizung der Formgedächtnisdrähte (6).

Damit der Tragflügel seine Stellung im Windkanal verändert, ist auf der linken Seite ein Schrittmotor (17) angebracht, der den Anströmungswinkel von 0° bis 20° variiert (Abbildung 4.26). Die Erfassung des Anströmungswinkels erfolgt über ein Drehpotentiometer (16), welches sich zwischen dem Schrittmotor und dem Tragflügel mit Winglet befindet. Die Schrittmotorstellung und damit der Anströmungswinkel kann mittels eines Joysticks oder vom Computer vorgegeben werden. Durch die Montageplatte (15) wird der rechte Teil mit dem Flügel in die Messstrecke des Windkanals eingebaut. Der linke Teil mit dem Motor verbleibt außerhalb des Windkanals.

Abbildung 4.27: Transportabler Windkanal

Die Abbildung 4.27 zeigt den transportablen Windkanal (18), welcher für Messen und Ausstellungen angefertigt wurde. Er befindet sich auf zwei Rollschränken (20), in denen die Computer und die Elektronik untergebracht sind. In der durchsichtigen Messstrecke (19) befindet sich der in Abbildung 4.26 dargestellte Versuchsstand. Der Windkanal erzeugt eine Strömungsgeschwindigkeit von maximal 12m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit ist über den Querschnitt der Messtrecke nicht gleichmäßig verteilt und variiert von 8 bis 12m/s. Daher ist eine Regelung mit der Verringerung des Widerstandes bei gleichem Auftrieb über die Verformung des Winglets momentan noch nicht möglich, da die Messwerte zu stark schwanken, wenn der Flügel seine Stellung zur Strömung ändert.

Über die Schaltbox (21) können verschiedene Regelungsmodule angesprochen werden. Sie werden in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

4.3.3 Regelung des Winglets

Für die Regelung des adaptiven Winglets werden der gleiche Regelalgorithmus und dieselbe Pulsmodulation wie beim adaptiven Tragflügel verwendet. Daher wird an dieser Stelle auf die Beschreibung des Regelalgorithmus und der Pulsmodulation im Kapitel 4.2.3 verwiesen.

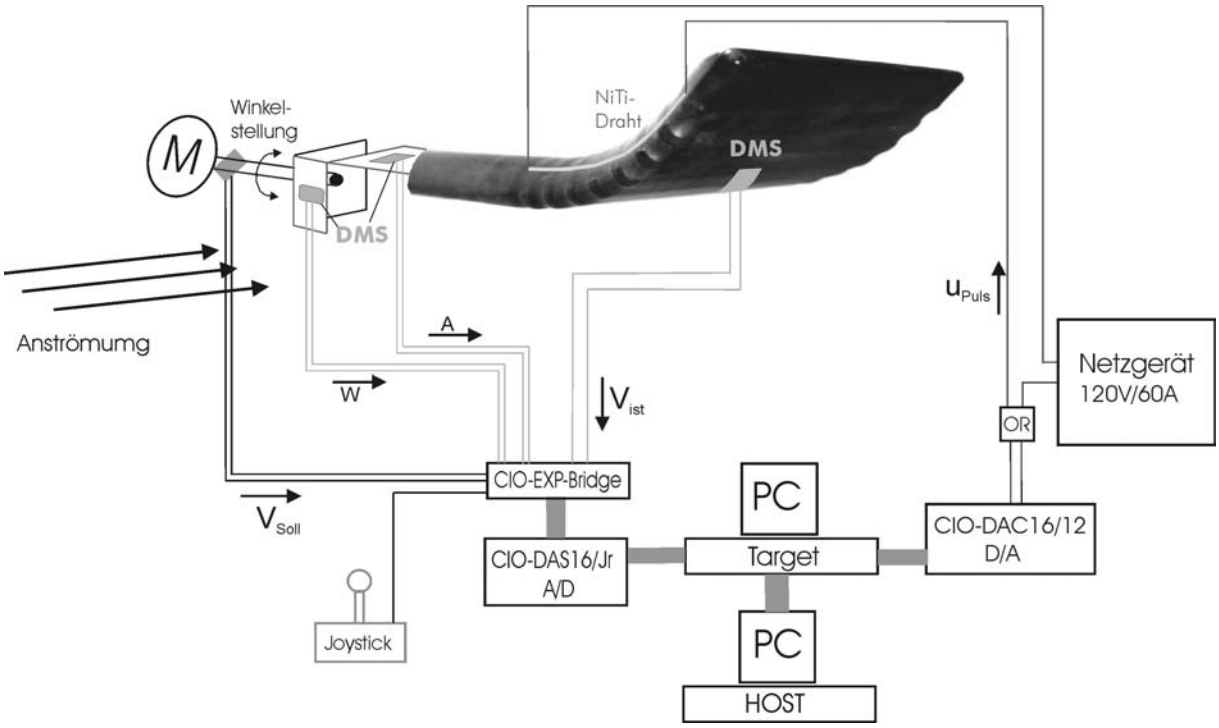


Abbildung 4.28: Messaufbau für die Regelung

In Abbildung 4.28 ist der für die Regelung benötigte Messaufbau dargestellt. Der zu entwickelnde Regelkreis soll die Verformungen des Winglets beeinflussen und anhand der Differenz zwischen Sollwert ($V_{Soll)}$ und Istwert (V_{Ist}) die elektrische Heizleistung in den Formgedächtnisdrähten ändern.

Wie beim adaptiven Tragflügel, ist es das Ziel, den Sollwert und damit die Verformung des Winglets möglichst schnell einzustellen. Der Sollwert ergibt sich aus dem Anstellwinkel (Winkelstellung des Potentiometers) des Tragflügels zur Strömung. Die Winkelstellung wird über eine A/D-Karte (CIO-DAS16/Jr mit CIO-EXP-Bridge) eingelesen und in den benötigten Verformungswert des Winglets umgerechnet. Der Ver-

formungswert ist eine errechnete Sollwertspannung, die entsprechend für das Brückensignal der Dehnungsmessstreifen aufbereitet ist. Der Istwert folgt aus der vorhandenen Wingletverformung. Diese wird durch die Abfrage der Dehnungsmessstreifen erfasst und über die A/D-Karte (CIO-DAS16/Jr mit CIO-EXP-Bridge) an den Target-Computer übermittelt. Im Target-Computer befindet sich der kompilierte Regelalgorithmus, der im Kapitel 4.2.3 bereits beschrieben wurde. Dieser ermittelt die Abweichung zwischen Soll- und Istwert und ändert die Pulsweite zur Beheizung der Formgedächtnisdrähte.

Die Beheizung der Formgedächtnisdrähte erfolgt über ein externes Netzgerät, welches eine konstante Heizspannung U_0 an jeden Draht liefert. Die errechnete Pulsweite wird über die D/A-Karte (CIO-DAC16/12) an das Halbleiterrelais weitergeleitet, das den Stromkreis, über den die Formgedächtnisdrähte beheizt werden, ein- und ausschaltet. Die so veränderbare Mittelheizspannung $\overline{U}$ ermöglicht, wie beim adaptiven Tragflügel, jede mögliche Winkelstellung des Winglets (0°...70°), da über die Joule´sche Erwärmung die Deformation der Formgedächtnisdrähte variabel einstellbar ist.

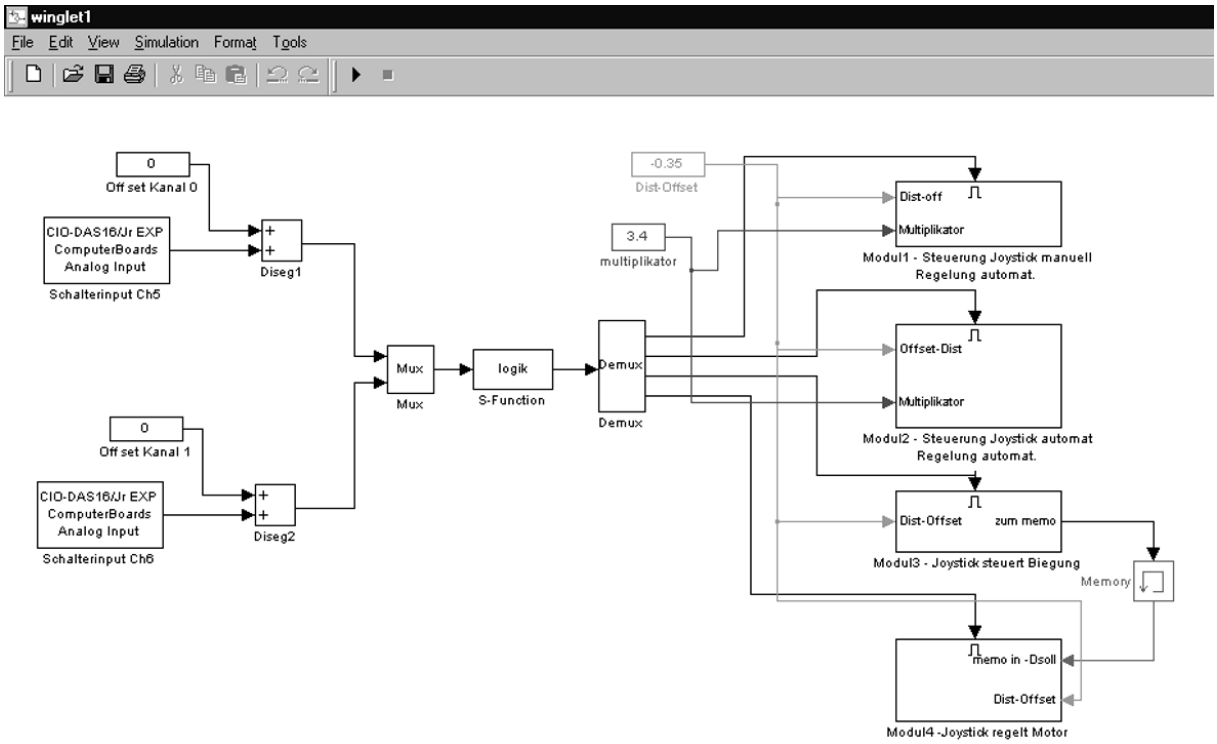


Abbildung 4.29: Strukturplan des Regelalgorithmus in Matlab/Simulink

Der in Abbildung 4.28 dargestellte Host-Computer dient, wie beim adaptiven Tragflügel, zur Erstellung des Regelalgorithmus, der Kompilierung und der Messdatenerfassung. Dazu sind auf dem Host-Computer die Simulationssoftware Matlab5.2/Simulink2.2, die Übertragungssoftware RealLink32 und der C-Compiler WatCom11.0 installiert. Über das Netzwerk sind Host und Target direkt miteinander verbunden.

Einen ersten Überblick über die Struktur des Regelalgorithmus gibt die Abbildung 4.29. Die einzelnen, dort dargestellten Bausteine beinhalten zusammengefasste Strukturen. Diese haben meist weitere Unterstrukturen. Auf der linken Seite befinden sich zwei Bausteine „Schalterinput“, die am Windkanal die Schalterstellung für die gewünschte Regelung registrieren und das entsprechende Modul 1, 2, 3 oder 4 aktivieren. Die Module beinhalten jeweils einen Regelalgorithmus, der die gleichen Proportional- und Integralglieder aufweist. Ebenso ist die Pulsmodulation mit der errechneten Pulsweite bei allen vier Modulen gleich. Die Module unterscheiden sich wie folgt:

- **Modul 1 :** *Manuell*
  Über den Joystick wird die Winkelstellung des Flügels verändert. Der Computer berechnet aus dem Anstellwinkel zur Strömung die Verformung des Winglets.
- **Modul 2:** *Automatisch*
  Der Computer ändert selbst die Winkelstellung des Flügels zur Strömung und berechnet die Stellung des Winglets.
- **Modul 3:** *Wingletstellung*
  Mit Hilfe des Joysticks wird die Verformung des Winglets direkt beeinflusst, ohne dass der Anströmungswinkel geändert wird.
- **Modul 4:** *Anströmung*
  Durch den Joystick wird bei fest eingestellter Wingletstellung der Anströmungswinkel geändert.

Durch Umschalten zwischen Modul 3 und Modul 4 und umgekehrt ist es möglich, für verschiedene Anströmungswinkel und Wingletstellungen die Auftriebs- und die Widerstandskräfte zu bestimmen.

Da sich die Module sehr ähnlich sind, soll an dieser Stelle das Modul 1 beschrieben werden. Abbildung 4.30 zeigt den Aufbau von Modul 1. Im oberen Teil ist die Ansteuerung des Schrittmotors integriert. Über die beiden Blöcke „Ch3“ und „Ch4“ wird die Joystickstellung über die A/D-Karte abgefragt und an den Block „Takt- und Richtungssignal“ weitergeleitet. Dieser Block gibt die Richtung und den Takt über die D/A-Karte an den Schrittmotor, der die Wingletstellung des Flügels ändert. Der Block „Ch7“ fragt über die A/D-Karte das Potentiometer nach der die Winkelstellung des Flügels im Windkanal ab. Das Signal wird einerseits genutzt, um die Winkelstellung des Flügels zwischen 0° und 20° zu begrenzen, anderseits wird es benötigt, um daraus den Sollwert zu bestimmen. Der Block „Wingletbiegung“ erfasst über die Dehnungsmessstreifen den momentanen Istwert der Wingletverformung. Soll- und Istwert werden an den Block „Modul1-Joystick1“ weitergeleitet, in dem der Regelalgorithmus und die Pulsmodulation integriert sind. Die errechnete Pulsweite wird über die D/A-Karte an das Halbleiterrelais weitergegeben.

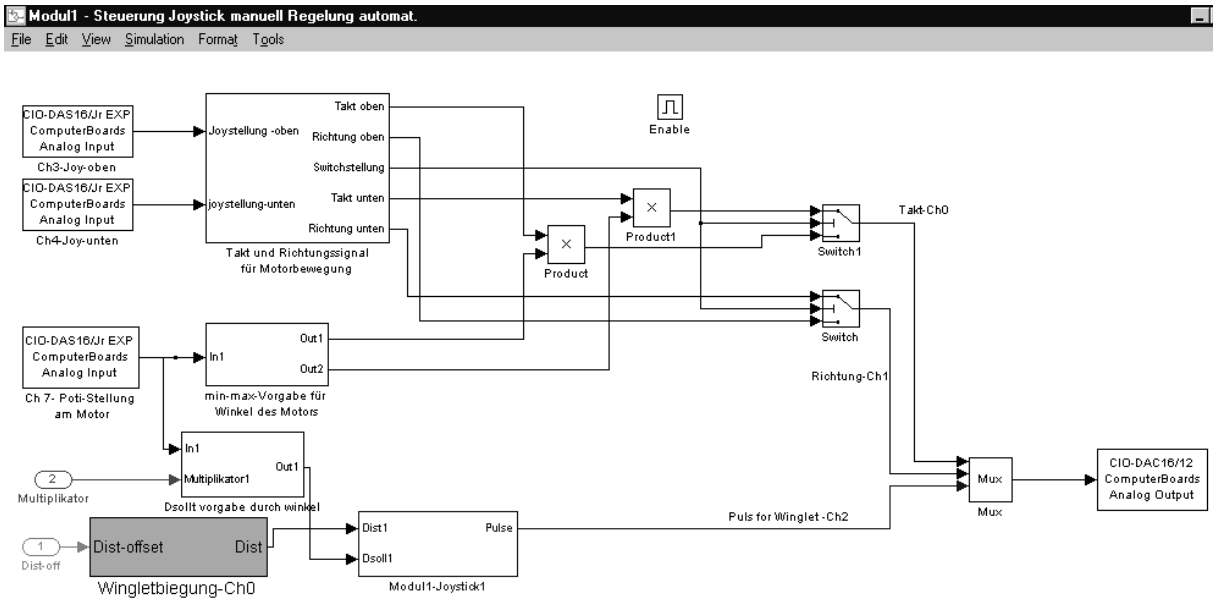


Abbildung 4.30: Strukturplan des Modul1

Die im Block „Modul1-Joystick1“ integrierten Faktoren für das Proportional- und Integralglied des Reglers müssen, wie beim adaptiven Tragflügel, angepasst werden. Der ermittelte Faktor für das Proportionalglied liegt bei 3,5 und für das Integralglied bei 0,09. Die Werte liegen etwas über den Werten des adaptiven Tragflügels, da die Struktur durch die gummierte Außenhaut etwas steifer ist. Das Zeitfenster t_F der Pulsmodulation wird gegenüber dem adaptiven Tragflügel von 0,07 auf 0,007s ver-

kleinert. Dadurch sollen die Überschwinger, die im Kapitel 3.3.5 aufgetreten sind, verringert werden. Die konstant gelieferte Spannung U_0 vom Netzgerät beträgt 4V.

4.3.4 Messgeräte und Bauelemente

In der nachfolgenden Aufzählung sind die wichtigsten Messkarten und Bauelemente, die für den Versuch zum Einsatz kommen, aufgelistet.

- **Formgedächtnislegierung** (identisch mit Kapitel 4.2.4)
  8 NiTi-Drähte je Abschnitt mit 2,5%-Zweiwegeffektlängenänderung und zusätzlicher Dehnung von 1,7%
  Einbaulänge = 100mm; Drahtdurchmesser = 0,29mm;
  Übergangstemperaturen : A_s = 55°C, A_f = 65°C, M_s = 60°C, M_f = 45°C.

- **CIO-EXP-Bridge 16 der Firma ComputerBoards**
  16 Eingänge zur Erfassung der Deformation der Dehnungsmessstreifen (DMS); Messung der DMS in Halb- und Vollbrückenschaltung; Speisespannung 5V; Ausgangssignalverstärkung x1, x10, x100, x1000.

- **CIO-DAS16jr der Firma ComputerBoards**
  12bit A/D-Wandlerkarte, max. Abtastrate 130kHz; 16 single ended oder 8 differential Eingänge
  Zur Messung der Winkelstellung der Lamellen und der Verformung der DMS über die CIO-EXP-Bridge 16.

- **CIO-DAC16 der Firma ComputerBoards**
  12bit D/A-Wandlerkarte mit 16 anlogen Ausgängen;
  Ausgangsspannungen: 0...10V, 0...5V, -10...10V, -5...5V (4-20mA)
  Zur Ansteuerung der Halbleiterrelais.

- **Halbleiterrelais des Typs D1D10 vom Hersteller CryDom**
  Das verwendete Relais ist für Schaltströme bis 10A und Schaltspannungen bis 100V ausgelegt. Die Relais dienen zum Ein- und Ausschalten des Heizstromes in den Formgedächtnisdrähten.

- **Dehnungsmessstreifen der Firma HBM**
  Foliendehnungsmessstreifen des Typs 1-LY11-10/120
  Zur Erfassung der Verformung des Winglets und der Auftriebs- und Widerstandskraft am Flügel. Mit jeweils zwei DMS an jeder Messstelle. Die DMS sind mit Ergänzungswiderständen auf der CIO-EXP-Bridge 16 geschaltet.

- **Netzgerät PCY 120-60 der Firma Heinzinger**
  Hochpräzises, doppelstabilisiertes, lineargeregeltes Universalnetzgerät; Ausgangsspannung bis 120V; Ausgangsstrom bis 60A
  Zur Versorgung der Formgedächtnisdrähte mit Heizstrom.

- **Schrittmotor mit Getriebe 50:1 der Firma RS Components, Typ RS 191 83 28**
  Zweirichtungs-Hybridschrittmotoren mit 4-Phasen-Ansteuerung;
  Netzspannung: 5V; Netzstrom: 1A; Schrittwinkel mit Getriebe: 0,0036°
  Zur Änderung der Winkelstellung des Flügels.

- **Drehpotentiometer**
  100Ohm; 1,5W
  Zur Bestimmung der Winkelstellung des Flügels.

- **Host-Computer**
  AMD-K6 350MHz, 128MB Arbeitsspeicher, Windows NT
  Zur Erstellung des Regelungsalgorithmus.

- **Target-Computer**
  AMD-K6 350MHz, 98MB Arbeitsspeicher, DOS mit RealLink32 Software
  Zur Durchführung der Regelung.

4.3.5 Versuchsdurchführung und Resultate

Um die Möglichkeit der Änderung der Winkelstellung von Winglets durch Formgedächtnislegierungen zu untersuchen, werden zwei Versuche hinsichtlich der Regelbarkeit und -genauigkeit mit sprungartiger und kontinuierlicher Änderung des Sollwertes durchgeführt.

Die Vorgabe des Sollwertes erfolgt über die Änderung des Anströmungswinkels am Flügel. Dieser Wert muss in einen Dehnungsmessstreifenverformungswert (elektr. Dehnungsmessstreifenspannung) des Winglets umgewandelt werden. Die Dehnungsmessstreifenspannung entspricht dem Biegewinkel des Winglets.

Der Zusammenhang zwischen Anströmungswinkel und elektrischer Spannung der Dehnungsmessstreifen wird in der Regelung mathematisch mit der Gleichung (4.11) festgelegt. Zwischen der Dehnungsmessstreifenspannung und dem Biegewinkel des Winglets besteht ein linearer Zusammenhang.

$$\text{Dehnungsmessstreifenspannung [V]} = \text{Anströmungswinkel [°]} / 3{,}22\ \text{[V/°]} \qquad (4.11)$$

Die Beziehung zwischen Anströmungswinkel, Dehnungsmessstreifenspannung und Winkelstellung des Winglets ist in der Abbildung 4.31 dargestellt.

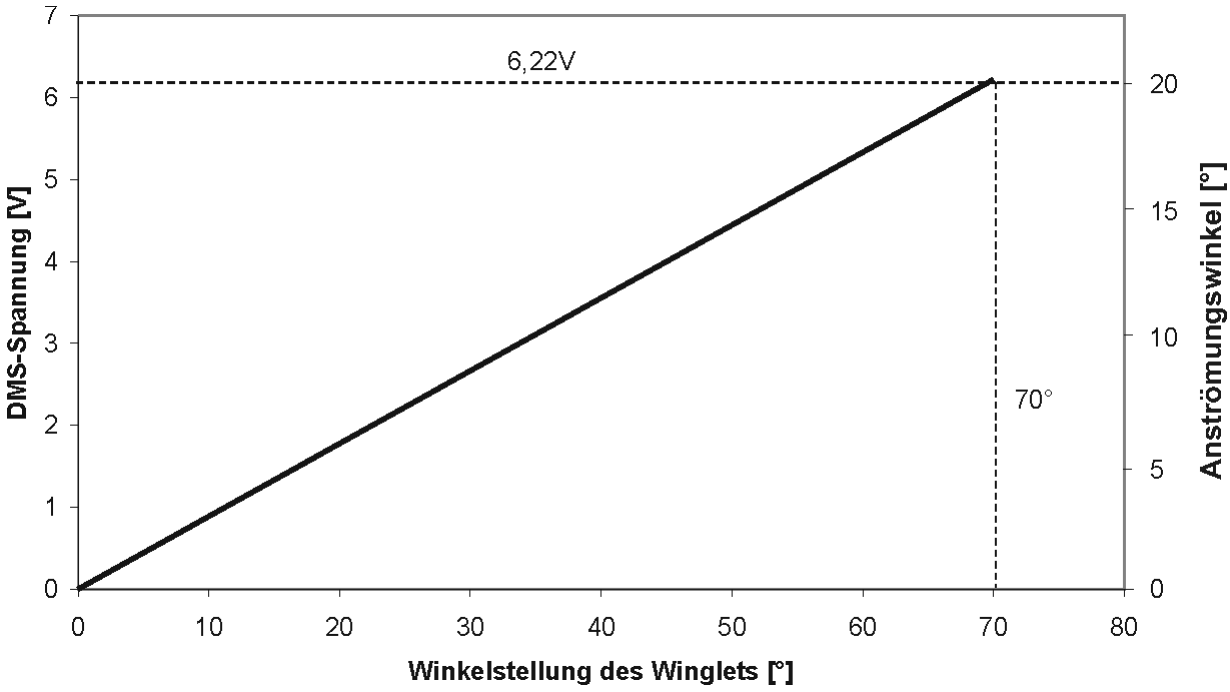


Abbildung 4.31: Beziehung zwischen Anströmungswinkel, DMS-Spannung und Winkelstellung des adaptiven Winglets

Anhand eines Beispiels soll der Zusammenhang dargelegt werden. Der Anströmungswinkel hat den Wert von 20°, der dazugehörige Sollwert der Dehnungsmessstreifenspannung beträgt 6,22V. Die Dehnungsmessstreifenspannung von 6,22V ent-

spricht einer Winkelstellung des Winglets von 70°. Damit ist die Regelung so definiert, dass bei einem Anströmungswinkel von 0° das Winglet gerade und bei einem Anströmungswinkel von 20° das Winglet mit 70° gekrümmt wird.

Für beide Versuche sind folgende Werte für die Regelung eingestellt:

Proportionalglied	k_p	=	3,5
Integralglied	k_i	=	0,09
Zeitfenster	t_F	=	0,007s
Konstante Heizspannung vom Netzgerät	U_o	=	4V

Sprungförmige Sollvorgabe

Bei diesem Versuch wird die Reaktionszeit des Winglet-Istwertes bei maximal möglicher Änderung des Sollwertes experimentell untersucht. Dazu hat das Winglet eine gerade Stellung zur Tragfläche, d.h. der Winkel des Winglets zur Tragfläche ist Null. Damit ist der Istwert der gemessenen Dehnungsmessstreifenspannung ebenfalls Null und folgt dem geforderten Sollwert. In Abbildung 4.32 entspricht das der Zeit zwischen 0 und 1 Sekunde.

Nach einer Sekunde wird der Sollwert sprungartig von 0V auf 6,22V geändert, d.h. das Winglet muss von seiner geraden Ausgangsform mit einem Winkel von 0° einen Winkel von 70° einstellen. Der Istwert des Winglets folgt dem Sollwert mit einer kleinen Verzögerung und erreicht den Sollwert nach 2 Sekunden (t=3,0s). Gegenüber dem adaptiven Tragflügel dauert dies zwar 0,5 Sekunden länger, aber der Krümmungswinkel von 70° beim Winglet ist im Vergleich mit dem Tragflügel in Abbildung 4.17 um 25° größer. Schaut man sich den Zeitpunkt t=2,5 Sekunden an, so haben die Istwerte beider Modelle den gleichen Wert erreicht.

Durch die Verkleinerung des Zeitfensters ist auch der Überschwinger beim Erreichen des Sollwertes verschwunden. Der Istwert wird ohne Abweichung eingestellt und kann über dem Zeitbereich von t=3 bis 5 Sekunden den Sollwert gut halten. Auch sind kaum noch Schwankungen des Istwertes um den Sollwert sichtbar.

Zum Zeitpunkt t=5 Sekunden wird der Sollwert von 6,22V auf 0V geändert. Das Winglet muss nun von seiner maximalen Verformung mit einem Winkel von 70° in seine gerade Ausgangsform zurückkehren. Der Istwert und damit die Rückstellung

der Verformung benötigt ca. 7 Sekunden bis der geforderte Sollwert eingestellt ist, da die Formgedächtnisdrähte an der Luft abkühlen müssen. Der Abkühlvorgang ist bei t=12 Sekunden abgeschlossen.

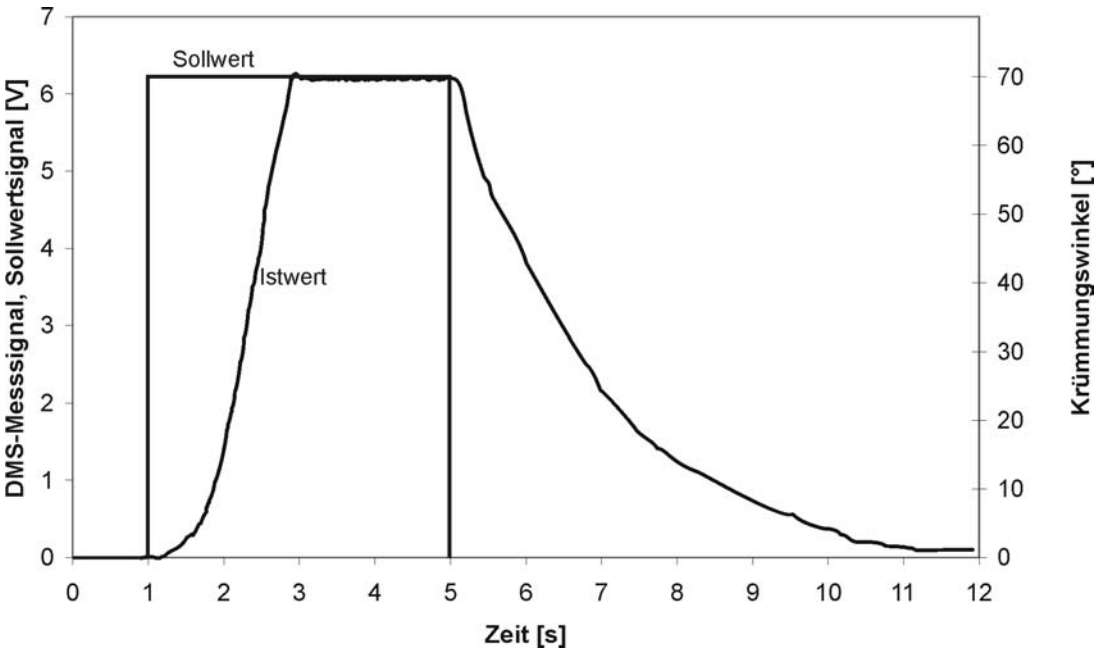


Abbildung 4.32: Sprungantwort des adaptiven Winglets

Kontinuierliche Sollvorgabe

Bei der kontinuierlichen Sollvorgabe steuert der Computer den Schrittmotor und ändert dadurch die Stellung des Flügels zur Strömung. Die Steigung der Rampe ergibt sich aus der Taktfrequenz des Schrittmotors. Diese beträgt im Versuch 2°/s, ist aber beliebig veränderbar.

Über eine Regelungsroutine wird dem Regelalgorithmus ein Anströmungswinkel vorgegeben. Diese zeitliche Vorgabe des Anströmungswinkels und der daraus resultierende Sollwert bzw. Wingletwinkel sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Der Versuchsablauf setzt sich aus zeitlich nicht veränderlichen Sollwerten (Abschnitt 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) und verschiedenen rampenförmigen Änderungen des Sollwertes (Abschnitt 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14) zusammen.

In der Abbildung 4.33 ist das Ergebnis bei kontinuierlicher Vorgabe des Sollwertes dargestellt. Ebenso wie bei der sprungförmigen Sollvorgabe, ist die Anfangsstellung des Winglets gerade und folglich hat die Dehnungsmessstreifenspannung einen Wert von 0V im Abschnitt 1.

Tabelle 4.3: Versuchsablaufplan

Abschnitt	Zeit [s]	Aktion	Anströmungs-winkel [°]	Geforderter Soll-wert der DMS-Spannung [V]	Resultierender Wingletwinkel [°]
1	0...1	Halten	0	0	0
2	1...3,5	Rampe	von 0 nach 5	von 0 nach 1,55	von 0 nach 17,5
3	3,5...7,5	Halten	5	1,55	17,5
4	7,5...11	Rampe	von 5 nach 12	von 1,55 nach 3.73	von 17,5 nach 42
5	11...15	Halten	12	3,73	42
6	15...17	Rampe	von 12 nach 8	von 3,73 nach 2,49	von 42ach 28
7	17...21	Halten	8	2,49	28
8	21...27	Rampe	von 8 nach 20	von 2,49 nach 6,22	von 28 nach 70
9	27...31	Halten	20	6,22	70
10	31...33,5	Rampe	Von 20 nach 15	von 6,22 nach 4,66	von 70 nach 52,5
11	33,5...37,5	Halten	15	4,66	52,5
12	37,5...40	Rampe	Von 15 nach 10	von 4,66 nach 3,11	von 52,5 nach 35
13	40...44	Halten	10	3,11	35
14	44...49	Rampe	Von 10 nach 0	von 3,11 nach 0	von 35 nach 0
15	49...60	Halten	0	0	0

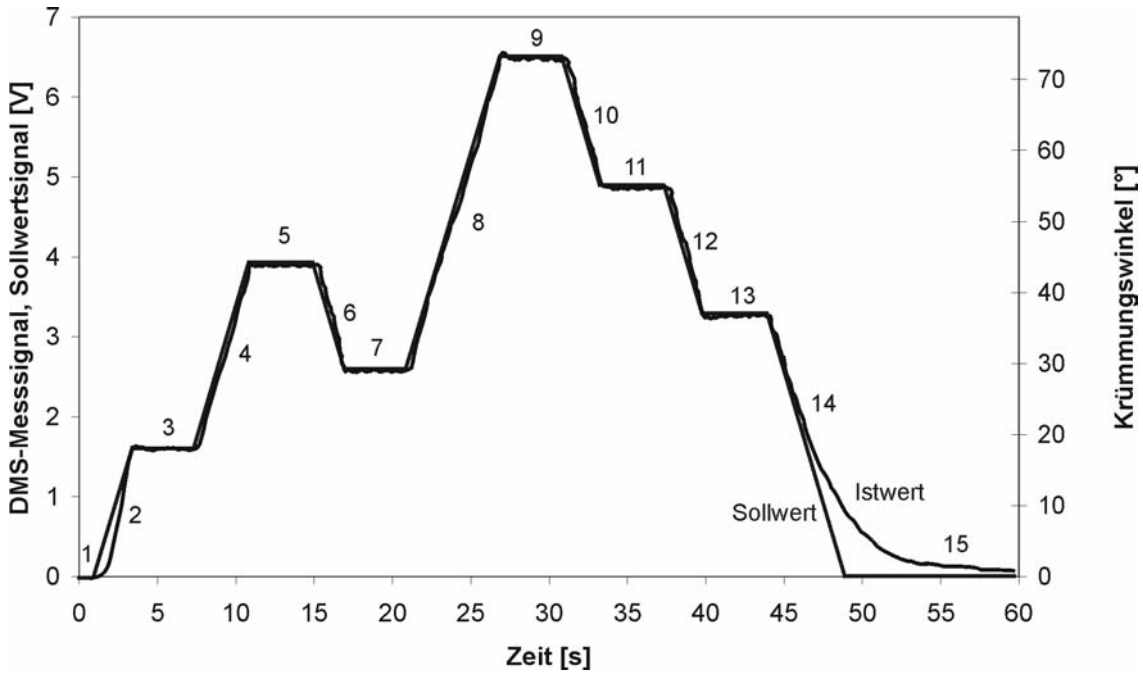


Abbildung 4.33: Reaktion des Istwertes bei kontinuierlicher Vorgabe des Sollwertes

Im Abschnitt 2 wird mit der Änderung des Sollwertes begonnen. Es ist zu erkennen, dass der Istwert dem Sollwert nicht sofort, sondern mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 1 Sekunde folgt. Der Istwert stimmt bei t=2 Sekunden mit dem Rampenverlauf überein. Ab diesem Zeitpunkt bis t=47 Sekunden wird der Istwert durch den Regelungsalgorithmus exakt dem Sollwert angepasst. Bei t=47 Sekunden bis zur vollständigen Rückstellung des Winglets in die gerade Ausgangsform kann der Istwert dem Sollwert nicht folgen. Erst bei t=60 Sekunden stimmen Soll- und Istwert wieder überein.

4.3.6 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Die beiden Versuche zeigen, dass es durch einen optimierten Regelalgorithmus und die daraus resultierende Pulsmodulation möglich ist, mit Drähten aus Formgedächtnislegierungen eine Regelung der adaptiven Verformung eines Winglets durchzuführen. Sie zeigen gegenüber der Regelung des adaptiven Tragflügels, dass durch eine bessere Anpassung des Proportional- und Integralgliedes sowie die Verkleinerung des Zeitfensters die Überschwinger und die Schwankungen des Istwertes um den Sollwert fast vollständig reduziert bzw. vermindert werden.

Defizite zeigt die Regelung bei großen Änderungen des Sollwertes, obwohl das weniger an dem Regelalgorithmus, als vielmehr an dem Verhalten der Formgedächtnislegierung liegt. Zu sehen ist dies bei beiden Versuchen, wobei bei der kontinuierlichen Sollvorgabe nur am Anfang und Ende des Versuches die Schwierigkeiten sichtbar werden. Die Lösung des Problems zur schnelleren Anpassung des Sollwertes bei Erwärmung der Formgedächtnisdrähte ist eine Erhöhung der Heizspannung U_o am Netzgerät. Dazu müsste das Zeitfenster verkleinert werden, damit es nicht zur Zerstörung der Formgedächtnisdrähte durch Überhitzung kommt. Auch ist das Vorheizen der Formgedächtnisdrähte bis kurz vor A_s möglich, da andernfalls Zeit bis zum Erreichen des Phasenüberganges von Martensit zu Austenit verloren geht. Die vorgeschlagenen Verbesserungen der Leistung haben zur Folge, dass der Energiebedarf steigt. Daher ist je nach Anwendungsfall abzuwägen, inwieweit es nötig ist, bei extremen Sollwertänderungen den Istwert exakt und schnell einzustellen.

Die schnelle Rückstellung der Verformung des Winglets ist abhängig vom Temperaturgradient zwischen Formgedächtnisdrähten und der Umgebung. Je kleiner der Gradient ist, desto länger dauert es, bis der Formgedächtnisdraht seinen Phasenüber-

gang von Austenit zu Martensit abgeschlossen hat und folglich das Winglet wieder gerade wird. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Auswahl einer Legierung mit einer höheren Umwandlungstemperatur. Es müsste dann zwar mehr Heizenergie aufgewendet werden, um die Drähte auf die Umwandlungstemperatur zu bringen, aber man erhält beim Abkühlen einen größeren Temperaturgradienten zwischen der Umgebungsluft und den Formgedächtnisdrähten. Liegt bei der jetzigen Legierung nach Kapitel 4.2.4 die Endtemperatur des Martensits (M_f) bei 45°C, so könnte bei einer neu gewählten Legierung dieser Wert bei z.B. 70°C liegen.

Andere Möglichkeiten zur schnellen Verformungsrückstellung sind die unterstützende Kühlung z.B. durch Anblasen mit kalter Luft, die Einbettung der Drähte in ein kühlendes Fluid oder die Verwendung von Peltierelementen, wie im Kapitel 3.4 beschrieben. Hierzu müssten entsprechende Zusatzaufbauten am Winglet angebracht werden.

Der mittlere Bereich der kontinuierlichen Sollvorgabe zeigt aber, dass sowohl die steigenden als auch die abfallenden Rampen durchaus exakt geregelt werden können, wenn die Änderung der Sollvorgabe nicht Extremwerte annimmt. Auch die sich nicht ändernden Sollvorgaben können gut geregelt werden, so dass das adaptive Winglet mit dem erstellten Regelalgorithmus in diesen Bereichen gute Regelungsresultate zeigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In Bereichen wie der Energietechnik, Automobilindustrie, Medizintechnik und Luft- & Raumfahrt, besteht der Bedarf an neuen bzw. speziellen Stellelementen und Instrumenten. So wird z.B. in der Luftfahrt nach neuen Möglichkeiten gesucht, durch einfache aber wirkungsvolle Lösungen auf dem Gebiet der Aerodynamik die Strömungseigenschaften der Flugzeuge zu verbessern. Für die Lösung der gestellten Anforderungen wird nach neuen, innovativen Stellmechanismen gesucht, um beispielsweise die Außenhaut von Rumpf und Tragflächen zu beeinflussen. Eine mögliche Lösung ist der Einsatz von neuen Aktorprinzipien, wie z.B. der in dieser Arbeit behandelten Anwendung von Formgedächtnislegierungen.

Formgedächtnislegierungen (z.B. NiTi) sind Legierungen, in denen ein Formgedächtniseffekt auftritt. Aufgrund einer Phasenumwandlung des Kristallgitters sind diese Legierungen in der Lage, nach einer Verformung bei tiefen Temperaturen, diese beim Überschreiten einer bestimmten höheren Temperatur wieder zurückzustellen. Dabei wirken erhebliche Kräfte, so dass diese Legierungen bei der Rückstellung in ihre ursprüngliche Form Arbeit verrichten. Die benötigte Temperatur zur Rückstellung kann mit Hilfe von Joule´scher Wärme elektrisch direkt in der Formgedächtnislegierung erzeugt werden.

Die Verwendung von Formgedächtnislegierungen in mechanischen Strukturen erfordert Kenntnisse im Umgang mit diesem Material. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeiten zur Verbesserung der Kühlung und Dehnungskontrolle von Formgedächtnislegierungen sowie die Anwendung und Regelung von Formgedächtnislegierungen in adaptiven Strukturen vorgestellt.

Im ersten Teil der Voruntersuchungen werden die Formgedächtnislegierungen hinsichtlich ihres Einsatzes als Aktoren und Sensoren untersucht. Dazu wird ein Formgedächtnisdraht in einer eigens dafür angefertigten Messwanne bezüglich seines Dehnungs-Temperatur- und Dehnungs-Widerstandverhalten bei verschiedenen Lasten vermessen. Anschließend wird anhand einer Biegebalkenstruktur gezeigt, dass es mit der Kenntnis über die Balkentheorie und Messergebnisse aus den Wannenversuchen möglich ist, bei veränderlicher Last über die Widerstandsänderung die Dehnung der Formgedächtnisdrähte und damit die Verformung des Biegebalkens zu kontrollieren.

Die Widerstandsänderungen sind zwar sehr gering und liegen in dem beschriebenen Anwendungsfall zwischen 1,41Ohm und 1,71Ohm, sie sind jedoch mit einer guten Messauflösung messbar. Auch ist die Rückführung der Widerstandsänderung als Regelgröße möglich.

Anhand der gewonnenen Kenntnisse ist der Einsatz von Formgedächtnislegierungen als Aktoren und Sensoren in anderen Strukturen denkbar, bei denen es mit den konventionellen Messmethoden (Dehnungsmessstreifen, Wegmesser, Kraftsensor) schwierig ist, die Gestaltänderung zu messen oder kein Bauraum für die Unterbringung von Sensoren und deren Zuleitungen vorhanden ist.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Abkühlung von Formgedächtnislegierungen. Hier brauchen die Formgedächtnislegierungen je nach Wärmegradient mit der Umgebung eine gewisse Zeit, bis sie durch Abkühlung in den Ausgangszustand zurückkehren. Dies kann zwar durch Kühlung mit einem Fluid bzw. durch Anblasen mit Luft beschleunigt werden, ist aber je nach Anwendungsfall nicht immer möglich. Daher wird in diesem Teil eine Beschleunigung der Abkühlung mittels Peltierelementen untersucht. Bei der untersuchten Formgedächtnislegierung handelt es sich um ein NiTiCu-Band, welches in sechs Module von zwei aneinandergefügten Standardpeltierelementen gekapselt wird. Die Messergebnisse zeigen eine Verringerung der Abkühlzeiten mit den verwendeten Peltierelementen. Bei gleicher Deformationsänderung des Formgedächtnisbandes verringert sich die Abkühlzeit im Vergleich zur passiven Luftkühlung um die Hälfte. Dies ist durchaus beachtenswert, da auf diese Weise eine schnellere Reaktion bei der Regelung von Formgedächtnislegierungen möglich ist. Eine weitere Steigerung der Abkühlzeit kann erreicht werden, wenn die durch die Peltierelemente abtransportierte Wärme besser an die Umgebung abgegeben wird. Im beschriebenen Anwendungsfall ist die Wärmeabgabe durch die Bauform der Peltierelemente limitiert. Durch eine größere Kühlfläche an der Warmseite könnten Abkühlzeiten unter 1 Sekunde erreicht werden. Es ist aber zu bedenken, dass durch die größere Bauform und das zusätzliche Gewicht der Vorteil des Einsatzes der Formgedächtnislegierungen - ein großes volumenspezifisches Arbeitsvermögen - verloren gehen kann. Daher ist je nach Anwendung die Nutzung einer schnelleren Kühlungsmöglichkeit abzuwägen.

Im dritten Teil werden der Einsatz und die Regelung von Formgedächtnislegierungen in adaptiven Strukturen untersucht. Dazu sind zwei Modelle - der adaptive Tragflügel

und das adaptive Winglet - gebaut worden. Diese sollen je nach Vorgabe eine entsprechende Form einnehmen, die durch eine modifizierte Regelung für Formgedächtnislegierungen eingestellt wird. Dabei werden die Verformung der Struktur über Dehnungsmessstreifen erfasst und die Änderung der Werte als Regelgröße herangezogen. Es ist aber auch möglich, wie im ersten Teil der Arbeit beschrieben, die Widerstandsänderung als Regelgröße zu nutzen. Wegen der großen Schwankung des Messsignals und der geringen Auflösung der Messkarte wurde bei den durchgeführten Versuchen der Widerstand nicht genutzt, da eine Regelung immer nur so gut sein kann, wie die Messwerte sind.

Die Messergebnisse zeigen, dass eine Regelung von adaptiven Strukturen keine Schwierigkeit darstellt. Die verschiedenen Sollvorgaben der Verformung konnten gut kontrolliert und eingestellt werden. Bei großen, sprungartigen Solländerungen in den durchgeführten Versuchen haben die Formgedächtnislegierungen etwas Schwierigkeiten, dem Sollwert zu folgen. Dies kann aber durch eine höhere Heizleistung bei der Erwärmung und durch eine bessere Wärmeabfuhr bei der Abkühlung verbessert werden. Beim Flugzeug wäre die Möglichkeit der schnellen Abkühlung durch die Nutzung der kühlenden Außenluft gegeben.

Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Zeit t_F zwischen zwei Abtastpunkten bei einer steilen Anfahrkurve möglichst klein sein sollte, um Überschwinger beim Einstellen eines Sollwertes zu vermeiden. Auch ist die verwendete Pulsmodulation für die Einstellung von Zwischendeformationen bei den Formgedächtnislegierungen bestens geeignet.

Motiviert durch die erfolgreiche Regelung der Modelle müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die insbesondere beim adaptiven Winglet die Untersuchungen des Kapitel 3 mit einbeziehen. Außerdem ist die Untersuchung im Windkanal fortzusetzen, um bei sich ändernden Strömungsbedingungen die Wingletstellung so zu ändern, dass die Widerstandskraft bei gleicher Auftriebskraft reduziert wird. Aber auch andere Parameter, wie die Temperatur, das Gewicht, die Drücke auf der Tragfläche und die Feuchtigkeit, sollten bei der Regelung der Wingletstellung berücksichtigt werden. Um aufwendige Rechnungen zu vermeiden und somit die Schnelligkeit der Regelung zu erhöhen, könnten die Parameter und die dazugehörigen Regelgrößen in Datenbanken abgelegt werden.

Die optimierten Parameter beim adaptiven Winglet zeigen, dass das Konzept des Einsatzes der Formgedächtnislegierungen als Aktoren und die damit verbundene Regelung eine mögliche Lösung für die Anwendbarkeit in verschiedensten Strukturen darstellen. So wären beispielsweise viel versprechende weitere Anwendungen im Bereich der Automobilindustrie für Spoiler und Autositze oder in der Bauindustrie für flexible Brücken und Dächer denkbar.

Gerade durch die Realisierung hoher Stellwege und großer Kräfte sowie der kompakten und einfachen Bauform von Strukturen mit Formgedächtnislegierungen werden die Formgedächtnislegierungen in Zukunft in bestehende Anwendungsgebiete weiter vordringen, aber auch neue Gebiete erschließen.

Literaturverzeichnis

[1] A. Planes, T. Castan, J. Ortin, “Growth Kinetics During Thermoelastic Martensitic Transformations”, Proc.Int.Conf. on Martensitic Transformations (ICOMAT 92), Monterey, CA, USA, pp.407-412, 1992.

[2] B. G. Mellor, “The science and technology of shape memory alloys”, Ed.V. Torra, p.334, Barcelona, 1987.

[3] A. S. Mascaro, H.H. Asada, “Wet SMA actuators for a active vasculated robotic flesh”, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 282-287, 2003.

[4] H. Vogel, „Gerthsen Physik“, 18. Auflage ,Springer Verlag, 1995

[5] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, “Physik für Ingenieure”, 6. Auflage, Springer-Verlag, 1997.

[6] A.R. Shahin, P.H. Meckl, J.D. Jones, M.A. Thrasher, “Enhanced Cooling of Shape Memory Alloy Wires Using Semiconductor Heat Pump Modules”, J. Intell. Mat. Sys. Struct., Vol. 5, pp. 95-104, 1994.

[7] A. Bhattacharya, D. C. Lagoudas, Y. Wang, V. K. Kinra, “Thermoelectric Cooling of Shape Memory Alloy Actuators: Theoretical Modeling and Experiment”, Active Materials and Smart Structures, Lagoudas, D.C., Anderson, G.L. (eds.), Proc. SPIE 2427 ,pp. 198-217, 1995.

[8] A. Musolff, S. Seelecke, V. Semenyuk, , J. Stockholm, “The use of Thermoelectric Cooling for Shape Memory Wire Temperature Control”, Proceeding of 4th European Workshop on Thermoelectrics, Madrid, Spain, Comillas University pp. 75-81, 1998.

[9] A. Biscarini , B. Coluzzi , G. Mazzolai , F. M. Mazzolai , A. Tuissi, “Mechanical spectroscopy of the H-free and H-doped NiTiCu shape memory alloy”, Journal of Alloys and Compounds, pp. 356–357, 2003.

[10] T. Bein, H. Hanselka, E. Breitbach, “The Adaptive Spoiler -Mechanical aspects of a local thickening to control the transonic shock-“, 9th Int. Conf. On Adaptive Struc. And Tech., 1990.

[11] http://www.sm.bs.dlr.de/adaptronik/ADIF.htm

[12] H. Ehrenstein, „Die Herstellung und das Formgedächtnisvermögen von NiTi“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Deutschland, 1985.

[13] I. Müller, „A Model for a Body with Shape Memory“, Arch. Rat. Mech. Anal., 70, 61-67, 1977.

[14] M. Achenbach, I.Müller, „A Model of Shape Memory“, Journal de Physique C4, Tome 43, 163-167, 1982.

[15] I. Müller, „One the size of hysteresis in pseudoelasticity”, Cont. Mech Thermodyn. 1, 125, 1989.

[16] J. V. Humbeek, „Shape Memory Alloys: A Material and a Technology”, Advanced Engineering Materials, 3, No. 11, 2001.

[17] P. A. Besselink, „The Science and Techology of SMA”, Ed.V. Torra, Impresrapit, Barcelona, p.407, 1987.

[18] Produktbeschreibung der Firma @ Medical Technologies (AMT), www.amtbe.com, Belgien

[19] Broschüre zu Shape-Memory Metal, Raychem

[20] M. H. Wu, “Engineering Aspects of SMA, Butterworth-Heinemann, London, p.49, 1990.

[21] H. Nußkern, „Stellelemente in der Gerätetechnik“, Sonderdruck aus der Zeitschrift „Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Messtechnik“, Carl Hanser Verlag, 1995.

[22] D. Z. Liu, W. X. Liu, F. Y. Gong, „Engineering Application of Fe-Based Shape Memory Alloy on Connecting Pipe Line“, Journal de Physique IV C8, Vol.5, 1995.

[23] K. N. Melton, „General application of sma’s and smart materials”, in Shape Memory Materials, edited by K. Otsuka and C. M. Wayman, pages 220–239, 1998.

[24] T. W. Duering, K. N. Melton, D. Stöckel, C. M. Wayman, „Engineering aspects of shape memory alloys”, Butterworth-Heinemann, London, 1990.

[25] Y. Suzuki and Y. Sekiguchi, „Applications of Shape Memory Alloys”, in „Shape Memory Alloys” ed. by H.Funakubo, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1987.

[26] Z. Dong, S. Zhou, W. Liu, „A Study of NiTiNb SMA Pipe Joint with Improved Properties”, Materials Science Forum Vols. 394-395, pp. 107-110, 2002.

[27] McD. Schetky, „The application of constrained recovery shape memory alloy, devices for connectors, sealing and camping”, Proc. of the 1. Int. Conf. on Shape memory and Superelastic Technologies, SMST94, pp.239-243, Pacific Grove, CA, USA, 1995.

[28] I. Viahhi, A. Priadko, S. Pulnev, „Adaptive Grippers Based on Shape Memory Actuators”, Proceedings of the Third International Conference SMST2000, Asilomar, pp. 197-204, CA, USA, 2000.

[29] Y. Nakano, M. Fujie, Y. Hosada, „Hitachi´s Robot hand”, Robotics Age 6, pp.18-20, 1984.

[30] Y. Furuya, H. Shimada, „Shape Memory Actuators for Robotic Applications”, in Engineering Aspects of SMA, Butterworth-Heinemann, pp. 338-355, London, 1990.

[31] T. Raparelli, P. B. Zobel, F. Durante, „Design of a small gripper with shape memory alloy actuators”, poster presented at 3rd International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications, April 30 - May 4, 2000, Pacific Grove, California, USA.

[32] J. Hesselbach, R. Pittschellis, E. Hornbogen, M. Mertmann, „Shape Memory Alloys for Use in Miniature Grippers”, Proc. of 2nd Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomediccal Applications, Asilomar Conference Center, pp. 251-256, Pacific Grove, CA (USA), 1997.

[33] C. Zhang, S. Xu, „Design and Clinical Applications of Swan-Like Memory Compressive Connector for Upper-Limb Diaphysis”, Materials Science Vols. 394-395, pp. 33-36, 2002.

[34] Y. Chu, K. Dai, „Medical Applications of NiTi SMA in China”, Materials Science Forum Vols. 327-328, pp. 55-62, 2000.

[35] M. Tanaka, K. Hirano, „Artificial SMA Valve for Treatment of Urinary Incontinence: Upgrading of Valve an Introduction of Transcutaneous Transformer”, Bio-Medical Materials and Engineering 9, pp. 97-112, 1999.

[36] R.-D. Jean, H. J. Lai, J. J. Lin, „Characterization of NiTi Orthodontic Archwires", Proc. Int. Conf. Martensitic Transformations, pp. 1229-1235, 1992.

[37] R. Farkas, Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik (AKM), Technologiezentrum am Europaplatz, http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/aktuelles/Presse/NL_pdf/NL_5.pdf

[38] F.-U. Glasauer, „Gedächtnislegierungen – Experimentelle Untersuchungen und Aufbau einer Wärmekraftmaschine", Dissertation, Technische Universität Berlin, Deutschland, 1996.

[39] McD. Schetky, D. Coley, „Shape Memory Alloys Torsion Tube Actuators for Trailing Edge TrimTab Control on Helicopter Rotors", Proc. of the 2. Int. Conf. on Shape memory and Superelastic Technologies, SMST97, pp.299-303, Pacific Grove, CA, USA, 1997.

[40] F. Butera, „Shape Memory Actuators for Automotive Applications", in Shape Memory Alloys. Advances in Modelling and Applications, edited by F. Auricchio, L. Faravelli, CIMNE, pp.405-425, Barcelona, Spain, 2001.

[41] D. W. Lobitz, J. W. Grossman, J. J. Allen, T. M. Rice, C. Liang, F. M. Davidson „Shape Control of Solar Collectors Using Shape Memory Alloy Actuators", Proceedings, AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, New Orleans, LA, pp. 3357-3367, AIAA 95-1117-CP, April 12-13, 1995.

[42] D. Stöckel, „Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen" in L.Tillmann, Produktionstechnik für Bauteile und Halbzeuge aus Nickel-Titan-Legierungen, Abschlussbericht des Verbundprojektes PROBANT, Verlag Bode GmbH & Co KG, Pforzheim, 2000.

[43] W. Moberly, K. Melton, „Ni-Ti-Cu Shape Memory Alloys", in Engineering aspects of shape memory alloys, edited by T. W. Duering, K. N. Melton, D. Stöckel, C. M. Wayman, pp.46-57, Butterworth-Heinemann, London, 1990.

[44] E. Quandt, C. Halene, H. Holleck, K. Feit, M. Kohl, P. Schlossmacher, „Sputter deposition of TiNi and TiNiPd films displaying two way memory effect", Proc. 8th Int. Conf. On Solid-State Sensor and Actuators, Vol.2, pp.202-205, Stockholm, 1995.

[45] H. D. Gu, K. M. Leung, C. Y. Chung, „Growth of high-temperature $NiTi_{1-x}Hf_x$ shape memory alloy thin films by laser ablation of composite targets", in Sci. Technol. A, Vol. 16, No. 6, American Vacuum Society, pp.3420-3422, 1998.

[46] http://www.amtbe.com/nitalloyspec.html

[47] C. Büskens, I. Müller, S. Seelcke, J. Sprekels, „Real-Time Optimal Control of Shape Memory AlloyActuators in Smart Structures" in: Online Optimization of Large Systems: State of the Art, Springer Verlag, (M.Grötschel, S.O.Krumke, J.Rambau eds.), 2001

[48] I. Müller, A. Musolff, N. Santopuoli, L. Seccia, „Shape memory alloys for the conservation of cultural heritage: New applications also for a real reversibility in the restoration operation", Scienza e beni culturali XIX 2003, Edizioni Arcadia Ricerche (2003)

[49] Gelenkkettenvorrichtung Patent DPMA 103 34 135.8

[50] W. Pippel, K. Iseke, u. a., „Technisch-chemisches Praktikum", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1977

[51] S. Seelecke, D. Söffker, „Shape Memory Alloy Actuators – Thermo mechanical Modelling and Control Aspects", in J. Wallascheck, J. Lückel, W. Littmann (eds.): Mechatronics and Advanced Motion Control, Proc. 3rd International Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, pp.145-160, 1999.

[52] S. Seelecke, E. da Silva, D. Söffker, „Simulation of Feedback Control for SMA Actuators", in Proceedings of the 9th International Conference on Adaptive Structures and Technologies ICAST´98, MIT, Cambridge, USA, October 14-16, pp. 238-246, 1998.

[53] http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Boeing_737-33A_-_Air_Plus_Comet_-_001.jpg

[54] http://www.infomia.com/wiki,index,goto,Winglet.html