



**Fachhochschule Konstanz**

**Schnellschaltende Aktoren für adaptive  
Sicherheitssysteme im Kraftfahrzeugbau**

**Dipl.-Ing.(FH) MSc Stefan Gläser**

**Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel**

**Dipl.-Ing.(FH) Heinrich Kilpert**

**Dipl.-Ing.(FH) Joachim Strittmatter**

**Konstanz, 28.01.05**

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Formelzeichen.....	iv
1. Einleitung .....	6
2. Aufgabenstellung .....	7
3. Hintergrund .....	9
4. Stand der Technik .....	11
4.1 Formgedächtnislegierungen.....	11
4.2 Grundlagen des Formgedächtniseffektes .....	14
4.3 Der Formgedächtniseffekt .....	19
4.3.1 Einwegeffekt.....	20
4.3.2 Zweiwegverhalten und Zweiwegeffekt .....	21
4.3.3 Superelastizität (Pseudoelastizität) .....	22
4.4 NiTi-Legierung .....	23
5. Stand der Technik (KFZ Sicherheitssysteme) .....	27
5.1 Aktive Sicherheitssysteme.....	28
5.1.1 Interne Aktive Sicherheitssysteme .....	28
5.1.2 Externe Aktive Sicherheitssysteme .....	31
5.2 Pre-Crash-Sicherheitssysteme .....	35
5.3 Passive Sicherheitssysteme.....	36
5.3.1 Autokarosserie .....	36
5.3.2 Sicherheitsgurte (Rückhaltesysteme) .....	38
5.3.3 Airbag Systeme .....	42

5.3.4	Sitz Strukturen .....	48
6.	Sicherheitssysteme geeignet für FGL .....	50
6.1	Rückspiegel.....	52
6.2	Klimaanlage .....	53
6.3	Scheinwerfer mit FGL .....	54
6.4	Gurtkraftbegrenzer .....	55
6.5	Gurtstraffer .....	56
6.5.1	Mechanisch .....	56
6.5.2	Pyrotechnisch .....	57
6.6	Motorhauben Anhebung .....	57
7.	Beispiel: PPS Sicherheitssystem .....	59
7.1	Beschreibung existierender Systeme .....	59
7.2	Systemanforderungen für Aktoren aus FGL in PPS.....	64
8.	Aktor-Material.....	65
8.1	Draht-Spezifikationen.....	66
8.2	Training der Drähte .....	67
8.3	Auslagerung .....	72
9.	Versuchsstände .....	75
9.1	Aufbau der Versuchsstände .....	75
9.2	Die Vorversuche am Ölbad-Prüfstand .....	79
9.2.1	Vordehnversuche zur Erhöhung der Stelltemperatur .....	80
9.2.2	Kontrollversuch mit stark erhöhten Gewichten.....	114
9.3	Die Vorversuche am Laser-Prüfstand .....	115
9.3.1	Zwischenversuche am Laserprüfstand .....	118

9.3.2	Letzte Versuchsumbauten und Definition der Prüfeinstellung .....	132
10.	Versuchsergebnisse.....	137
10.1	Ölbadversuche .....	138
10.1.1	Allgemeine Ölbadversuche .....	138
10.1.2	Zusatzversuch mit kurze Auslagerungsdauer bei 140°C .....	149
10.2	Laser .....	151
11.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	163
12.	Zukünftige Systeme und Resümee .....	165
13.	Anhang .....	167
A	Abbildungsverzeichnis.....	167
B	Tabellenverzeichnis .....	173
C	Quellen.....	174
D	Daten CD.....	178

## Formelzeichen

In der vorliegenden Arbeit werden die nachfolgenden Abkürzungen und Formelzeichen verwendet:

A	Fläche
A	Ampere
Al	Aluminium
At%	atomarer Anteil einzelner Elemente bei Legierungen
$A_s, A_f$	Temperaturwerte, bei denen die Umwandlung von Martensit in Austenit beginnt bzw. endet
$A_p$	Stelltemperatur
$A_{peak}$	Austinit-Peak-Temperatur
B2	Bezeichnung der austenitischen Kristallstruktur
B19	Bezeichnung der martensitischen Kristallstruktur
B19'	Bezeichnung der entzwilligten martensitischen Kristallstruktur
°C	Einheit für Temperatur: Grad Celsius
CuZnAl	Kupferzinkaluminium Legierung
Draht	als Index: kurz für Probendraht
DSC	Differential - Scanning - Calorimetry
E	E-Modul
$\varepsilon$	allgemeine Dehnung
F	Kraft
FG-	Formgedächtnis-
FGE	Formgedächtniseffekt
FGL	Formgedächtnislegierung
$F_{max}$	Maximalkraft
g	Erdbeschleunigung 9,81m/s <sup>2</sup>
I	Elektrischer Strom
J/m <sup>3</sup>	Einheit für Energiedichte: Joule/Kubikmeter
KFZ	Kraft Fahrzeug
kS/s	Einheit für Abtastrate: Kilo Scans/s
K	Einheit für Temperatur: Kelvin

l	Drahtlänge
ms	Millisekunde
m?	Einheit für Widerstand: Milli-Ohm
M	kurz für Martensit
M <sub>d</sub>	Temperatur bei der nach der Verformung von Austenit Martensit gebildet wird
M <sub>s</sub> , M <sub>f</sub>	Temperaturwerte, bei denen die Umwandlung von Austenit in Martensit beginnt bzw. endet
μF	Einheit für Kondensator Kapazität: Mikro Farad
N	Einheit für Kräfte: Newton
Ni	Nickel
NITINOL	Ni-Ti-Naval-Ordnance-Laboratory
PKW	Personen Kraftwagen
R	Bezeichnung der Kristallstruktur der R-Phase
R	kurz für R-Phase
R <sub>s</sub> , R <sub>f</sub>	Temperaturwerte, bei denen die Umwandlung von Austenit in die R-Phase beginnt bzw. endet
RT	Raumtemperatur
Ti	Titan
T <sub>oB</sub>	obere Betriebstemperatur
U	Elektrische Spannung
Zn	Zink

## 1. Einleitung

Der Einsatz von adaptiv arbeitenden Sicherheitssystemen im Kraftfahrzeugbereich wird ständig zunehmen. Im vorliegenden Projekt soll ein einfach arbeitendes und schnellschaltendes Aktorprinzip mit Hilfe des Einsatzes von Formgedächtnis-elementen realisiert werden. Ein solch kostengünstiges und sehr sicher arbeitendes System wird nicht nur vorhandene teure und aufwendige Systeme ersetzen können, sondern es wird auch durch die hohe Integrierbarkeit und günstige Recyclebarkeit den Einsatz von Aktoren im Kraftfahrzeugbereich erhöhen.

Gegenstand dieses Projektes ist die werkstoffkundliche Entwicklung eines adaptiven Sicherheitssystems mit Formgedächtnislegierungen zum Einsatz in Kraftfahrzeugen. Durch die spontane Umwandlung der FGL beim Überschreiten einer kritischen Temperatur, können sehr schnell und funktionssicher Linearbewegungen ausgeführt werden. Das Problem der Langzeitstabilität des Formgedächtniseffektes soll in diesem Forschungsvorhaben betrachtet werden.

Hierzu werden durch Auslagerungsversuche sowohl die Auswirkungen von Ausscheidungen, als auch die metallkundlichen Hintergründe für die Entstehung der Ausscheidungen betrachtet. Durch die Kenntnis der ablaufenden Vorgänge sollte es möglich sein Legierungen einzusetzen, welche die erforderliche Langzeitstabilität aufweisen.

In einem weiteren Projektschritt sollen Schnellerwärmungssysteme entwickelt und erprobt werden, die es ermöglichen mit dem vorhandenen Bordstromnetz eine schnellstmögliche und sichere Erwärmung der FG-Elemente zu gewährleisten.

### 2. Aufgabenstellung

Das Forschungsvorhaben im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovative Projekte“ an der Fachhochschule Konstanz in Kooperation mit der Firma ETO Magnetic KG umfasst die werkstoffkundliche Entwicklung eines schnellauslösenden Aktuators mittels Formgedächtnisantriebes zum Einsatz in sicherheitstechnischen Systemen in Kraftfahrzeugen.

In der modernen Automobiltechnik werden schnellschaltende Aktoren für sicherheitstechnische Anwendungen verwendet. Die Aktoren werden bis heute weitgehend durch komplizierte, mechanische Systeme sehr oft mit sogenannten Pyrozündern betrieben. Durch den Einsatz von intelligenten Werkstoffen, wie z.B. Formgedächtnismetallen, lässt sich eine Aktorfunktion sehr viel einfacher erreichen. Zudem können mit solchen Systemen im Gegensatz zu den pyrotechnisch arbeitenden Systemen die Aktorfunktionen mehrfach, d.h. reversibel ausgeführt werden. Der Einsatz von intelligenten Werkstoffen in derartigen Sicherheitssystemen wird durch mangelnde Werkstoffkenntnis auf diesem Sektor eingeschränkt. Ein zentrales Problem ist die Dauerhaftigkeit der Schaltfunktion (Langzeitstabilität des Formgedächtniseffektes), die noch nachgewiesen werden muss. In dem geplanten Vorhaben sollen daher konstruktive Arbeiten zum Einsatz von intelligenten Werkstoffen in diesen Systemen durchgeführt werden. Außerdem sollen metallkundliche Untersuchungen zum Langzeitverhalten von den Funktionswerkstoffen erfolgen. Gerade bei Formgedächtnismetallen, die bei diesen Systemen vorwiegend eingesetzt werden sollen, ist die Frage nach dem Einfluss einer erhöhten Temperatur, wie sie beispielsweise in Fahrzeugen bei Sonneneinstrahlung eintreten kann, d.h. im Bereich bis zu etwa 150°C, nicht geklärt.

Das Ziel dieses Vorhabens ist es, eine werkstoffkundliche Lösung für bestimmte sicherheitstechnische Anwendungen im Fahrzeugbau, mittels dem Einsatz von Funktionswerkstoffen zu erhalten. Gleichzeitig soll über metallkundliche Untersuchungen die Langzeitstabilität des Formgedächtniseffektes betrachtet und weiterhin Lösungen zur elektrischen Ansteuerung der Funktionswerkstoffe geschaffen werden. Aufgrund der Vorversuche zur Langzeitstabilität des Effektes

muss dann in einem letzten Schritt noch eine Betrachtung zu einer optimierten Werkstoffauswahl durchgeführt werden.

Parallel hierzu soll eine elektrische Schnellerwärmung entwickelt und erprobt werden, die es mit dem vorhandenen Bordnetz erlaubt das Formgedächtniselement im Bereich von Millisekunden auszulösen.

In Kürze zusammengefasst ist das Ziel des Projektes:

Die Entwicklung eines Aktors der:

- einfach arbeitet
- schnell schaltet
- mit Formgedächtniselementen funktioniert
- kostengünstig ist
- ein sehr sicheres System darstellt
- vorhandene „teure“ und aufwendige Systeme ersetzt
- ins Auto integrierbar ist
- recyclebar ist.

### 3. Hintergrund

Obwohl die Fußgängersicherheit in Europa (Abbildung 3-1) über die Jahre deutlich erhöht wurde, ist dieser Trend hauptsächlich auf Autodesignmaßnahmen, den Einfluss von aktiven Systemen, auf das Verhalten eines Autos während der pre-crash-Phase und auf Verkehrssicherheitsinstruktionsprogramme in der Vergangenheit zurückzuführen.

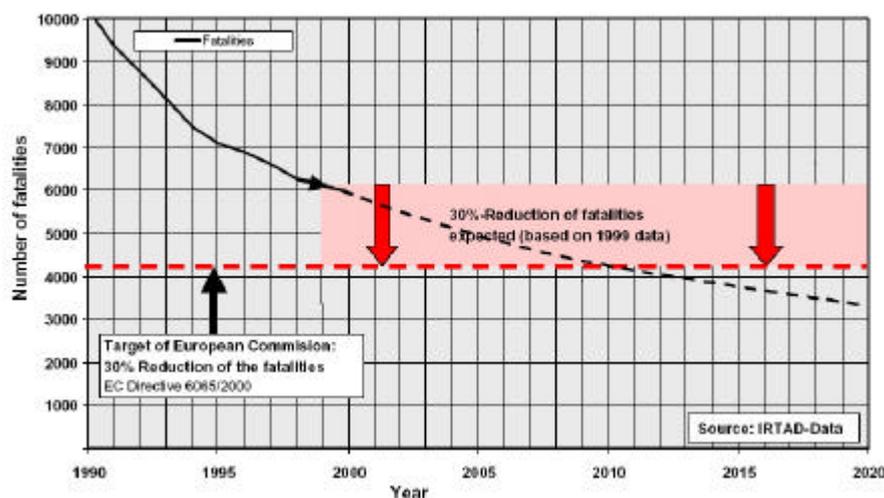


Abb. 3-1 Trend der Fußgängerunfälle in Europa [1]

Um einen realistischen Gesamteindruck eines Testverfahrens in Zusammenhang mit dem vorderen Bereich von Fahrzeugtypen zu bekommen, werden in Abbildung 3-2 die Einflüsse von Fußgängerunfällen gezeigt. Wie hier zu sehen ist, sind Personenkraftwagen mit einem Anteil von 75% für diese Unfälle verantwortlich.

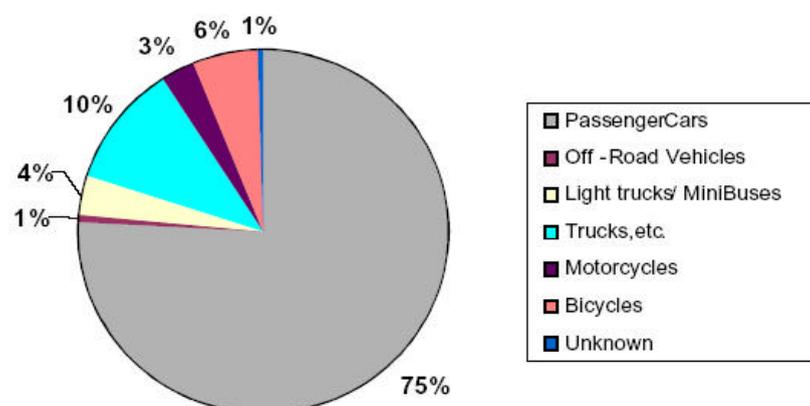


Abb. 3-2 Verteilung der Fahrzeugtypen bei Fußgängerunfällen [1]

In einer Studie der GIDAS (German In Depth Accident Study) sind nach Abbildung 3-3 für über die Hälfte aller Hauptverletzungen die relevanten Zonen der Fahrzeugvorderseite verantwortlich.

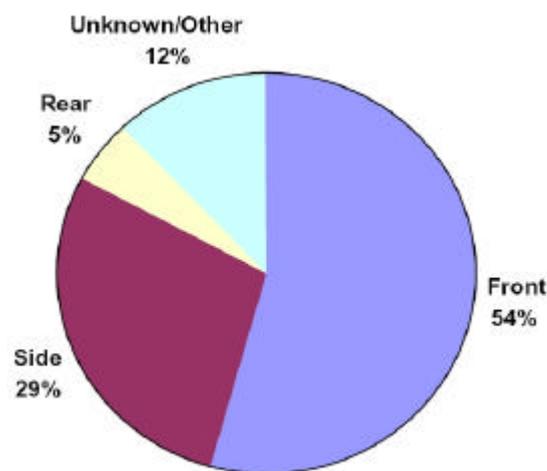


Abb. 3-3 Aufprallbereiche bei Fußgängerunfällen [1]

Abbildung 3-4 gibt eine Übersicht der unterschiedlichen Kontaktgebiete zwischen den relevanten Körperzonen für alle Verletzungen, die aus den GIDAS-Daten für die 54% Fußgängerunfälle verantwortlich sind. Häufig folgen dem Kontakt mit der Stoßstange Kopfverletzungen durch die Windschutzscheibe und die Motorhaube. Die Motorhaube ist mit 8% verantwortlich für diese Unfälle.

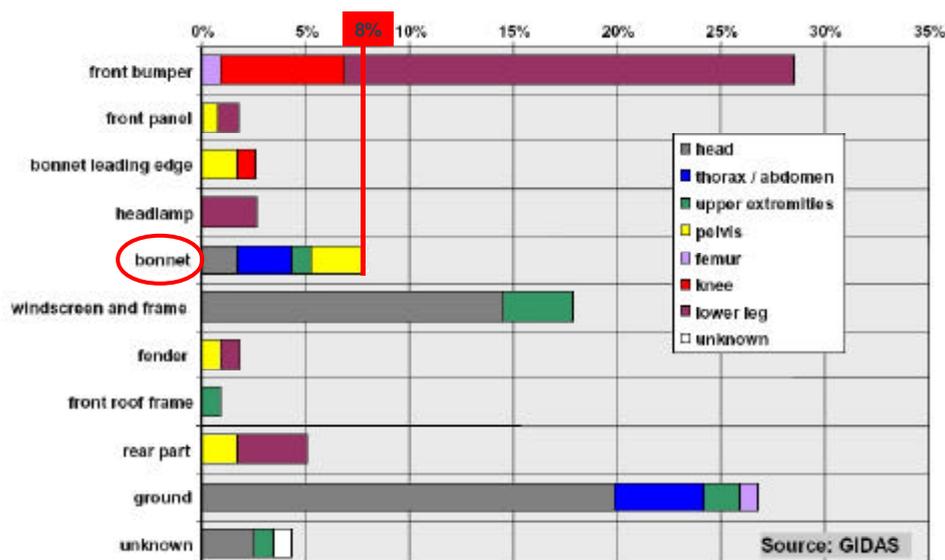


Abb. 3-4 Verletzungen und Kontaktbereiche bei Fußgängerunfällen [1]

## 4. Stand der Technik

### 4.1 Formgedächtnislegierungen

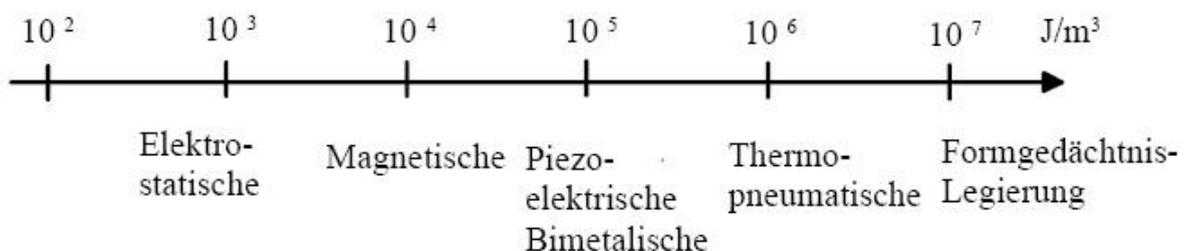
Der Begriff „Formgedächtnis“ (FG) bezeichnet die Fähigkeit einiger Materialien, sich an eine definierte Form zu „erinnern“ [2]. Bei niedriger Temperatur plastisch verformt, behält ein Werkstück aus Formgedächtnismaterial zunächst diese neue Gestalt. Im Gegensatz zu anderen Materialien nimmt der Werkstoff jedoch seine ursprüngliche Form wieder ein, wenn er über eine charakteristische Temperatur erwärmt wird.

Die ersten Aufzeichnungen „ungewöhnlicher Veränderungen“ im Kristallgitter, die in Richtung des Formgedächtniseffektes gehen, stammen aus der Zeit um 1930. Erst knapp 20 Jahre später konnten die Grundprinzipien des Phänomens erstmals wissenschaftlich erklärt werden. In den 60er Jahren gelang dem amerikanischen Wissenschaftler Bühler der Durchbruch, als er bei seinen Untersuchungen den Formgedächtniseffekt bei einer Nickel-Titan-Legierung feststellte (Handelsname: Nitinol – Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory). Dies war der Beginn der ernsthaften Erforschung der metallurgischen Zusammenhänge und der potentiellen Anwendungen. In den folgenden 10 Jahren kam eine Anzahl an kommerziellen Produkten auf den Markt und das Verständnis über den Formgedächtniseffekt stieg. Seit diesem Zeitpunkt wurde die Forschung kontinuierlich verstärkt und immer mehr Produkte mit Formgedächtnislegierungen kamen auf den Markt. Nachdem für lange Zeit die Medizintechnik der einzige Bereich war, in dem Formgedächtnis-Materialien eingesetzt wurden, sind inzwischen Anwendungen des Shape-Memory-Effekts mehr als nur ein Spielzeug der Wissenschaftler.

In den letzten Jahren wurde der Formgedächtnis- oder Shape-Memory-Effekt bei einer Vielzahl von verschiedenen Legierungen gefunden. Technisch genutzt werden wegen der überlegenen Eigenschaften bis heute jedoch fast ausschließlich Nickel-Titan-Legierungen (NiTi). In Zukunft werden diese sicher teilweise durch neue Stoffe ergänzt werden – Formgedächtnis wurde Mitte der 90er Jahre auch bei manchen Kunststoffen entdeckt. Gerade im Bereich der Polymere sind fertige Produkte aber bislang nur vereinzelt aus den Laboren der Wissenschaft herausgekommen.

Der Einsatzbereich von NiTi-Legierungen ist flexibel. Für eine sehr große Zahl von Anwendungsbereichen gibt es inzwischen Lösungen oder zumindest Ansätze durch den Einsatz von Shape-Memory-Metallen. Aus der TV-Werbung bekannt ist sicherlich der Einsatz von NiTi-Legierungen in Brillengestellen (Titanflex® von Eschenbach). Andere Einsatzmöglichkeiten bieten Formgedächtnislegierungen als „mechanische Muskeln“ bzw. Aktoren zu Steuerungszwecken oder als Implantat im menschlichen Körper in der Medizintechnik.

Im Vergleich zu anderen Aktorprinzipien besitzt der aus Formgedächtnis-Legierungen (FGL) aufgebaute Aktor eine sehr hohe Energiedichte. Abbildung 4-1 stellt die Energiedichten der unterschiedlichen Arten von Mikroaktoren dar. Im Vergleich zu anderen Aktorprinzipien zeigt der Formgedächtniseffekt (FG-Effekt) die höchste Energiedichte, die bei NiTi in der Größenordnung von  $10^7 \text{ J/m}^3$  liegt [3]. Damit erscheint der Formgedächtniseffekt insbesondere für Anwendungen interessant, bei denen trotz geringer Baugröße hohe Kräfte und Stellwege benötigt werden. Durch den Einsatz in Mikroventilen konnte eine hohe Druckdifferenz und ein großer Durchfluss realisiert werden. Weitere Vorteile sind die geringe Baugröße, die kleine Versorgungsspannung und die Biokompatibilität.



**Abb. 4-1 Energiedichte verschiedener in Mikroventilen verwendeter Aktoren [3]**

Da der FG-Aktor thermisch betrieben wird, treten bei makroskopischen Baugrößen geringe thermodynamische Effizienz und niedrige Wärmeübertragungsraten auf. Diese werden jedoch bei Mikrodimension deutlich verbessert. Zur Zeit sind bei den vorhandenen Abmessungen im Mikrometerbereich Zykluszeiten des FG-Mikroaktors von wenigen Millisekunden möglich [4].

Tabelle 4-1 zeigt die heute gängigsten Formgedächtnislegierungen [5]. Des Weiteren wurde der Formgedächtniseffekt (FGE) auch an einigen Fe-Legierungen festgestellt. Diese haben zwar einen niedrigen Preis und eine hohe Umwandlungstemperatur, sie sind allerdings wegen ihres geringen Wegeffekts zur Zeit technisch noch nicht einsetzbar.

Eigenschaften	Legierungsgruppen		
	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	6,4...6,5	7,8...8,0	7,1...7,2
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	800...1000	400...700	700...800
Zulässige Spannung $s_{zul}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	250	75	100
Bruchdehnung [%]	40...50	10...15	5...6
Maximale A <sub>S</sub> -Temp. [°C]	120	120	170
Überhitzbarkeit [°C]	400	160	300
Einweg max. $e_1$ [%]	8	4	5
Zweiweg max. $e_2$ [%]	5	1	1,2
Zahl der Zyklen [n]	100000	10000	1000
Verminderung der Effektgröße [%]	kein Abbau	ca. 10 %	ca. 10 %

**Tab. 4-1 Die Eigenschaften der wichtigsten Formgedächtnislegierungen [5]**

Die NiTi-Legierungen weisen für den industriellen Einsatz die besten Eigenschaften auf, die im weiteren kurz aufgeführt sind:

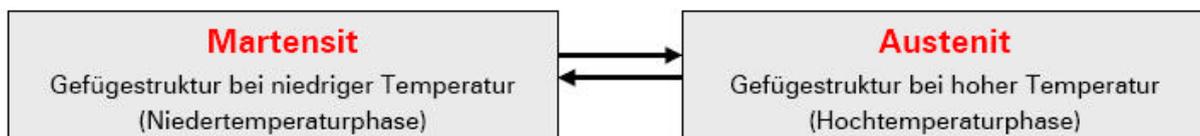
- Gute Korrosionseigenschaften
- Hohe Überhitzbarkeit
- Hohe Zyklenzahl beim Ein- und Zweiwegeffekt, d.h. gut einsetzbar in der Aktorik und Sensorik

- Temperaturbereich der Umwandlung zwischen  $-100^{\circ}\text{C}$  und  $100^{\circ}\text{C}$  [5].
- Durch Zulegieren von Gold, Platin, Zirkon oder Hafnium kann die Umwandlungstemperatur bis auf einen Wert von ca.  $170^{\circ}\text{C}$  angehoben werden. Eine wirtschaftliche Nutzung ist allerdings nahezu ausgeschlossen, da eine Zulegierung der oben genannten Elemente mit 10 bis 30 Gewichtsprozent erforderlich wäre und dies zu teuer ist.
- Ein Nachteil der NiTi-Legierungen ist ihre schlechte Zerspanbarkeit.
- Ein weiterer Nachteil ist die schlechte Dynamik, resultierend aus der langen Abkühlzeit des FG-Elements.

## 4.2 Grundlagen des Formgedächtniseffektes

Die Basis für den Formgedächtniseffekt bildet eine martensitische Transformation des Materialgefüges. Diese Strukturumwandlung ist in der Technik aus dem Bereich der Stahlhärtung bekannt. Je nach den thermodynamischen Randbedingungen – vor allem Temperatur und mechanischer Spannung – treten zwei verschiedene Gefügestrukturen auf. Sie werden als Martensit (Niedertemperaturphase) und Austenit (Hochtemperaturphase) bezeichnet.

Die Gefügeumwandlung geschieht hier nicht durch Diffusion einzelner Atome, sondern hauptsächlich durch die Verschiebung von Atomgruppen.



**Abb. 4-2 An der martensitischen Transformation beteiligte Gefügestrukturen [6]**

Obwohl diese Art der Gefügeumwandlung in einer Vielzahl von Metallen vorkommt, zeigen nur wenige von ihnen den Shape-Memory-Effekt. Neben dem Erhalt der Nachbarschaftsverhältnisse zwischen den Atomen und der Verzwilligungsmöglichkeit der Martensitstruktur, ist ein weiterer Grund für die Reversibilität der

Umwandlung die Tatsache, dass nur sehr geringe elastische Spannungen auftreten, die praktisch keine irreversiblen plastischen Verformungen durch Versetzungsbewegung bewirken. Der FG-Effekt wird in Abbildung 4-3 dargestellt.

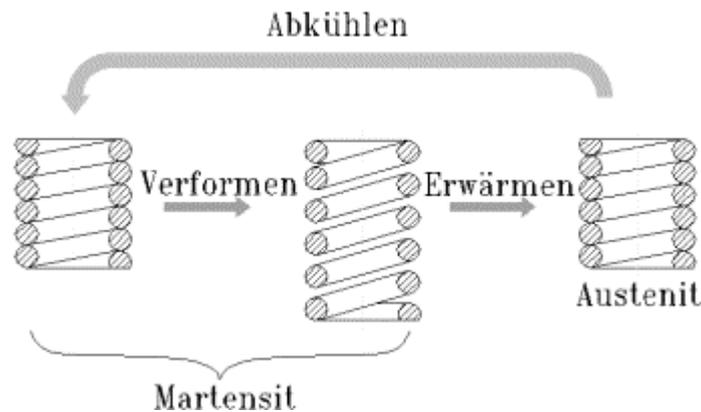


Abb. 4-3 FGL Effekt [7]

Die mikroskopischen Vorgänge des Formgedächtniseffektes sind schematisch in Abbildung 4-4 dargestellt:

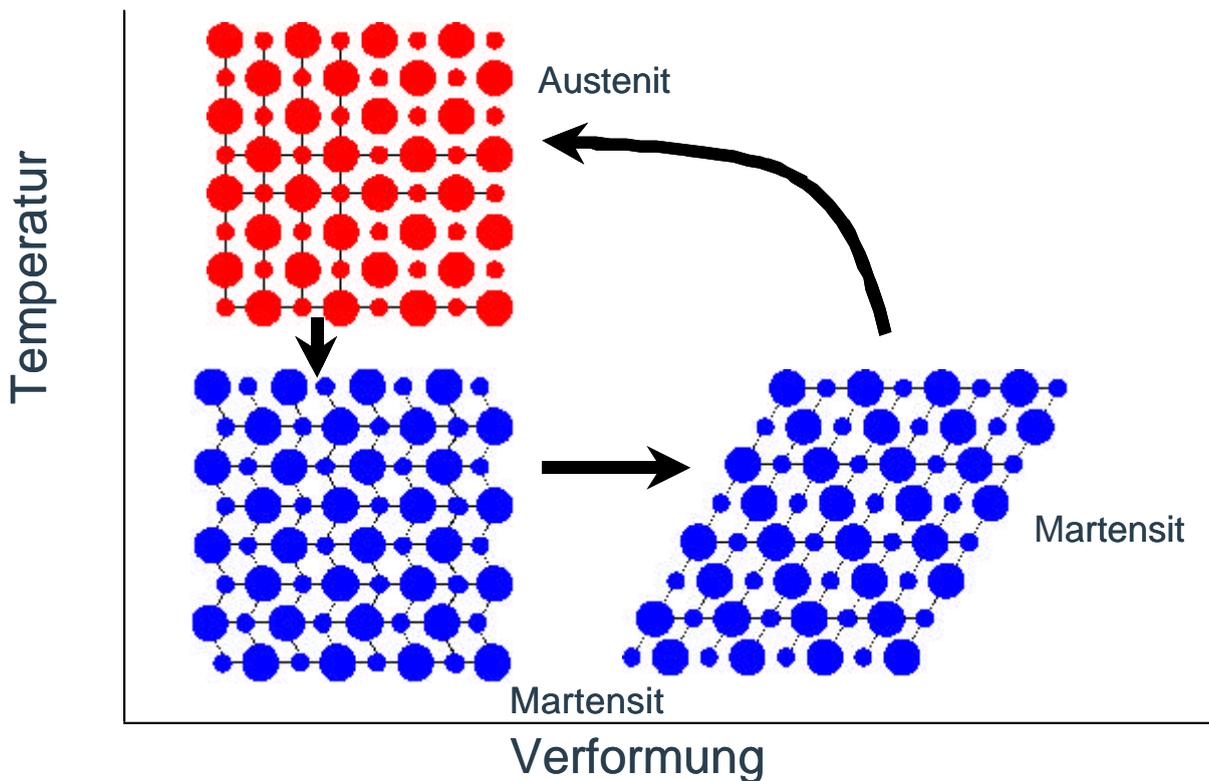


Abb. 4-4 Änderungen der Gefügestruktur beim Verformen und Erwärmung

Die Umwandlung beruht auf einer Kraft, die aus der Differenz der freien Enthalpie beider Phasen resultiert. Die Reversibilität bei der Umwandlung des thermoelastischen Martensit lässt sich folgendermaßen erklären: bei der Umwandlung treten nur sehr geringe elastische Spannungen auf. Diese geringen elastischen Spannungen verursachen nahezu keine irreversible plastische Verformung durch Bewegung der Versetzungen.

Kühlt man (siehe Abbildung 45) eine FGL aus ihrer Hochtemperaturphase ab, so wandelt sich der Austenit nach Unterschreiten der Martensit-start-Temperatur ( $M_s$ ) langsam in Martensit um. Diese Umwandlung läuft diffusionslos durch Scherbewegungen ab und ist nach Unterschreiten der Martensit-finish-Temperatur ( $M_f$ ) abgeschlossen. Im Temperaturbereich unterhalb  $M_f$  besteht das Gefüge aus Martensit, angeordnet in einer Zwillingstruktur. Der Martensit ist durch Verschieben hochbeweglicher Zwillingsgrenzen leicht verformbar. Diese pseudoplastische Verformung ist solange bleibend, bis die FGL über ihre Austenit-start-Temperatur ( $A_s$ ) hinaus erwärmt wird.

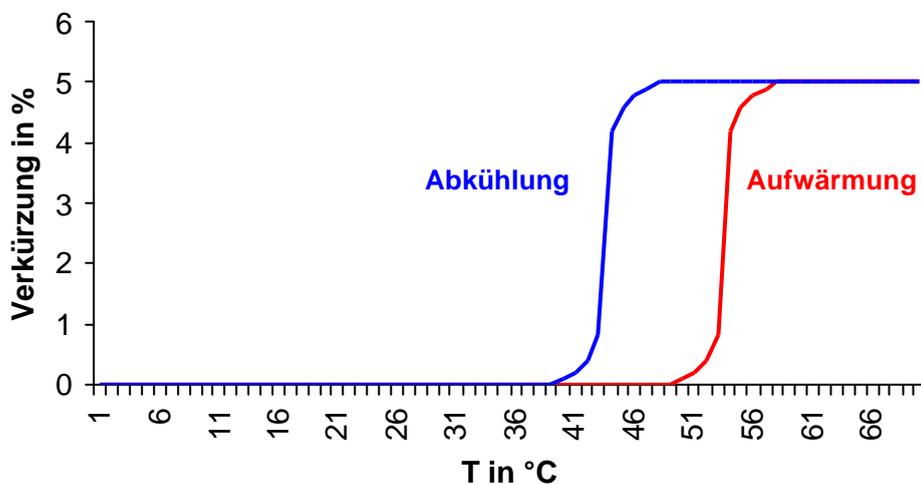


Abb. 4-5 Längenänderung der FGL bei Aufwärmung und Abkühlung

Ab der  $A_s$  Temperatur beginnt die Umwandlung in der Hochtemperaturphase. Hierbei stellt sich aufgrund der Reversibilität der thermoelastischen Umwandlung die ursprüngliche Kristallorientierung und somit die ursprüngliche Gestalt wieder ein. Die Umwandlung ist nach Überschreiten der Austenit-finish-Temperatur ( $A_f$ ) abgeschlossen und die FGL besteht aus Austenit. Beim Verkürzen durch Erwärmen

(siehe Abbildung 4-6) bringt die FGL ca. die vierfache Kraft auf, welche benötigt wird, um sie in der Niedertemperaturphase zu entzwillingen. Das Materialvolumen bleibt während der verschiedenen Zustände nahezu konstant [5].



Abb. 4-6 Längenänderung der FGL durch Erwärmung

Die Umwandlungen liegen auf verschiedenen Temperaturniveaus. So liegt die Umwandlung von der Niedertemperaturphase in die Hochtemperaturphase auf einem anderen Temperaturniveau, als die von der Hochtemperaturphase in die Niedertemperaturphase. Dies hat zur Folge, dass bei einem gesamten Zyklus eine Hysterese durchlaufen wird [5].

Die Hysteresebreite ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Zyklenzahl
- Größe der Last
- Legierungszusammensetzung

In Abbildung 47 ist der Anteil an Martensit und Austenit in einer FGL als Funktion der Temperatur schematisch dargestellt.

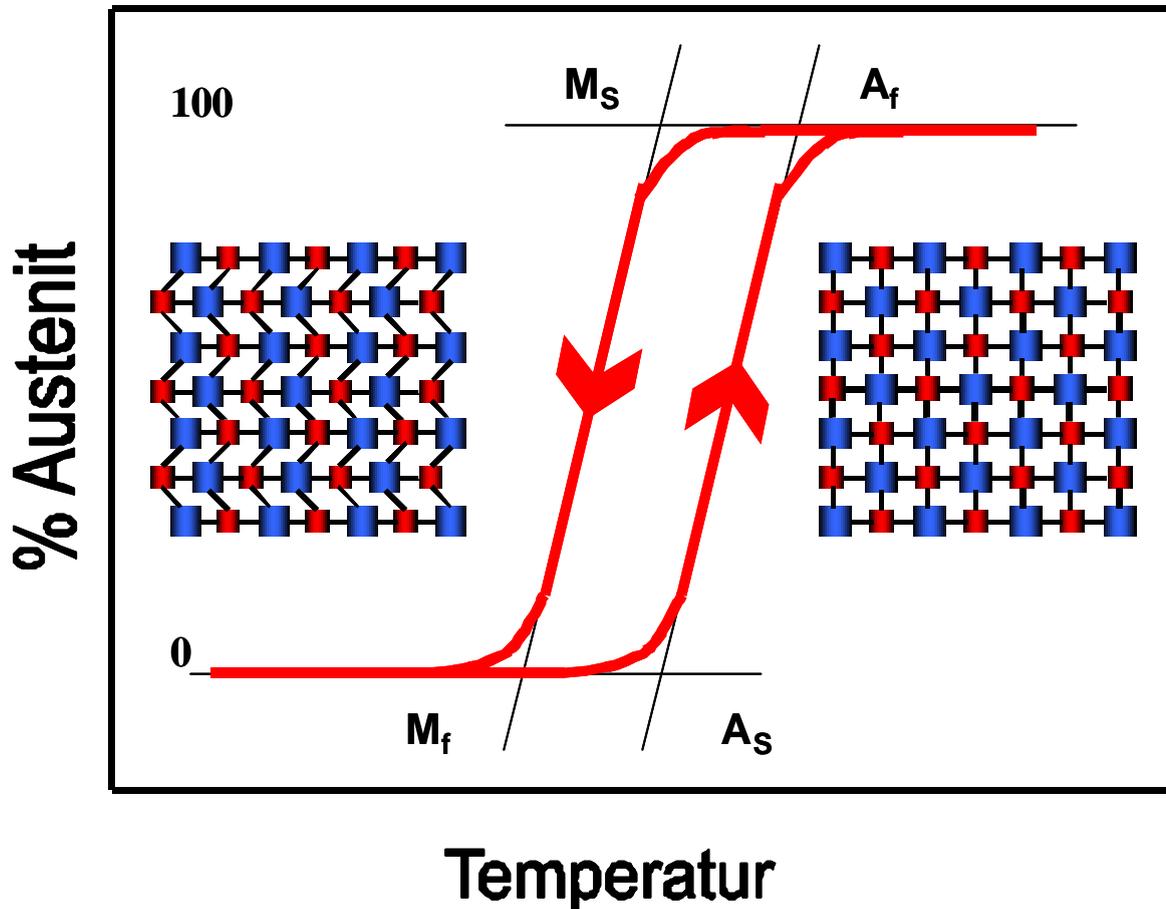


Abb. 4-7 Hystereseverlauf und Umwandlungstemperaturen [5]

$A_s$  –Austenit-start-Temperatur  
 $A_f$  –Austenit-finish-Temperatur  
 $M_s$  –Martensit-start-Temperatur  
 $M_f$  –Martensit-finish-Temperatur

- Bei einer hohen Temperatur liegt das Werkstück als Austenit (kubisch-raumzentrierte Struktur) vor.
- Beim Abkühlen wandelt sich das Gefüge nach und nach in den Martensit (rhomboedrische Struktur) um. Durch die als Verzwillingung bezeichnete Anordnung des Martensits ist es möglich, dass bei der Gefügeumwandlung keine Änderung der äußeren Form des Werkstücks stattfindet.

- Bereits durch kleine Kräfte lässt sich die Ausrichtung der verschiedenen Martensitgruppen verändern (entzwilligen), so dass das Formgedächtnis-Werkstück plastisch verformt wird.
- Durch eine Erwärmung wird das Gefüge wieder in Austenit umgewandelt. Da das Austenitgitter symmetrisch ist, gibt es nur eine mögliche Atomanordnung in dieser Phase. Da weder bei der Gefügeumwandlung noch bei der Verformung die Nachbarschaftsverhältnisse im Werkstück verändert wurden, muss es beim Erwärmen wieder seine ursprüngliche Form einnehmen.

### 4.3 *Der Formgedächtniseffekt*

Wie das FG-Material verformt wird, ist unerheblich. Solange die Verformung unterhalb der maximal durch Entzwilligung erzielbaren Dehnung bleibt, wird das FG-Element bei Erwärmung seine ursprüngliche Form wieder einnehmen. Durch Verformung über die durch Entzwilligung erreichbare Dehnung hinaus (bei NiTi maximal 8%) entstehen Versetzungen im Gefüge, die eine bleibende Verformung des Werkstücks zur Folge haben.

Der Shape-Memory-Effekt kann in verschiedenen Formen auftreten:

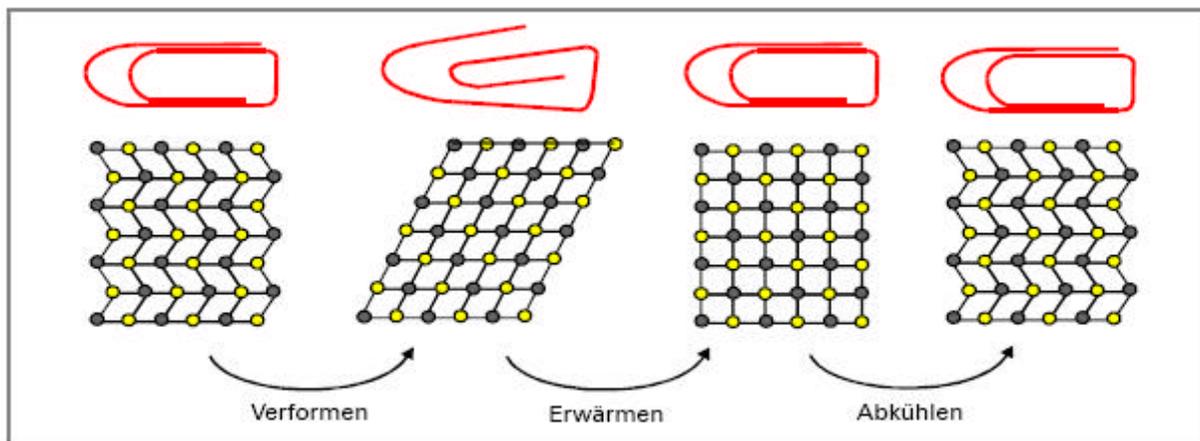
- Einweg-Effekt,
- Zweiweg-Effekt und
- Superelastizität.

Diese verschiedenen Ausprägungen werden in den nachstehenden Abschnitten kurz erläutert.

### 4.3.1 Einwegeffekt

Der bisher beschriebene Verlauf der Gefügeumwandlung wird als Einwegeffekt bezeichnet: eine definierte Form wird nur beim Erwärmen und Überschreiten der  $A_s$ -Temperatur eingenommen. Beim Abkühlen, wenn die Martensit-Struktur gebildet wird, besteht keine durch die Umwandlung bevorzugte Form. Ohne äußere Krafteinwirkung bleibt die Form erhalten, die das Werkstück in der Austenitphase eingenommen hatte. Da der Einwegeffekt immer mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist, bezeichnet man ihn als einen „thermischen Memory-Effekt“.

Shape-Memory-Elemente mit Einwegeffekt werden vor allem als Verbindungselemente verwendet. Oft wird der FG-Effekt bei diesem Einsatzzweck nur ein einziges Mal in Anspruch genommen. Beispiel hierfür ist die platzsparende Verbindung von Rohrleitungen in Flugzeugen: ein Formgedächtnis-Rohr wird bei niedriger Temperatur aufgeweitet, über die zu verbindenden Rohrenden geschoben und erwärmt, so dass es sich fest um die Rohre presst.



**Abb. 4-8 Gefügeänderungen während des Einweg-Effekts [6]**

Der Einwegeffekt kann mehrmals wiederholt werden. Die dazu notwendige Verformung des Martensits muss durch eine äußere Kraft erfolgen, damit der Zyklus erneut ablaufen kann.

Bei Verhinderung der Formänderung werden sehr hohe Kräfte erzeugt. So ist ein gestreckter Draht mit 4mm Durchmesser einmalig in der Lage, eine Last von ca. 1

Tonne anzuheben. Um längere Lebenszeiten des Effekts zu erreichen, muss die Belastung jedoch begrenzt werden. Durch Reduzieren der Belastung auf 150kg erreicht man mit dem gleichen Draht schon Lebensdauern von über 10.000 Zyklen [8].

### 4.3.2 Zweiwegverhalten und Zweiwegeffekt

Bei dem oben beschriebenen Einwegeffekt tritt beim erneuten Abkühlen keine weitere Formänderung auf. Dadurch ist dieser Mechanismus für Anwendungen im Bereich der Aktorik ungeeignet. Bei der Verwendung einer FG-Legierung als Stellelement ist in der Abkühlphase eine automatische Rückstellbewegung in eine Kaltform erforderlich. Diese Formrückkehr kann man auf zwei Arten realisieren. Dies sind:

- äußere Zweiwegeffekte (extrinsisch)
- intrinsische Zweiwegeffekte

Beim äußeren Zweiwegeffekt wird die Formrückkehr beim Abkühlen dem Bauteil durch einen mechanischen Energiespeicher (Feder, Masse, o.ä.) aufgezwungen, der während der Bewegung beim Erwärmen des FG-Elements gespannt wurde.

Unter bestimmten Bedingungen können FG-Legierungen aber auch einen sogenannten intrinsischen Zweiwegeffekt aufweisen, d.h. sie können sich an zwei Formen – eine bei hoher und eine bei niedriger Temperatur – „erinnern“. Um auch beim Abkühlen eine definierte Form zu erhalten, muss das Werkstück durch thermomechanische Behandlungszyklen „trainiert“ werden. Dadurch bilden sich im Material Spannungsfelder aus, die bei der Abkühlung die Bildung von bestimmten Martensit-Varianten fördern. Somit stellt die trainierte Form für den kalten Zustand lediglich eine Vorzugsform des Martensit-Gefüges dar. Da diese Form bei der Umwandlung nur eingenommen werden kann, wenn ihr keine äußeren Kräfte entgegenwirken, kann das FG-Element in der Abkühlungsphase keine große Arbeit verrichten.

### 4.3.3 Superelastizität (Pseudoelastizität)

Die Gefügeumwandlung und der Verzwilligungsvorgang einer Formgedächtnislegierung lassen sich nutzen, um eine als Superelastizität bezeichnete Materialeigenschaft zu erzielen.



**Abb. 4-9 Superelastizität [6]**

Wie von elastischen Werkstoffen bekannt, tritt bei Belastung eine Formänderung auf, die bei Entlastung sofort wieder zurückgeht (bei konstanter Temperatur). Man spricht von dem mechanischen Memory-Effekt.

Im Vergleich zu konventionellen Metallen erreicht man etwa 20-fache scheinbar elastische Dehnbarkeiten. Die Rückstellkraft ist dabei über weite Bereiche annähernd konstant.

Der mechanische Memory-Effekt ist durch folgende Unterschiede zum Ein- und Zweiwegeeffekt gekennzeichnet:

- Die Umwandlung der Gefügestruktur erfolgt bei konstanter Temperatur. Diese Temperatur liegt in einem eingeschränkten Bereich knapp oberhalb der  $A_f$ -Temperatur. Ohne äußere Krafteinwirkung befindet sich das FG-Element in der Hochtemperaturphase Austenit.
- Die Gefügeumwandlung wird nicht durch eine Temperaturänderung, sondern durch Einwirken einer mechanischen Spannung hervorgerufen. Durch die äußere Belastung entsteht auch oberhalb der  $M_s$ -Temperatur die Martensit-Struktur, durch die das Werkstück verformbar wird. Nach Wegfall der Krafteinwirkung bildet sich die Austenitphase wieder zurück. Die ursprüngliche Form entsteht.

## 4.4 NiTi-Legierung

Im Rahmen dieses Projekts wird eine NiTi-basierende Formgedächtnislegierung verwendet. Daher wird im Folgenden auf die grundlegenden Formgedächtniseigenschaften des Materials eingegangen.

Seit 1961 der Formgedächtniseffekt in NiTi Legierungen von Purdy und Parr vom Naval Ordnance Laboratory erstmals beschrieben wurde [9], hat diese Legierung bereits zahlreiche technische Anwendungen gefunden. Die Eigenschaften der Legierung sind stark abhängig von der chemischen Zusammensetzung und ihrer thermomechanischen Behandlung. Der Grund für diese Empfindlichkeit findet sich in der geringen Löslichkeit von Ni und Ti in der NiTi-Phase. Zwischen Ni-reichen und Ti-reichen Legierungen können charakteristische Unterschiede festgestellt werden. Ni-reiche Legierungen zeigen eine starke Abhängigkeit der  $M_s$ -Temperatur von der chemischen Zusammensetzung. Bei Ti-reichen Legierungen ist die Abhängigkeit wesentlich geringer, da die Bildung Ti-reicher Ausscheidungen für eine nahezu unveränderte Matrixzusammensetzung sorgt. Die  $M_s$ -Temperatur liegt bei Ni-reichen Legierungen unterhalb der Raumtemperatur. Maximale  $M_s$ -Temperaturen zwischen 90 und 100°C werden bei einer Ni-Konzentration unter 49,5At.-% erreicht [10]. Die Abhängigkeit der Martensit-start-Temperatur  $M_s$  vom Ni-Gehalt ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

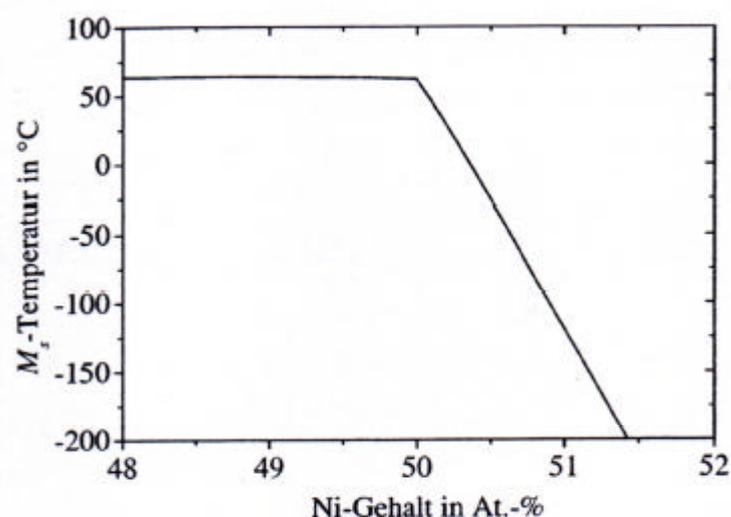


Abb. 4-10 Martensit-start-Temperatur  $M_s$  in Abhängigkeit vom Ni-Gehalt [10]

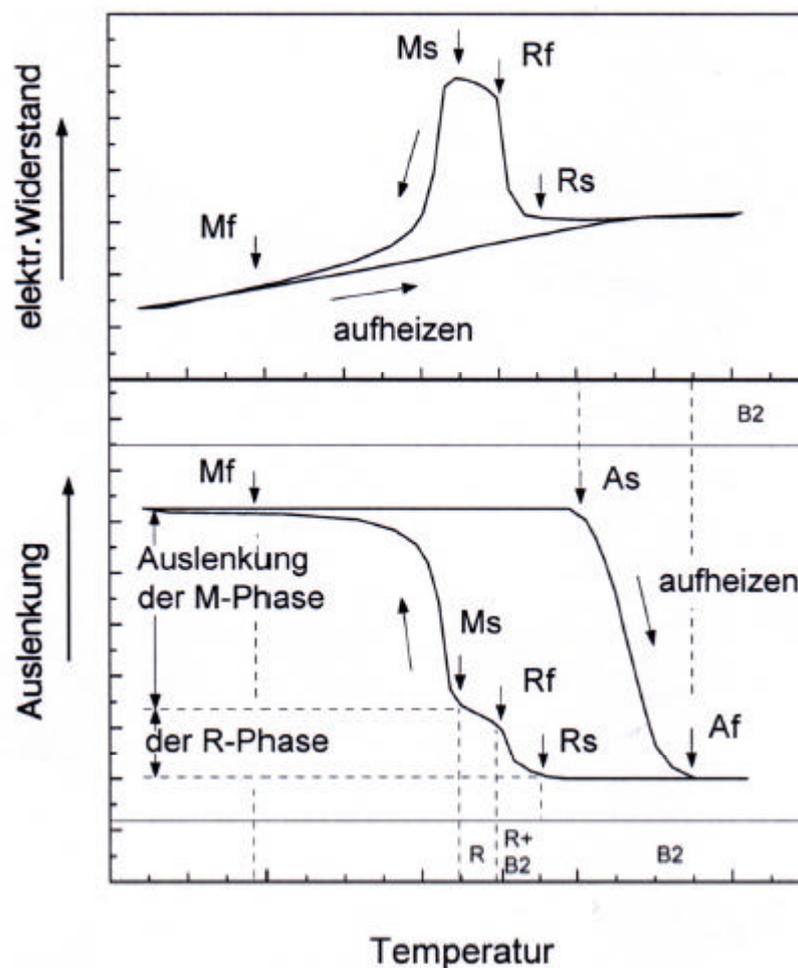
Legierungen mit einem Ni-Gehalt unter 50,5At.-% sind unempfindlich hinsichtlich Wärmebehandlung unterhalb der Rekristallisationstemperatur von ca. 550°C. Bei Temperaturen oberhalb 550°C bilden sich Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>-Ausscheidungen, womit der Ni-Gehalt verändert wird. Dagegen werden die Eigenschaften Ni-basierender FGL stark durch thermomechanische Behandlungen (Kaltverformung und nachfolgende Wärmebehandlung unterhalb der Rekristallisationstemperatur) beeinflusst. Für das kaltverformte Material geht man davon aus, dass die durch Kaltverformung erzeugten Versetzungen durch Wärmebehandlung zu Zellen umorientiert werden. Dadurch entstehen versetzungsarme Zonen, in denen eine Bewegung der Zwillingsgrenzen möglich wird. So wird durch Zellenbildung eine Verfestigung des Materials erreicht und die Neigung zu plastischer Deformation unterdrückt. Der Grad der Kaltverformung als auch die Temperatur der Wärmebehandlung beeinflussen die plastische Deformationsgrenze und die erzielbare reversible Dehnung in gegensätzlicher Weise und sind daher sorgfältig zu wählen, um die gewünschten Materialeigenschaften zu erzielen. In diesem Fall ist die Konditionierungstemperatur wichtig, da oberhalb der Rekristallisationstemperatur die durch Kaltverformung erzeugte Versetzungsdichte wieder abgebaut wird, was zu einer Verschlechterung der Formgedächtniseigenschaften führt. Gleichzeitig hat die Korngröße in polykristallinen FGL Einfluss auf die Formgedächtniseigenschaften, wobei mit abnehmender Korngröße ebenfalls eine Erhöhung der reversiblen Dehnung einhergeht [11]. Durch thermomechanische Behandlung von polykristallinem NiTi ist eine maximale reversible Dehnung von 7 bis 8% im martensitischen Zustand erreichbar [12].

Wenn die martensitische Umwandlung durch eine hohe Defektdichte oder durch Ni-Überschuss zu niedrigeren Übergangstemperaturen verschoben wird, so kommt es zur Bildung einer rhomboedrigen Zwischenphase, der sogenannten R-Phase, und es entsteht der zweistufige Übergang B2 über R-Phase zu B19'.

Die R-Phase besitzt eine trigonale Kristallstruktur und geht aus der B2-Phase durch Gitterdeformation in {111} Richtung hervor [13]. In {111}-Richtung wird eine maximale reversible Gitterdehnung von ca. 1% erzielt. In polykristallinen Materialien sind maximale reversible Gitterdehnungen zwischen 0,5 und 0,8% möglich. Das Auftreten

der R-Phase zeigt sich beispielsweise in zusätzlichen Röntgenreflexen bei den  $1/3$ -Position des reziproken Gitters [14], die ursprünglich als prämartensitische Phänomene gedeutet wurden.

Abbildung 4-11 zeigt den Einfluss der Umwandlungssequenz einer Biegebalkenprobe aus thermomechanisch behandeltem äquiatomarem NiTi auf die mechanische Auslenkung und den elektrischen Widerstand. Die Auslenkung wurde bei konstanter Belastung aufgezeichnet.



**Abb. 4-11 Charakteristische Widerstands- und Auslenkungs-Kennlinien einer NiTi-Legierung in Abhängigkeit der Temperatur unter anliegender Last [15]**

Bei Kühlung der Probe beginnt der elektrische Widerstand bei der rhomboedrigen Starttemperatur  $R_s$  anzusteigen. Dieser Anstieg fällt mit der Verringerung der mechanischen Auslenkung des Biegebalkens zusammen. Im Temperaturfenster zwischen der Temperatur  $R_s$  und der Endtemperatur  $R_f$  koexistieren beide Phasen

B2 und R. Die Temperatur, bei der der elektrische Widerstand abnimmt, fällt mit einem zweiten steilen Anstieg der Balkenauslenkung zusammen. Hier koexistieren die R- und B19'-Phase bis die  $M_s$ -Temperatur erreicht ist. Beim Erwärmen erfolgt nur eine einstufige Umwandlung von der B19'-Phase direkt in die B2-Phase. Kühlt man ausgehend vom austenitischen Gefüge nur bis  $M_s$  ab und erwärmt dann wieder, so tritt auf Grund der einstufigen Umwandlung zwischen Austenit und R-Phase eine nur geringe Hysterese sowohl in der Auslenkungs- als auch in der Widerstandskennlinie auf. In der genannten Arbeit [15] wurde die R-Phasenumwandlung einer NiTi-Legierung für das FG-Mikroventil während des Betriebs bei Raumtemperatur verwendet.

## 5. Stand der Technik (KFZ Sicherheitssysteme)

Um Unfälle zu vermeiden und die Gefahr von Verletzungen während Automobilunfällen zu minimieren, wurde besonders in den letzten Jahren eine breite Vielfalt von Sicherheitssystemen entwickelt. Per Definition [16] sind aktive Sicherheitssysteme im Fahrzeug alle jene Systeme, die den Fahrer in die Lage versetzen, Unfälle möglichst zu vermeiden. Passive Sicherheitssysteme sind alle Systeme am Fahrzeug, die bei Unfällen die Fahrzeuginsassen und die Unfallgegnern vor schweren oder tödlichen Verletzungen schützen. Die Systeme sollten eigentlich niemals benötigt werden.

Allgemein werden diese Sicherheitssysteme in zwei Hauptgruppen klassifiziert: Die aktiven Sicherheitssysteme und die passiven Sicherheitssysteme. In Abbildung 5-1 wird ein Überblick über die verschiedenen Sicherheitssysteme in Fahrzeugen gegeben.

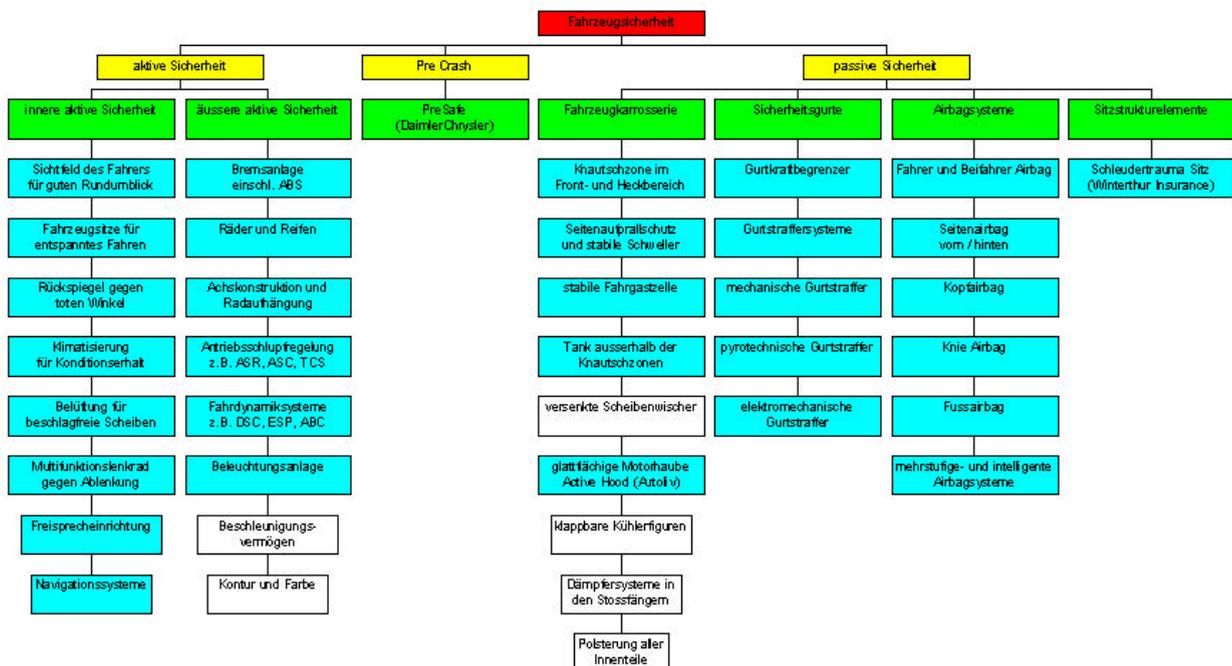


Abb. 5-1 Überblick der Automobil Sicherheitssysteme

Alle uns derzeit bekannten Sicherheitssysteme wurden aufgelistet, aber nur die Systeme in den blauen Kästen werden beschrieben. Die Aktivierung von Sicherheitssystemen vor dem Aufprall (pre-crash) ist ebenso wichtig wie die

Aktivierung von Systemen während des Aufpralls (in-crash) und nach dem Aufprall (post-crash).

Es besteht auch eine kleine Gruppe zwischen den zwei erwähnten Hauptgruppen, das sogenannte "Pre-Crash-Sicherheitssystem". Das Pre-Crash-Sicherheitssystem ist vorher, während und nach einem Unfall aktiv und wurde durch die DaimlerChrysler Gesellschaft [17] entwickelt. Es wird in den S-Klasse-Modellen seit 2002 verwendet.

### *5.1 Aktive Sicherheitssysteme*

Diese Gruppe selbst wird weiter in interne und externe Sicherheitssysteme geteilt.

#### **5.1.1 Interne Aktive Sicherheitssysteme**

Unter der internen Sicherheit versteht man die Fahrer-Atmosphäre zu erhöhen, seine Konzentration zu vergrößern und sein Wohlbefinden zu steigern. Das kann z. B. durch bequeme Sitze, eine gute Klimakontrolle mit genug frischer Luft, gute Übersicht mit entsprechenden Spiegeln mit reduzierten toten Winkeln ohne störende A-, B- oder C-Säulen erreicht werden. In hochentwickelteren Autos enthalten aktive Sicherheitssysteme auch ein multifunktionelles Steuerrad, Navigationssysteme und Freisprecheinrichtungen für Telefone.

##### **Fahrzeugsitze**

Die Fahrzeugsitze sollten komfortabel sein für ein entspanntes Fahren.

##### **Rückspiegel**

Die Rückspiegel sollten so eingestellt sein dass es möglichst keinen toten Winkel gibt.

## Sichtfeld

Unter Sichtfeld versteht man die Sichtverhältnisse durch Innen- und Außenspiegel sowie Verdeckung durch A-, B- und C-Säulen [18].

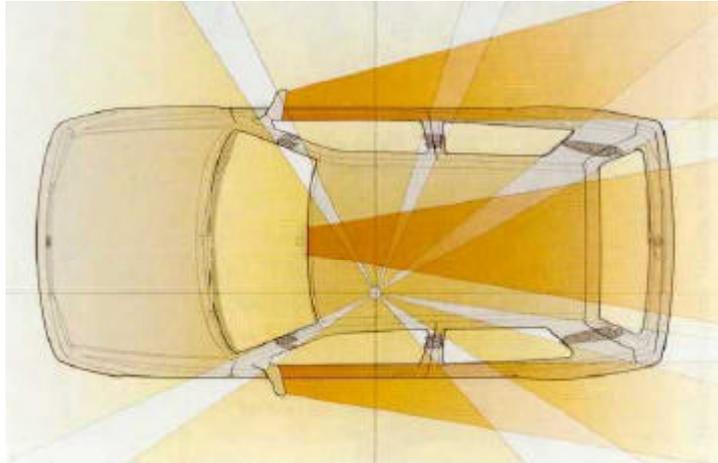


Abb. 5-2 Sichtverhältnisse beim VW Golf [18]

## Klimatisierung

An das Klimatisierungssystem für den Innenraum eines Kraftfahrzeuges werden bestimmte Anforderungen gestellt, z. B.:

- Fahrgastzelle schnell auf eine angenehme Temperatur erwärmen oder abkühlen
- Angenehme Temperatur bei jeder äußeren Witterung aufrechterhalten
- Für jeden Insassen eine angenehme Luftströmung und Lufttemperatur erzeugen
- Luftqualität verbessern
- Einfache Bedienung
- Keine Belästigung durch ausströmende Luft

Damit die oben genannten Anforderungen erfüllt werden können, muss die Klimaanlage folgende Aufgaben erfüllen:

Sie muss die Luft:

- Zuführen und reinigen
- Erwärmen oder abkühlen
- Ent- oder befeuchten

### **Belüftung**

Leistungsfähigkeit und Aufmerksamkeit der Menschen sind stark von der Temperatur und der Beschaffenheit der sie umgebenden Luft abhängig. Es ist deshalb erforderlich, den Fahrgastraum mit möglichst gefilterter Frischluft zu versorgen, die je nach Außentemperatur beheizt oder gekühlt werden muss.

Belüftungseinrichtungen sollten so beschaffen sein, dass:

- Für alle Fahrgäste genügend (auch beheizte) Frischluft zur Verfügung steht
- Die verbrauchte Luft durch Austrittsöffnungen beseitigt wird
- Kein Staub und Wasser in das Fahrzeuginnere gelangt
- Die Luft so gelenkt wird, dass sich die Fenster nicht beschlagen
- Sich nirgends Kaltluft festsetzt
- Der Luftaustausch möglichst zugfrei erfolgt

### **Multifunktionslenkrad**

Gegen Ablenkung im Straßenverkehr ist das Multifunktionslenkrad gut geeignet.

### **Freisprecheinrichtung**

Freisprecheinrichtungen dienen dazu, den Fahrer nicht abzulenken und damit sich dieser besser auf die Straße konzentrieren kann.

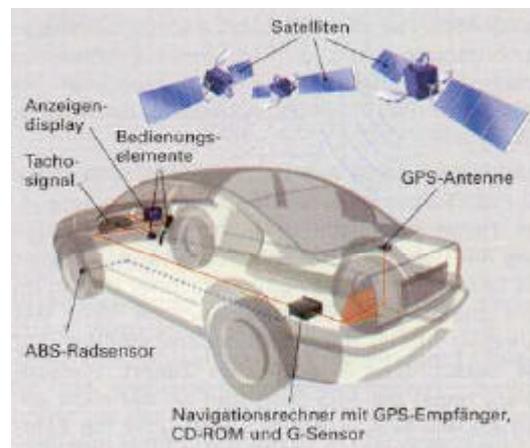
### **Navigationssysteme**

Sie bieten Hilfe bei der Suche nach der richtigen Strecke zum Zielort und bei der Orientierung in unbekanntem Gelände [19]. Navigationssysteme können folgende Aufgaben übernehmen:

- Eigenpositionsbestimmung
- Positionsübermittlung
- Berechnung der optimalen Streckenführung unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation
- Zielführung durch Fahrtrichtungsempfehlung

Im Abbildung 5-3 sind alle beteiligten Komponenten und Teilsysteme dargestellt. Die Eingangssignale werden vom Navigationsrechner verarbeitet und auf dem Display in Form von Sprache und Bild ausgegeben. Das Display und andere Informationen

werden im Idealfall auf die Frontscheibe projiziert, damit der Fahrer immer den Blick auf die Strasse hat.



**Abb. 5-3 Komponenten eines Navigationssystems [19]**

### 5.1.2 Externe Aktive Sicherheitssysteme

Zu den externen aktiven Sicherheitssystemen gehören das wohlbekannte ABS (Anti-Blockier-System), die ASR (Antriebschlupf-Regelung) sowie die EMS (Elektronische-Motorleistungs-Steuerung) und MSR (Motor-Schleppmoment-Regelung). Darüber hinaus sind die Fahrdynamiksysteme wie FDR (Fahr-Dynamik-Regelung) und ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm) Teil dieses Sicherheitssystems. Weitere nicht beschriebene Systeme sind TCS (Traction Control System) und ABC (Active Body Control). Beleuchtungsanlage und Radaufhängung sind weitere externe aktive Sicherheitssysteme.

#### **Bremsanlage inklusive ABS (Anti Blockier System)**

Bremsen dienen bei einem Kraftfahrzeug zur Verzögerung der Geschwindigkeit, zum Abbremsen bis zum Stillstand und zum Sichern gegen Wegrollen. Beim Bremsen wird Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt. Unter Bremsanlage versteht man Betriebsbremse (Fußbremse), Hilfsbremse, Feststellbremse (Handbremse), Dauerbremsanlage und das Antiblockiersystem (ABS).

Das ABS besteht aus den Bauteilen einer Betriebsbremsanlage, die während des Bremsens selbsttätig den Schlupf der Räder regeln. Die Räder werden durch

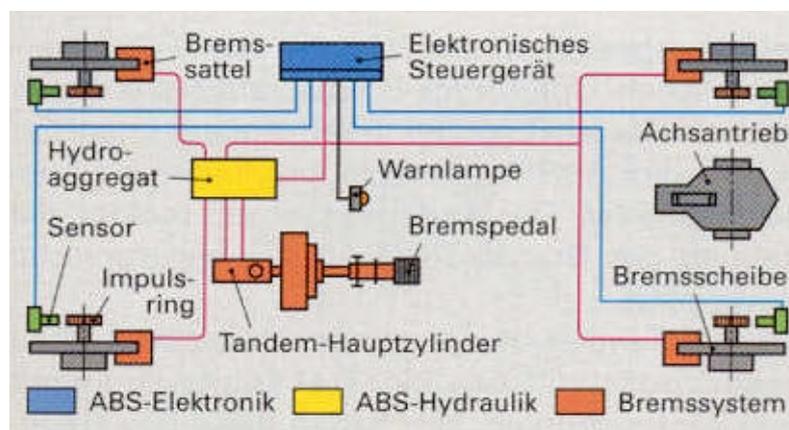
Sensoren überwacht. Mit Hilfe ihrer Signale werden die Bremskräfte an den Rädern geregelt. Das ABS verhindert die Blockierung der Räder beim Bremsen. Nur rollende Räder sind lenkbar und können Seitenführungskräfte übertragen. Die Vorteile sind:

- Seitenführungskräfte und Fahrstabilität bleiben erhalten, wodurch die Schleudergefahr verringert wird
- Fahrzeug bleibt lenkbar, dadurch kann man Hindernissen ausweichen
- Erreichen eines optimalen Bremsweges auf normalen Strassen (nicht bei Sand und Schnee)
- „Bremsplatten“ an den Reifen werden verhindert, da kein Rad blockiert. Die Reifen werden geschont.

Der Aufbau des ABS Systems in Abbildung 5-4 besteht aus folgenden Komponenten:

- Radsensoren mit Impulsringen
- Elektronisches Steuergerät
- Magnet-/Hydraulikventile

Die Magnet/Hydraulikventile werden vom elektronischen Steuergerät in den drei Regelphasen Druckaufbau, Druckhalten und Druckabbau geschaltet.



**Abb. 5-4 ABS mit Rückförderung im geschlossenen Kreis (Schemadarstellung) [19]**

Ein weiteres System, Brems-Assistent (BAS) genannt, dient zur Erkennung von Notsituationen und sorgt für volles Eingreifen der Bremsen.

### Antriebschlupfregelung

Kritische Fahrbedingungen [20] können nicht nur beim Bremsen, sondern auch beim Anfahren und Beschleunigung (besonders auf glatter Fahrbahn am Berg) oder bei

Kurvenfahrt auftreten. Elektronische Regelsysteme sollen ein sicheres Führen eines Kraftfahrzeuges beim Beschleunigen, Lenken und Bremsen gewährleisten.

ASR bzw. ASC (Antriebs-Schlupf-Regelung) verhindert ein Durchdrehen der Räder beim Anfahren und Beschleunigen. Das ASR hat weiterhin die Aufgabe den Fahrer zu entlasten und bei Beschleunigung Stabilität und Lenkfähigkeit des Fahrzeuges zu sichern (sofern die physikalischen Grenzen nicht überschritten werden).

EMS (Elektronische-Motorleistungs-Steuerung), verringert das Motormoment bis die Räder greifen. Damit die ASR, unabhängig davon wie viel Gas der Fahrer gibt, eingreifen kann, muss anstelle der mechanischen Verbindung zwischen Fahrpedal und Drosselklappe oder Einspritzpumpe eine EMS (auch „elektronisches Gaspedal“ oder „Egas“ genannt) treten. Die Stellung des Fahrpedals wird über einen Pedalweggeber in ein elektrisches Signal umgewandelt, das im EMS-Steuergerät unter Berücksichtigung vorprogrammierter Größen und von Signalen anderer Sensoren (z.B. Temperatur, Motordrehzahl) in eine Steuerspannung für einen elektrischen Stellmotor umgesetzt wird. Dieser Stellmotor betätigt die Drosselklappe oder den Verstellhebel der Dieseleinspritzpumpe und meldet deren Position an das Steuergerät zurück.

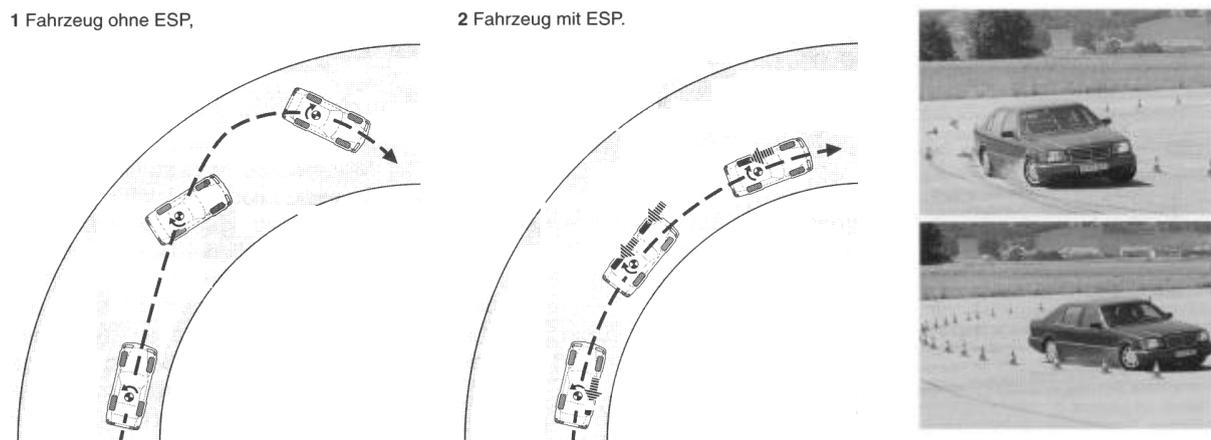
MSR (Motor-Schleppmoment-Regelung), verringert den Bremsschlupf der Antriebsräder im Schiebebetrieb durch Motormomentenerhöhung. Beim Zurückschalten oder bei abruptem Gaswegnehmen auf glatter Fahrbahn können die Antriebsräder durch die Bremswirkung des Motors einen zu hohen Bremsschlupf aufweisen. Die MSR muss das Motordrehmoment durch leichtes Gasgeben etwas anheben, um so die Abbremsung der Räder auf ein für die Fahrstabilität noch zulässiges Maß zu verringern.

### **Fahrdynamiksysteme**

FDR (Fahr-Dynamik-Regelung) wie ESP (Elektronisches-Stabilitäts-Programm) bzw. DSC (Digitale-Stabilitäts-Kontrolle), verhindert ein Schleudern des Fahrzeuges. In kritischen Fahrsituationen wird durch geregelten Bremseneingriff an den einzelnen Rädern ein zum Schleudern neigendes Fahrzeug stabilisiert. Die über die Sensoren erfassten Signale wie z.B. Raddrehzahl, Lenkbewegung und Querbeschleunigung

werden vom Steuergerät als Istwerte aufgenommen und mit eingespeicherten Sollwerten verglichen. Weichen die Istwerte vom gewünschten und tatsächlichen Kurs (Sollwert) ab, so greift das System, schneller als der Mensch es könnte, ein und regelt. Das Fahrzeug wird gezielt so gebremst, dass es sich stabil verhält. Das ESP System entscheidet:

- welches Rad wie stark abgebremst oder beschleunigt wird
- ob das Motormoment herabgesetzt wird.



**Abb. 5-5 Beschleunigte Kurvenfahrt mit und ohne ESP [20]**

### Beleuchtungsanlage

Aufgaben der lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug sind:

- Die Ausleuchtung der Fahrbahn (z.B. durch Fernscheinwerfer, Abblendscheinwerfer)
- Die Konturen des Fahrzeuges bei Dunkelheit sichtbar zu machen (z.B. durch Begrenzungs- und Parkleuchten, Rückstrahler)
- Anderen Verkehrsteilnehmern die Bewegungsabsichten des Fahrzeugführers anzuzeigen (durch Blinkleuchten, Bremsleuchten)
- Andere Verkehrsteilnehmer zu warnen (z.B. Warnblinkanlage)
- Den Fahrer auf bestimmte Schaltzustände der lichttechnischen Anlage aufmerksam zu machen (z.B. Fernlichtkontrolle)

## 5.2 Pre-Crash-Sicherheitssysteme

Unter dem Namen PreSafe [17] haben die Fahrzeugentwickler von Mercedes-Benz zum Beispiel ein technisches Paket geschnürt, das das klassische Aufgabenfeld passiver Sicherheit überschreitet und gerade dadurch den Insassenschutz verbessert. Bei PreSafe handelt es sich um Schutzsysteme, die vorsorglich aktiviert werden – also bereits vor dem Unfallereignis, sobald das Fahrzeug in eine gefährliche Situation gerät. Ein vorsorglicher Schutz war mit den bisherigen Systemen der passiven Sicherheit nicht möglich, da diese zumeist irreversibel arbeiten, sich also nur ein einziges Mal nutzen lassen. So werden Airbags und Gurtstraffer pyrotechnisch gezündet, sobald deren Sensoren einen Aufprall detektieren. Dabei müssen die Schutzsysteme innerhalb weniger Millisekunden voll wirksam sein. Durch das Konzept des vorsorglichen Schutzes, das mit PreSafe erstmalig realisiert wird, gewinnt man demgegenüber viel Zeit. Denn vom Auftreten einer kritischen Situation bis zum Unfall vergehen in den meisten Fällen wenigstens Sekundenbruchteile, oft sogar mehrere Sekunden. Diesen Zeitgewinn setzt PreSafe in einen Sicherheitsgewinn um – und zwar umso umfassender, je mehr Zeit zur Verfügung steht. Ein Beispiel für PreSafe-Systeme ist der motorisch angetriebene Gurtstraffer. Anders als sein pyrotechnisch ausgelöstes Gegenstück, arbeitet er reversibel. Daher kann man ihn bereits beim Auftreten einer kritischen Situation auslösen. Er sorgt dafür, dass die Sicherheitsgurte von Fahrer und Beifahrer frühzeitig angezogen werden, damit sie sich bei einem Unfall in einer günstigen Position befinden. Vorteil: Das Gewinnen von möglichst viel Zeit zum optimalen Schutz der Insassen im Crash-Fall.

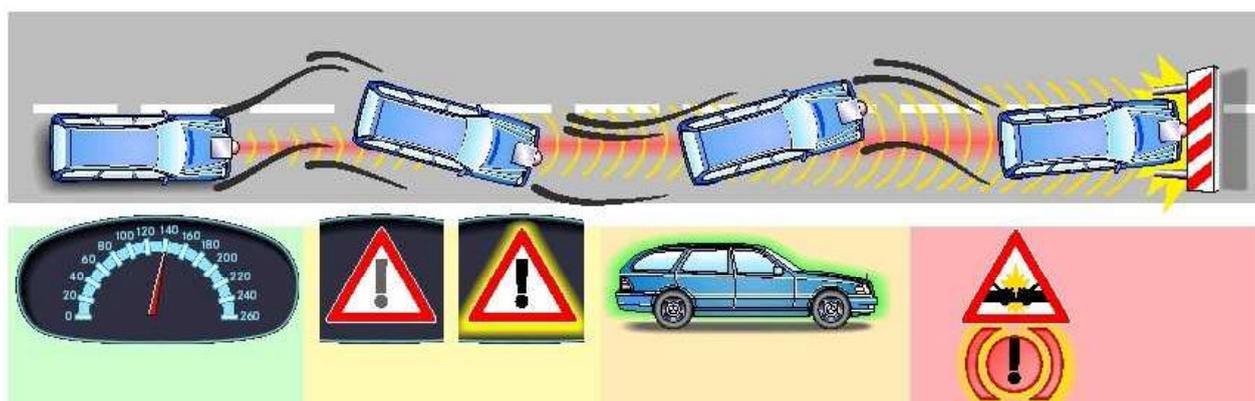


Abb. 5-6 Das Pre-Crash-Konzept: Vorsorglich schützen [17]

Das Konzept der integrierten Sicherheit verknüpft passive und aktive Sicherheitssysteme, um so die Sicherheit zu steigern. In einer normalen Fahrsituation befindet sich das Fahrzeug gleichsam im Komfortzustand. Ergonomisch optimierte Bedienelemente und Anzeigen sowie modernste Fahrwerkstechnik sorgen für sichere Fahrt. Komfort- und Assistenzsysteme, die Fahrdynamikdaten und Informationen aus dem Umfeld des Fahrzeugs verarbeiten und interpretieren, unterstützen den Fahrer bei Routineaufgaben und warnen ihn vor einer Gefahr. Die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall ist nun erhöht, aber der Fahrer kann noch rechtzeitig reagieren. Gerät das Fahrzeug in eine kritische Situation – beginnt es etwa zu schleudern oder löst der Fahrer eine Vollbremsung aus –, so werden nun nach dem PreSafe-Konzept reversible Maßnahmen zum vorausschauenden Insassenschutz aktiviert. Das Fahrzeug und die Insassen befinden sich im Zustand der maximalen Sicherheit.

### *5.3 Passive Sicherheitssysteme*

Die passiven Sicherheitssysteme können in die folgenden vier Hauptbereiche eingeteilt werden: Autokarosserie, Sicherheitsgurte, Airbag-Systeme und Sitz-Strukturen.

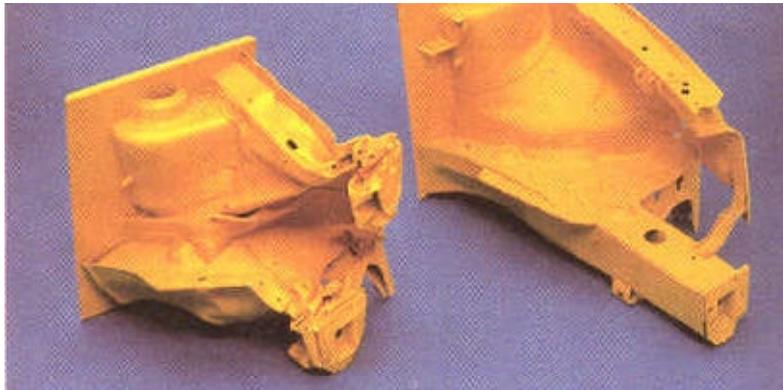
#### **5.3.1 Autokarosserie**

Unter dem Fahrzeugaufbau versteht man die zum Fahrwerk gehörende Tragkonstruktion an der die einzelnen Teilsätze wie Motor, Lenkung, Federung, Achsen usw. befestigt sind.

#### **Knautschzone**

Im Bereich der Knautschzonen werden Längs- oder Seitenträger eingesetzt, die sich z.B. bei Frontalunfällen zunächst im vorderen unteren Karosseriebereich durch vorbestimmtes Falten verformen und dadurch möglichst viel Bewegungsenergie

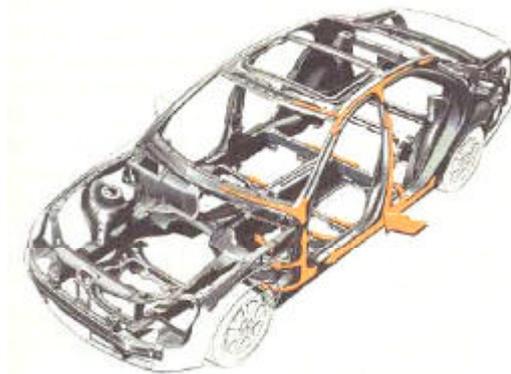
absorbieren. Erst bei schweren Unfällen werden auch die hinteren Bereiche der Karosserie zur Energieumwandlung verwendet.



**Abb. 5-7 Knautschverhalten eines vorderen Längsträgers [19]**

### **Seitenaufprallschutz**

Durch Verstrebungen im Türbereich, Querträger zwischen den beiden A-Säulen in Höhe der Instrumententafel, Versteifungen des Türschwellers, der B- und der C-Säule und Querträger im Bodenbereich lässt sich das Deformationsverhalten der Karosserie bei Seitenunfällen so beeinflussen, dass die Insassen besser vor Verletzungen geschützt sind.



**Abb. 5-8 Trägerstruktur mit Kraftverlauf bei Seitenaufprall [19]**

### **Fahrgastzelle**

Ein fachwerkartiges Stabsystem bildet dabei die primär tragende Funktion der Karosserie. Diese Bauweise wird z.B. bei Pkw-Konstruktionen (Abbildung 5-9) mit Aluminiumkarosserie verwendet. Verschieden geformte Strangpress- und

Aluminiumblechprofile bilden dabei die Rahmenstruktur, die durch Gussknoten an hoch beanspruchten Stellen verbunden werden.

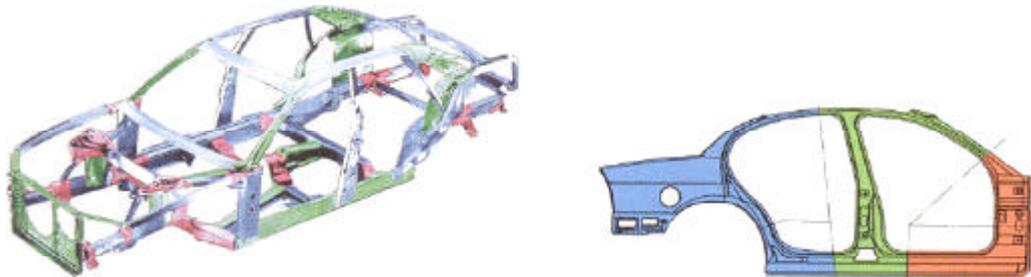


Abb. 5-9 Gitterrahmen „Space frame“ einer PKW-Karosserie aus Aluminium [19]

### Tank

Er wird stoßgesichert meist über der Hinterachse eingebaut. Einfüllstutzen und Kraftstoffleitungen müssen so verlegt sein, dass bei schweren Unfällen und Überschlagen des Fahrzeugs der Kraftstoff nicht auslaufen kann.



Abb. 5-10 Sicherheitskarosserie [19]

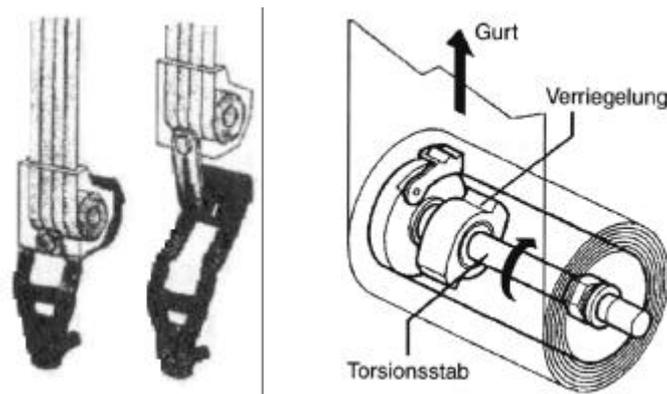
### 5.3.2 Sicherheitsgurte (Rückhaltesysteme)

Oft wirken Gurtstraffer und der Airbag stärker als es der jeweiligen Unfallsituation entspricht. Dadurch können zu große Rückhaltekräfte auf die Insassen wirken und Verletzungen im Schulterbereich oder am Oberkörper verursachen. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Gurtkraftbegrenzer entwickelt.

#### Gurtkraftbegrenzer

Abbildung 5-11 zeigt die Version eines Gurtkraftbegrenzers mit einem perforierten Befestigungswinkel, der an der B-Säule der Karosserie angeschraubt ist (links der

nicht ausgelöste Begrenzer und rechts der aufgerissene Metallwinkel). Übersteigen die auf den Gurt wirkenden Kräfte vorgegebene Größen, reißt die Perforation am Metallwinkel auf und der Gurt gibt um einen vorbestimmten Weg nach. Neuere Modelle von Gurtkraftbegrenzern bestehen oft aus einer Torsionswelle, die sich in der Aufrollautomatik des Gurtes befindet (Abbildung 5-11, rechts). Ab einer bestimmten Gurtbelastung wird die Torsionswelle verdreht, und das gestraffte Gurtband wird bei einer definierten Kraft wieder freigegeben. Die Schulterkraft kann so um mehr als 50% reduziert werden.



**Abb. 5-11 Perforierter Metallwinkel (Quelle Renault) und Gurtkraftbegrenzer [16]**

### Gurtstraffersysteme

Sie bewirken ein optimales Anliegen des Gurtes und verhindern die sogenannte Gurtlose. Darunter versteht man den Weg des Gurtbandes bis dieses fest am Körper anliegt. Bei Auslösung eines Gurtstraffersystems wird das Gurtband bis zu 200mm angezogen. Gurtstraffer arbeiten mit Explosivstoffen (pyrotechnisch) oder mechanisch. Die Auslösung von Gurtstraffersystemen erfolgt nur bei Frontalunfällen bis  $\pm 30^\circ$  zur Fahrzeuglängsachse. Gurtstraffersysteme sind nach einmaliger Auslösung unwirksam und müssen ausgetauscht werden.

- **Mechanische Gurtstraffer**

Bei mechanisch arbeitenden Systemen [22] bewirkt eine vorgespannte Feder, die sich durch einen Ausklinkmechanismus entspannen kann, über einen Seilzug eine Gurtstraffung.



Abb. 5-12 Gürtelschnalle Gurtstraffer [22]

- **Pyrotechnische Gurtstraffer**

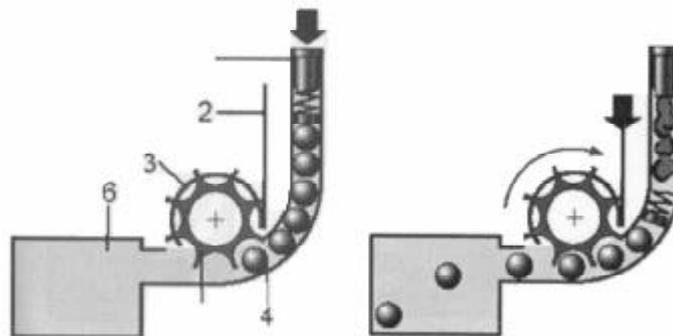
Bei dem mit Explosivstoff arbeitenden Gurtstraffer werden durch einen Beschleunigungssensor die Verzögerungswerte erfasst. Ist die Verzögerung größer als 2 g (heute üblicher Wert), d.h. die Geschwindigkeitsabnahme ist größer als 15km/h innerhalb einer Sekunde, so wird entweder durch einen Sensor ein Stromkreis geschlossen, der über eine Zündpille einen Treibsatz zündet, oder der Sensor gibt ein Spannungssignal an ein Auslösesteuergerät. Durch Vergleich des Sensorsignals mit gespeicherten Kennfeldern erkennt das Steuergerät kritische Verzögerungswerte und bewirkt über einen elektrischen Impuls die Zündung des Treibsatzes durch die Zündpille. Dadurch wird ein Kolben in einem Zylinder nach oben bewegt und ein am Kolben befestigtes Drahtseil spannt über die Aufrollvorrichtung den Sicherheitsgurt.



Abb. 5-13 Bauteile eines pyrotechnischen Gurtstraffers und der Aufbau [16]

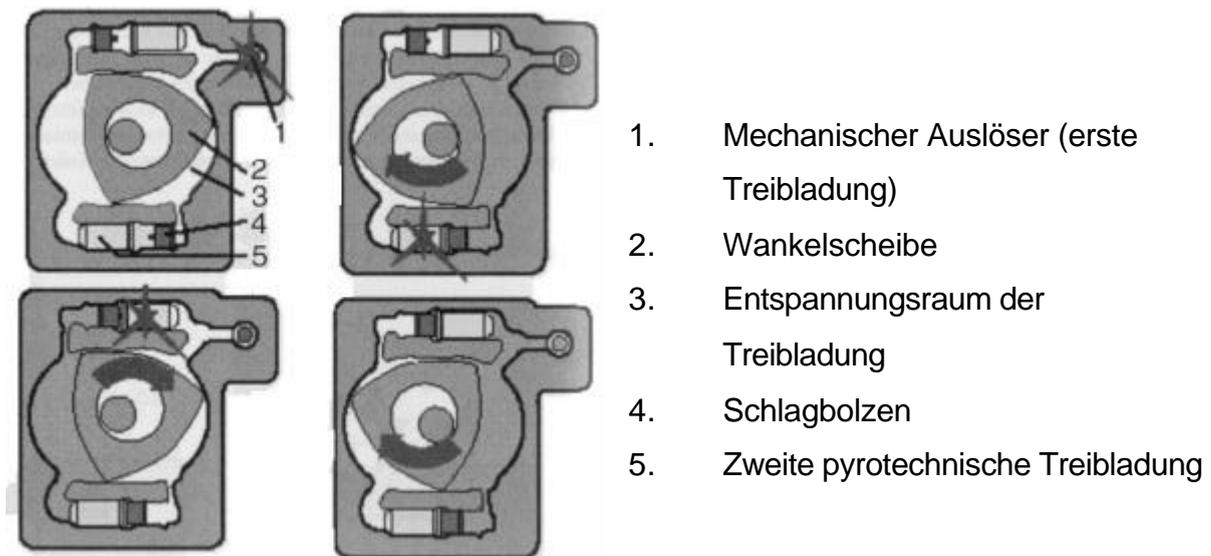
*Varianten von pyrotechnischen Gurtstraffern:*

Der Gurtstraffer in Abbildung 5-14 dargestellt, funktioniert mit Kugeln, die ein Zahnrad aus dem Stillstand beschleunigen. Bei Auslösung des Gurtstraffers wird eine pyrotechnische Treibladung aktiviert und schießt die Stahlkugeln aus dem Vorratsrohr in Richtung Auffangbehälter. Durch die Bewegung der Kugeln wird das Zahnrad mit der Gurthaspel mitgenommen und der Gurt entgegen der Zugrichtung gestrafft.



**Abb. 5-14 Kugelgurtstraffer [16]**

Der Antrieb in Abbildung 5-15 ähnelt einem Wankelmotor mit drei pyrotechnischen Treibladungen, die aufeinander folgend gezündet werden.



1. Mechanischer Auslöser (erste Treibladung)
2. Wankelscheibe
3. Entspannungsraum der Treibladung
4. Schlagbolzen
5. Zweite pyrotechnische Treibladung

**Abb. 5-15 Gurtstraffer in Wankelbauweise [16]**

Der in Abbildung 5-16 dargestellte Gurtkraftbegrenzer dient gleichzeitig als Gurtstraffer und Begrenzer. Der Gurt wird pyrotechnisch gestrafft.

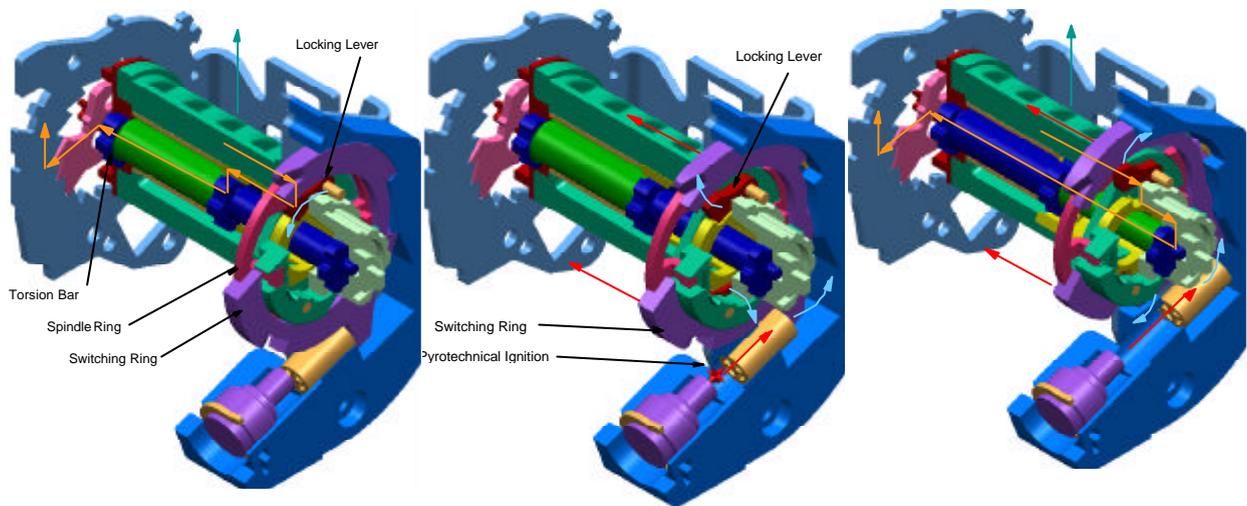
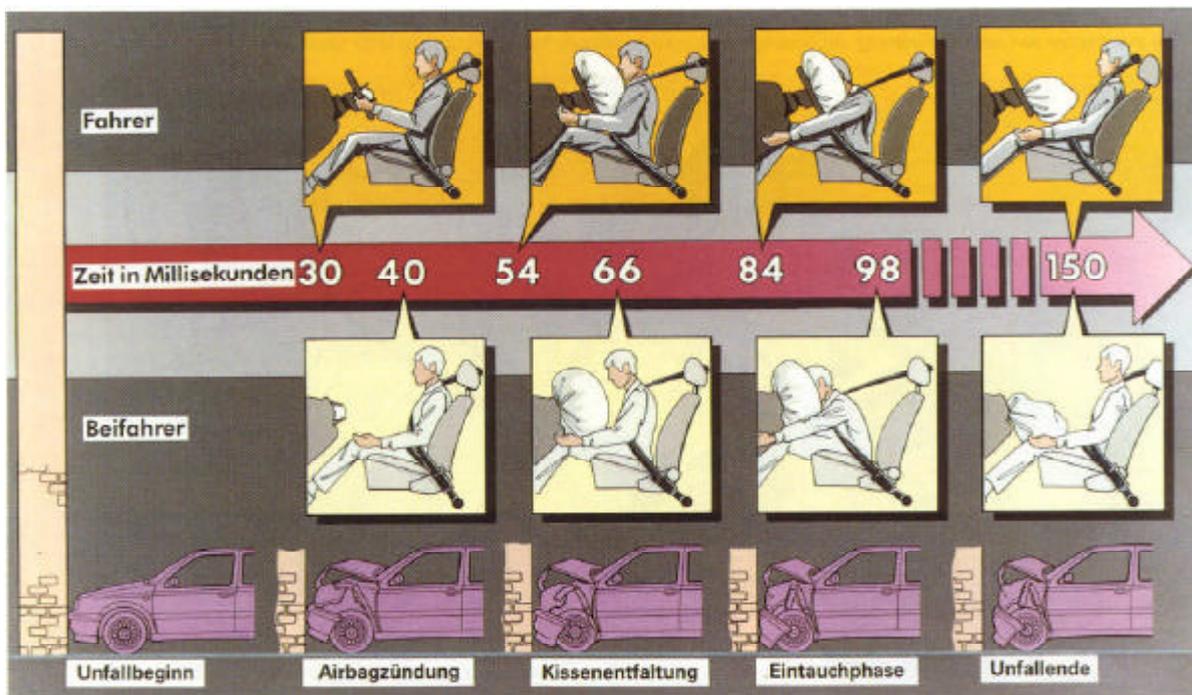


Abb. 5-16 Adaptive load limiter der Firma Autoliv [21]

### 5.3.3 Airbag Systeme

Verschieden angeordnete Beschleunigungssensoren geben je nach Unfall Spannungssignale an das Auslösesteuergerät für die Airbags. Werden bestimmte Verzögerungswerte erreicht, so zündet ein vom Steuergerät ausgelöster elektrischer Impuls die Treibsätze der entsprechenden Airbags. Wird das Airbagsystem bei einem Unfall vom Bordnetz getrennt, so sorgt ein Pufferkondensator für den Zündimpuls. Der Airbag bläst sich innerhalb von 45ms bis 50ms voll auf.

Um eine ausreichende Schutzwirkung bei Frontalunfällen zu haben, müssen jedoch Fahrer und Beifahrer unbedingt angegurtet sein.



**Abb. 5-17 Zeitlicher Ablauf und Schutzwirkung eines Rückhaltesystems aus Dreipunktgurt und Airbag im Frontalaufprall (Fahrer und Beifahrerseite) [18]**

In Abbildung 5-17 ist der zeitliche Ablauf der Funktion eines Fahrerairbags bei einem Frontalcrash in Verbindung mit einem Dreipunktgurt dargestellt. Der gesamte Vorgang von Unfallbeginn, Airbagzündung, Airbagentfaltung und Entweichen des komprimierten Gasgemisches nimmt nur eine Zeit von rund 150ms in Anspruch.

Bei einem 50km/h Unfall gegen ein festes Hindernis hat sich rund 50ms nach dem Crashbeginn der Kopf des Fahrers um etwa 12cm in Richtung Airbag verlagert. Etwa 40 bis 50ms nach dem Kontakt hat sich der Airbag voll entfaltet und erreicht seine optimale Position. Während der Eintauchphase, die etwa 40 bis 50ms andauert, beginnt die systematische Entleerung des Airbags. Etwa 120 bis 150ms nach dem Auslöseimpuls ist der Airbag wieder leer.

## Fahrer und Beifahrer Airbag

Schutzwirkung des Airbags:

- Frühere Rückhaltung
- Begrenzung der Vorverlagerung des Körpers
- Verminderte Schleuderbewegung des Kopfes
- Belastungen im HWS (Halswirbelsäulen) Bereich
- Verminderung der Aufprallkräfte und Aufprallbeschleunigungen



Abb. 5-18 Auslösung des Airbags (Fahrer und Beifahrer) [21]

Im Lenkrad oder im Armaturenbrett vor dem Beifahrer befinden sich die Airbags. Der Airbag liegt eng zusammengefaltet unter dem Prallpolster des Airbag-Lenkrades oder Armaturenbrettes. Das Auslösetempo eines Airbags beträgt Geschwindigkeiten bis zu 300km/h. Die Lebensdauer eines Airbags beträgt 10 bis 15 Jahre.



Abb. 5-19 Fahrerairbagsystem im Teilschnitt [21]

### Seitenairbag

Bei Seitenairbags ist die zur Verfügung stehende Zeit für die Auslösung extrem kurz, da keine Energie aufnehmende Knautschzone vorhanden ist (bei frontalen Unfällen ist bei einem Mittelklasse-Pkw die Knautschzone 0,6m lang). Die Entscheidung zur Aktivierung eines Seitenairbags muss deshalb schon nach 5 bis 20ms fallen. Zum Aufblasen des Seitenairbags benötigen die Systeme etwa 8 bis 20ms.



Abb. 5-20 Anordnung des Seitenairbags [21]

### Kopfairbag

Auch „Inflatable Curtain“ (Autoliv), „Windowbag“, IST-Airbag (BMW) oder als Sideguard (Audi) bezeichnet, wird das genannte Schlauchsystem im Dachrahmen integriert und ergänzt die Wirkung der in den Türen integrierten Seitenairbags, indem es sich bei Seitenkollisionen diagonal über das Seitenfenster spannt. Dadurch wird der Kopf vor Anprallverletzungen und Überlastung durch seitliches Abkippen geschützt.



Abb. 5-21 Kopfairbag in Dachrahmen integriert [21]

### Knie-Airbag

Der Knie-Airbag wird auf der Fahrer- und Beifahrerseite unterhalb des Armaturenbrettes eingesetzt. Im Fall eines Frontalaufpralls wird über die Airbag-Steuereinheit die Auslösung der Knie-Airbags aktiviert. Die Airbags sind im unteren Bereich des Armaturenbrettes eingebaut. Sie sind so konstruiert, dass sie bei ihrer Entfaltung die durch einen Frontalaufprall auf die Knie wirkende Energie aufnehmen. Besonders Kniebereich, Oberschenkel und Beckenbereich werden durch dieses System weniger belastet.

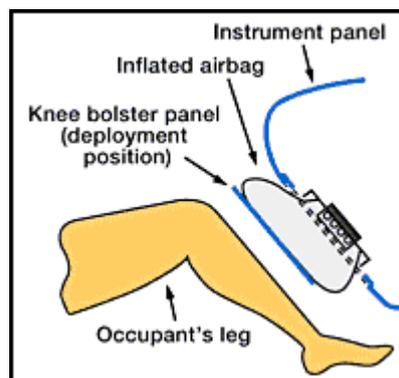


Abb. 5-22 Autoliv's knee Airbag [21]

### Fuß-Airbag

Dieses System wird auch als InCa (Inflatable Carpet) bezeichnet. Der untere Beinbereich gehört zu den am häufigsten verletzten Regionen bei Frontalzusammenstößen. Statistiken zeigen, dass bei fast 40% der durch Airbag und Sicherheitsgurt geschützten Insassen Verletzungen im Bereich der unteren Extremitäten auftreten. Bei diesen Verletzungen liegen 60% unterhalb des Knies.



Abb. 5-23 Lower leg Airbag [21]

Der Fuß-Airbag reduziert die Belastungen auf den Fuß, den Knöchel und den Unterschenkel, indem er die unteren Extremitäten von der Bodenplatte wegschiebt, bevor es bei versetztem oder schrägem Frontalzusammenstoß zur Deformation des Unterbodens kommt. Er wirkt als Polster, um die Beschleunigung des Fußes (besonders der Ferse) zu verringern und die Kraft und Biegemomente des Unterschenkels zu reduzieren.

### Mehrstufige- und Intelligente Airbagsysteme

Mit dem „Adaptive Airbag System“ von Autoliv wird mit vier Ultra-Schall-Sensoren (1) und Sitzpositions-Sensoren (6) berechnet, wie weit ein Insasse vom Airbag entfernt ist.

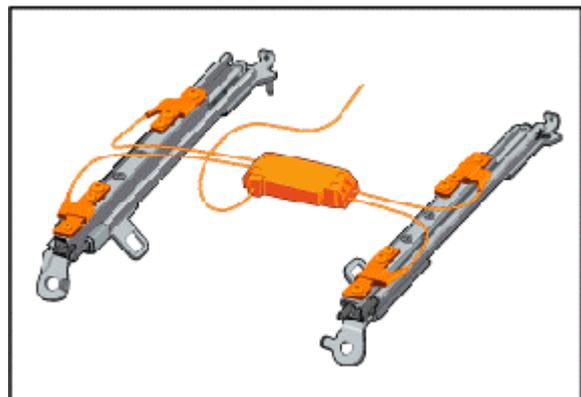


Abb. 5-24 Airbagsysteme mit Sitzpositionserkennung und Gewicht System [21]

Die Gewicht-Sensoren (2) erkennen, ob ein Kind sich im Sitz befindet oder ob der Sitz nicht besetzt ist. Gurtstraffer-Sensoren (3) erkennen, ob ein Insasse angeschnallt ist oder nicht. Mit den Daten dieser Sensoren werden die Airbags gemäß Position, Gewicht und Größe der Insassen optimiert aufgeblasen.

### 5.3.4 Sitz Strukturen

#### Schleudertrauma Sitz

Im Laufe der zehnjährigen Lebensdauer des Autos besteht eine Wahrscheinlichkeit von 1:37, dass ein Fahrzeug in das Heck Ihres Wagens fährt! Standardsitze bieten keinen ausreichenden Schutz gegen Halswirbelsäulen-Verletzungen. Verschiedene Systeme bieten dagegen Schutz:

- Volvo WHIPS



Abb. 5-25 Volvo's Schleudertraumasitz [23]

Wenn das Fahrzeug von hinten angestoßen wird, bewegt sich die Rückenlehne nach hinten. Anschließend kippt die Rückenlehne kontrolliert nach hinten ab. Die Konstruktion, welche die beiden Bewegungen ermöglicht, ist im Sitz eingebaut.

- Autoliv

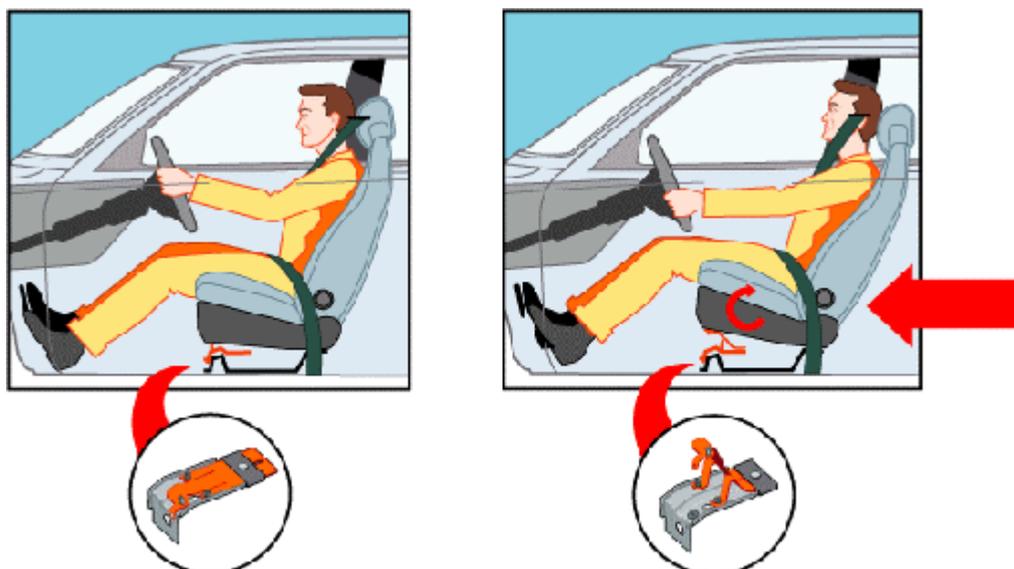
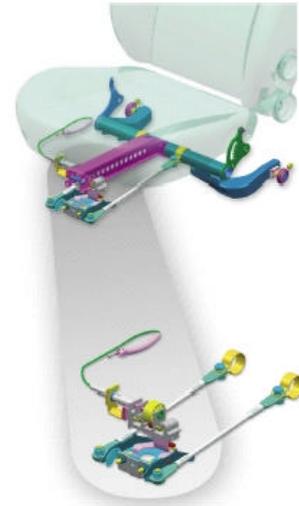


Abb. 5-26 Anti-Whiplash Sitz (Autoliv) [21]

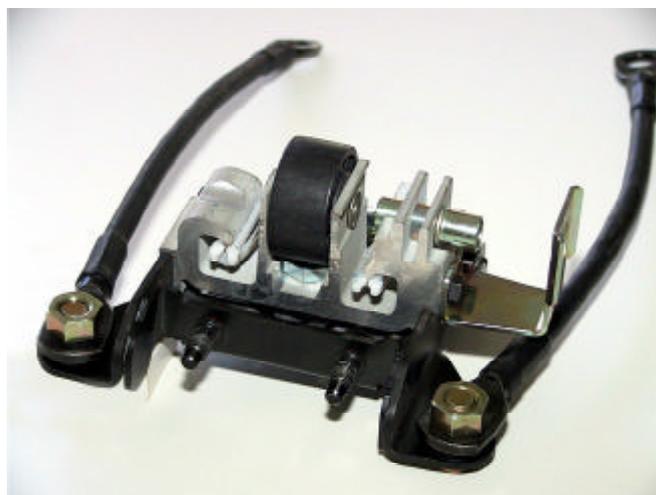
- WipGard

Der WipGARD [24] – so die offizielle Bezeichnung des Nachrüst-Bausatzes – löst bei einer Heckkollision eine kontrollierte Kippbewegung des Autositzes aus und absorbiert damit einen großen Teil der Kräfte. Experten sind sich einig, dass mit dem WipGARD das Verletzungsrisiko der Halswirbelsäule um ein Drittel vermindert werden kann.



**Abb. 5-27 WipGard mit Kippwinkel und Einbau dargestellt [24]**

Das Deformationselement, welches die beiden Bewegungen ermöglicht, befindet sich zwischen dem Sitz und der Bodengruppe. Bei einer Heckkollision bewegt sich die Rückenlehne horizontal nach hinten und kippt ab.



**Abb. 5-28 Das Deformationselement vergrößert [24]**

## 6. Sicherheitssysteme geeignet für FGL

Weitaus mehr als die in Kapitel 5 erwähnten Sicherheitssysteme sind in einer Matrix analysiert und besprochen worden. In diesem Teil des Berichts werden nur die Sicherheitssysteme präsentiert, die für eine Konstruktion geeignet sind, die unter Einsatz von Aktor-Elementen aus Formgedächtnislegierungen realisierbar ist. Einige von diesen Sicherheitssystemen existieren nur als Design-Entwurf, andere sind noch in Entwicklung und einige sind bereits als Prototypen in Gebrauch.

In der Matrix (Abbildungen 6-1 bis 6-3) sind die verschiedenen Sicherheitssysteme nach verschiedenen Kriterien zusammen mit einem Gewichtungsfaktor dargestellt. Anschließend wurden die einzelnen Konfigurationen mit ja, nein oder bedingt geeignet für Anwendungsmöglichkeit von FGL bewertet.

		Fahrzeugsicherheitssysteme							
		Aktive Sicherheit							
		Innere aktive Sicherheit							
G-faktor	Kriterium	Sichtfeld	Fahrzeugsitze	Rückspiegel	Klimatisierung	Belüftung	Multifunktionslenkrad	Freisprech einrichtung	Navigations systeme
	Beschreibung								
	Bilder								
5	Mögliche Aktor Bewegung wird ausgeführt	0	1	3	4	4	0	0	0
5	Geschwindigkeit / Zeit		2	2	3	3			
5	Kraft		2	1	1	1			
5	Weg (Abstand)		1	2	1	1			
5	Aktorhub								
5	Zeit		1	1	1	1			
3	Übersetzung								
5	Beschleunigung								
3	Gewicht		1	1	1	1			
2	Temp								
	Einbauraum								
	Strom 9-16 V								
3	Kosten								
	Resultat	0	38	48	53	53	0	0	0
FGL	Ja			Ja	Ja	Ja			
Anwendungs möglichkeit	Nein	Nein	Nein				Nein	Nein	Nein
	Bedingt								

Tab. 6-1 Matrix Teil 1v3

## Sicherheitssysteme geeignet für FGL

Die Sicherheitssysteme aus Tabelle 6-1, die mögliche Anwendungen zeigen, werden in den nächsten Abschnitten dieses Kapitels beschrieben. Für diesen Fall der Internen Aktiven Sicherheitssysteme sind die Systeme Rückspiegel, Belüftung und Klimatisierung für FGL Anwendungen geeignet.

Die Gewichtungsfaktoren wurden so gewählt, dass die wichtigsten Kriterien die höchste Punktzahl erhalten. D.h. eine Punktzahl von 5 bedeutet sehr wichtig und eine Punktzahl von 1 sehr unwichtig.

Fahrzeugsicherheitssysteme										
Aktive Sicherheit						Pre Crash	Passive Sicherheit			
Äussere aktive Sicherheit						PreSafe	Fahrzeugkarosserie			
Bremsanlage		Räder und Reifern	Rad-aufhängung	Antriebsschlupf regelung	Fahrdynamik systeme	Beleuchtungs anlage	Elektro-mechanisch	Knautsch zone	Seitenaufprall schutz	Fahrgast zelle
Hydraulisch	Elektro									
3		0	0	0	0	3	0	0	0	0
5						3				
5						1				
1						2				
5						2				
2						1				
101		0	0	0	0	58	0	0	0	0
						Ja				
		Nein	Nein	Nein	Nein		Nein	Nein	Nein	Nein
Bedingt										

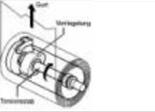
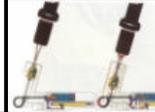
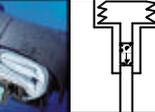
Kleine Weg aber zu grösse Kräfte benötigt.  
 Draht-durchmesser gröss

**Tab. 6-2 Matrix Teil 2v3**

Bei den in Tabelle 6-2 gezeigten Systemen der Äusseren Aktiven Sicherheit ist die Beleuchtungsanlage geeignet für eine FG-Anwendung. Bei der Bremsanlage wäre eine FG-Anwendung nur bedingt möglich, da die benötigten Kräfte als zu groß eingeschätzt werden.

In Tabelle 6-3 sind unter den Passiven Sicherheitssystemen zahlreiche Systeme aufgezeichnet worden, die mit ja bewertet waren und damit geeignet für eine FG-Anwendung sind.

Diese verschiedenen Systemen werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

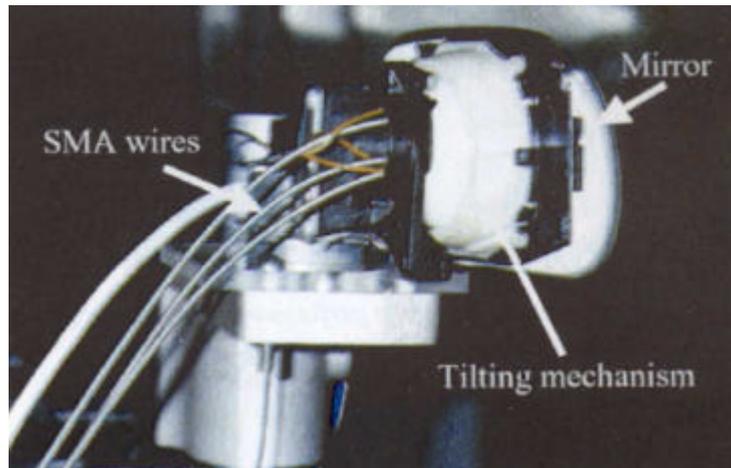
Fahrzeugsicherheitssysteme						
Passive Sicherheit						
	Sicherheitsgurte			Airbagsysteme		Sitzstruktur
Motorhaube	Gurtkraft-begrenzer	mechanische- Gurtstraffer	pyrotechnische- Gurtstraffer	Gas	Stift-System	Whiplash
Bei Aufprall wird hintere Seite der Motorhaube durch 2 Aktoren um 100mm angehoben innerhalb 60-70ms	Ab einer bestimmten Gurtbelastung wird die Torsionswelle verdreht und das gestraffte Gurtband wird bei einer definierten Kraft	Eine vorgespannte Feder bewirkt durch einen Ausklinkmechanismus über einen Seilzug eine Gurtstraffung	Ist die Verzögerung > 2g (v-abnahme > 15km/h innerhalb 1s) wird über Zündpille einen Treibsatz gezündet. Ein Kolben wird in einem Zylinder nach oben bewegt und spannt der Drahtseil über die Aufrollvorrichtung	Steuergerät los Impuls aus. Zündpille wird gezündet. Verbrennung der Teilstoffe im Generator wo Druck entsteht	Ein Stift wird ausgelöst und drückt im Druckbehälter (600 bar) und bläst der Airbag auf.	
						
5	4	5	5	0		4
5	5	5	5			5
3	4	4	4			4
5	2	3	3			3
5	5	5	5			5
5	1	1	1			
5	4	4	4			
3	2		2			3
Mit Übersetzung möglich Relativ kleine Kräfte (300N)	Relativ kleine mittelmäßig Wege (80mm)	Relativ grosse Angezogene Abstand (200mm)	Relativ grosse Kräfte (2kN) mit vorgespannter Feder realisierbar	Kurze Auslösezeit (10-20ms).	Zurückziehen Abstand (10-15cm)	
164	129	139	139	0		20
Ja	Ja	Ja	Ja			Nein
				Bedingt	Bedingt	

Tab. 6-3 Matrix Teil 3v3

## 6.1 Rückspiegel

Ein Prototyp für den Außenrückansicht-Spiegel wurde durch das Fiat-Forschungszentrum entwickelt, zu sehen in Abbildung 6-1 [25]. Die Kabel, die im Standardspiegel verwendet wurden, um den Winkel des Spiegels zu regulieren, wurden durch FG-Legierungen ersetzt. Diese Leitungen werden durch ein elektronisch gesteuertes System angetrieben und arbeiten direkt an der Rückseite

des Spiegels. Deshalb kann der hintere Ansicht-Spiegel in der horizontalen und vertikalen Achse reguliert werden.



**Abb. 6-1 Außenrückansicht-Spiegel [25]**

Eine andere Anwendung mit FGL ist der durch FICO Mirrors entwickelte Blendschutzspiegel. Verglichen mit anderen Systemen ist dieser Spiegel im Vorteil: er ist kleiner, geräuschlos, ungeheuer variabel und sehr schnell (eine Sekunde zwischen der Normalposition und Blendschutzposition).

## 6.2 Klimaanlage

In dem Personeninnenraum gibt es verschiedene Funktionen, die Aktoren verlangen, die einfache winklige Bewegungen wie beispielsweise das Stellen der Klappen einer Klimakontrolleinheit durchführen. Ein Torsions-Aktuator eines FG-Drahts mit der einheitlichen Kontrollelektronik ist durch das Forschungszentrum zu diesem Zweck entwickelt worden. Ein FG-Draht mit 1mm Durchmesser ist im Stande, eine sich drehende Bewegung von mehr als 100° durchzuführen und damit ein Drehmoment von etwa 0,2Nm zu entwickeln.

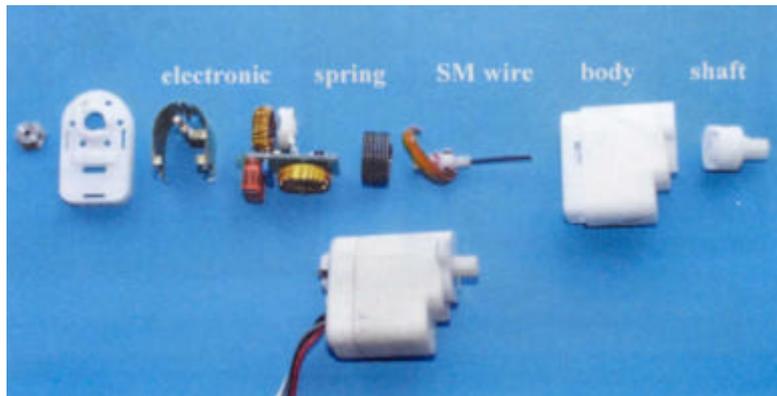


Abb. 6-2 FG Torsionale Aktuator [25]

### 6.3 Scheinwerfer mit FGL

In den nächsten Jahren werden Autoscheinwerfer in kurzer Zeit eine zunehmende Zahl von Funktionen ausführen, wie beispielsweise die aktive Kurvenausleuchtung, um dadurch die Sicht zu verbessern und Nachtfahrten sicherer zu machen. FG-Aktoren stellen hierbei eine bedeutende Alternative zu elektro-mechanischen Motoren dar, da sie im Stande sind genaue Bewegungen mit beträchtlichen Kräften mit niedrigen Volumen-Elementen durchzuführen. Zwei ausführliche Studien zu derart aufgebauten Prototypen können in [25] gefunden werden.

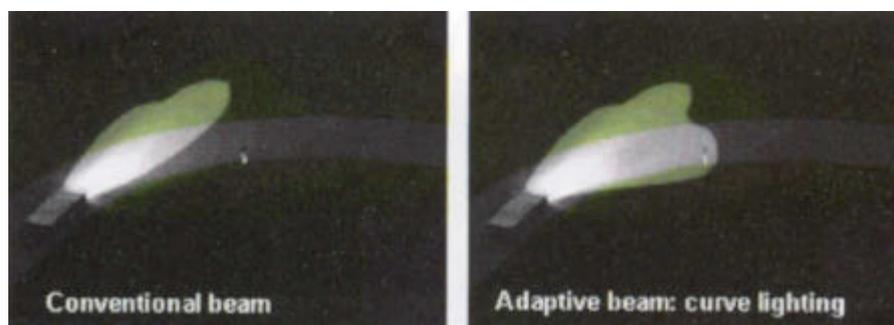


Abb. 6-3 Adaptive Scheinwerfer Leistung in Kurven [25]

## 6.4 Gurtkraftbegrenzer

Ein Problem von Rückhaltegurten liegt darin, dass es bei Frontalaufprällen mit hohen Beschleunigungen zu großen Kräften kommen kann. Gurtkraftbegrenzer begrenzen die Kraft, mit der der Gurt auf den gegenüber dem abrupt abgebremsten Fahrzeug nach vorne schnellenden Insassenkörper wirkt.

Ein Gurtkraftbegrenzer mit einem FG-Element wäre eine kostengünstige und zugleich zuverlässige Lösung. Eine an der Universität Stuttgart [26] ausgeführte Entwicklung nutzt die Dämpfungseigenschaften von FGL, um die Bewegung zu absorbieren. Zusätzlich wird eine Verzögerung bezüglich der maximalen Kraft erreicht. Solch ein FG-Element könnte direkt zwischen dem Gurt und dem Fahrzeugfahrgestell eingebaut werden, wie es in Abbildung 6-4 gezeigt wird. Das Element selber kann zum Beispiel ein einfaches Drahtstück oder Stift sein.

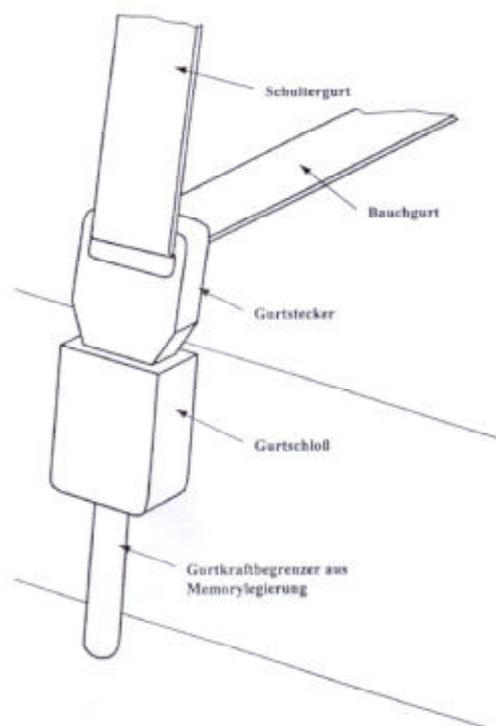


Abb. 6-4 FG Element als Gurtkraftbegrenzer [26]

## 6.5 Gurtstraffer

Die Funktion der Sicherheitsgurtstraffer-Systeme gewährleistet einen optimalen Kontakt zwischen dem Sicherheitsgurt und einem Passagier. Deshalb wird die sogenannte "Sicherheitsgurtlose" vermieden. Bei Aktivierung zieht der Sicherheitsgurtstraffer den Gurt innerhalb von 10ms bis zu 200mm mit einer Kraft von 2000N (BMW). Der Sicherheitsgurtstraffer funktioniert mechanisch oder pyrotechnisch. Nach der Aktivierung müssen sie ersetzt werden, da sie nur einmal arbeiten können.

### 6.5.1 Mechanisch

Die Befestigung und das Funktionsprinzip eines mechanischen Sicherheitsgurtstraffers (verwendet im 3-er BMW) werden in Abbildung 6-5 gezeigt. Eine vorgespannte Feder verursacht die Straffung des Sicherheitsgurts durch ein Stahlkabel. Es ist möglich, die Stahlfeder durch eine FG Feder zu ersetzen, die beispielsweise über eine Übersetzung arbeitet, um den Installierungsraum zu minimieren.

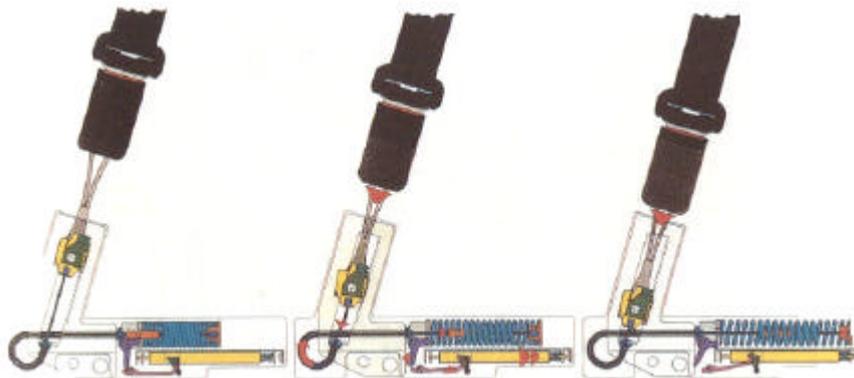


Abb. 6-5 Mechanischer Gurtstraffer (BMW 3er) [18]

## 6.5.2 Pyrotechnisch

Das in Abbildung 6-6 gezeigte pyrotechnische System bewirkt die Straffung des Sicherheitsgurts mittels Stahlkugeln. Nach dem pyrotechnischen Zünden werden die Stahlkugeln in dem Rohr beschleunigt und drehen dadurch ein Zahnrad. Das Drehen dieses Zahnrades verursacht die Straffung des Sicherheitsgurts. Der gezeigte Mechanismus (Autoliv) ist im Stande, den Sicherheitsgurt über eine Entfernung von 15cm zu straffen.



**Abb. 6-6 Roto Gurtstraffer (Autoliv) [21]**

Mit einem FG-Aktor kann das ganze System vereinfacht werden. Durch lineares Zusammenziehen eines FG-Drahts könnte das Zahnrad ersetzt werden und dadurch Spannungen direkt über den Sicherheitsgurt bewirken.

## 6.6 Motorhauben Anhebung

Auf Grund dessen, dass viele Fußgänger jedes Jahr bei Autounfällen verletzt werden (alleine in der Europäischen Union ungefähr 7000 getötete Fußgänger jedes Jahr [27]) und dadurch für ungefähr 20% aller Verkehrstodesfälle verantwortlich sind, wurden Motorhauben-Anhebungssysteme entwickelt. Die Motorhaube wird angehoben, wenn ein Fußgänger angefahren wird. Ein Sensor-System, das in die Vorderstoßstange des Fahrzeugs eingebaut ist, gibt das Signal an zwei

Federsysteme, welche die Motorhaube an der Rückseite anheben. Dadurch ist die Motorhaube im Stande den Personenkopf und den oberen Körper aufzufangen und Teile der Stoss-Energie zu absorbieren. Die Sensoren können zwischen einem Fußgängerbein und einem Straßenpfahl unterscheiden. Solch ein System wird in der Abbildung 6-7 gezeigt.



**Abb. 6-7 Motorhauben-Anhebung für Fußgänger Schutz [21]**

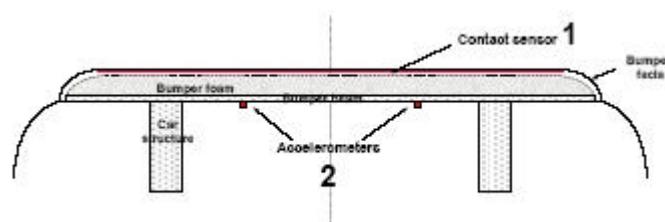
Die meisten Entwicklungen brauchen lineare Aktoren, welche die Motorhaube anheben. Diese Aktoren ziehen sich innerhalb einer sehr kurzen Zeit (ungefähr 35 bis 70ms) zusammen und lösen große Kräfte (ungefähr 2000N) aus. Diese lineare Bewegung kann auch mit schnellschaltenden Formgedächtnis Aktoren durchgeführt werden.

## 7. Beispiel: PPS Sicherheitssystem

Das Pedestrian-Protection-System (PPS) wurde in diesem Entwicklungsprojekt als konkretes Beispiel gewählt und wird detailliert in den folgenden Paragraphen präsentiert. Existierende Entwicklungen von Fußgängerschutzsystemen wurden untersucht [28], [29], [30] und [31].

### 7.1 Beschreibung existierender Systeme

Der grundsätzliche Mechanismus des Systems [30] besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil ist das Sensor-System, das in der Stoßstange des Autos integriert wird und ein frühes Signal gibt, sobald ein Stoss vorkommt. Der zweite Teil besteht aus zwei Aktoren für die Anhebung des hinteren Teils der Motorhaube. Die Anhebung vergrößert die Distanz zwischen der Motorhaube und den steifen Teilen darunter, wie Motor, Batterie oder Kühlerlüfter. Dieser Abstand muss groß genug sein, um die Energie des auftreffenden Kopfes und oberen Körpers des Fußgängers zu absorbieren.



**Abb. 7-1 Kontaktsensor (1) und Beschleunigungsaufnehmer (2) [30]**

Das in Abbildung 7-1 gezeigte Sensor-System besteht aus zwei Teilen. Ein Membrankontakt-Sensor des Schalter-Typs bedeckt die ganze Breite der Stoßstange. Es wird im Schaum innerhalb des Plastikbereiches der Stoßstange befestigt. Zwei Beschleunigungsaufnehmer werden auf der Hinterfront des Stoßstange-Balkens gestellt. Durch diese zwei Komponenten kann ein Wert berechnet werden, der Informationen über die Steifigkeit des einwirkenden

Gegenstands gibt. Über gespeicherte Vergleichsdaten kann dadurch erkannt werden, ob es zum Beispiel ein Bein oder ein Straßenpfahl ist.

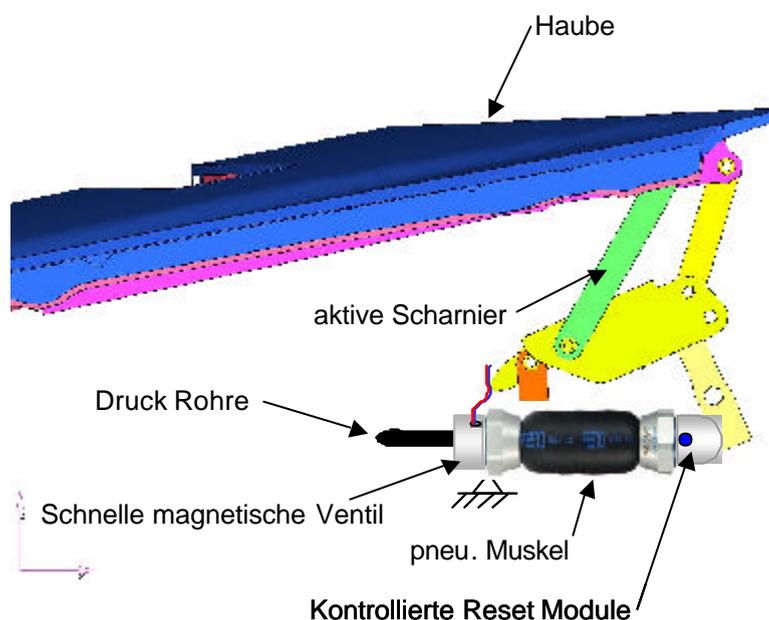
Der zweite Teil des Schutzsystems, die aktive Motorhaube, besteht aus zwei Hebeelementen, welche die hintere Ecke des Motorhaube anheben (Abbildung 7-2). Die Hebeelemente bestehen aus dem komprimierten Metallgebläse, das über Mikrogasgeneratoren mit Gas im Falle eines Aufpralls gefüllt wird. Es gibt mehrere Vorteile mit diesem Design:

- Das Design braucht keine Abdichtung, um das Gas vom Entweichen abzuhalten. Die einzige Öffnung im Gebläse ist an der Stelle, an der der Gasgenerator eingebaut wird. Deshalb ist es leicht, den Druck im Gebläse eine relativ lange Zeit zu erhalten. Das ist wichtig, da es große Schwankungen geben kann, abhängig von der Größe der Person und der Autoaufprall-Geschwindigkeit, bei der der Aufprall erfolgt.
- Das Gebläse ist unempfindlich gegen den Winkel des Aufpralls. Einige Hebepläne können nur dann Energie absorbieren, wenn sie unter einem gewissen Winkel zusammengepresst werden.
- Die Dimensionen des Aktors können klein gemacht werden. Die voreingestellte Höhe des Aktors kann geringer sein als der Anhebungsweg der Motorhaube, die für einen auf einen Kolben gesteuerten Hebeplan nicht möglich ist, sofern eine Übersetzung dazwischengeschaltet ist.



**Abb. 7-2 Motorhaube mit Schutzsystem in angehobene Position [30]**

Ein weiteres Fußgängerschutzsystem [31] wurde durch das Konsortium IPPS, Intelligente Fußgängerschutzsysteme, entwickelt. In dieser Sicherheitsvorstellung arbeiten die fünf Gesellschaften Benteler Automobil-Technologie, ETO Magnetic, Festo, Peguform und Siemens Restraint seit 2001 zusammen. Das Konzept dieser fünf Unternehmen enthält eine nachgebende Stoßstange, Faser-Lichtsensoren und eine aktive Motorhaube, die durch einen pneumatischen Muskel angehoben werden kann (Abbildung 7-3). Das Ergebnis ist ein fahrbarer Prototyp auf der Grundlage einer Mercedes-Benz E-Klasse, in der die Gesellschaften ihr Know-How vereinigen.



**Abb. 7-3 Motorhaube Anhebung mit pneumatischem Muskel**

Um die Gefahr der Bein-Verletzung zu vermindern, wurde eine Konstruktion durch Peguform und Benteler mit einem weichen Schaum entwickelt, der zwischen dem Stoßstangen-Deckel und dem Stoßstangen-Kreuzbalken aufgestellt wird. Zusätzlich dazu wurden auch neue Sensoren in die Stoßstange integriert. Der funktionelle Grundsatz dieser laseroptischen Kontakt-Sensoren von Siemens Restraint liegt in der Verwendung von verschiedenen Phasen. In Teilen wird die Plastikummantelung des leichten Welle-Leiters entfernt. Wenn die Fasern gebogen werden, lenkt ein Teil des Lichtes dort von der Faser nach. Dieses Reflexion ist abhängig von der biegenden Intensität und deshalb registriert dieser Lichtverlust, wie stark die Faser gebogen wurde. Durch horizontales Legen von mehrere Fasern über die Stoßstange

und durch die Entfernung verschiedener Segmente der Ummantlung, entsteht ein Verzerrungsbild der Fahrzeugvorderseite. Dadurch kann das Kontrollmodul erkennen, wenn ein Fußgänger dabei ist, gegen die Stosstange zu krachen. Dann sendet es einen Impuls, um die modifizierte Motorhaube zu heben, um damit den Kopf vom Fußgänger weich [31] zu fangen und den Impuls abzdämpfen.



Abb. 7-4 Zeitlicher Verlauf der Motorhauben-Anhebung

Der zeitliche Ablauf dieses Systems ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Nachdem der Sensor ein Fußgängerbein erkannt hat und die entsprechenden Daten an den Aktor übermittelt wurden, wird die Motorhaube innerhalb von weiteren 35 Millisekunden einige Zentimeter angehoben. Wenn die IPPS Motorhauben-Anhebung aktiviert wird, obwohl nur eine Kollision gegen einen dem Fußgänger ähnlichen Gegenstand erfolgte, stellt das System die Motorhaube innerhalb einer vordefinierten Zeit automatisch zurück in die Ausgangsstellung und ist wieder bereit.

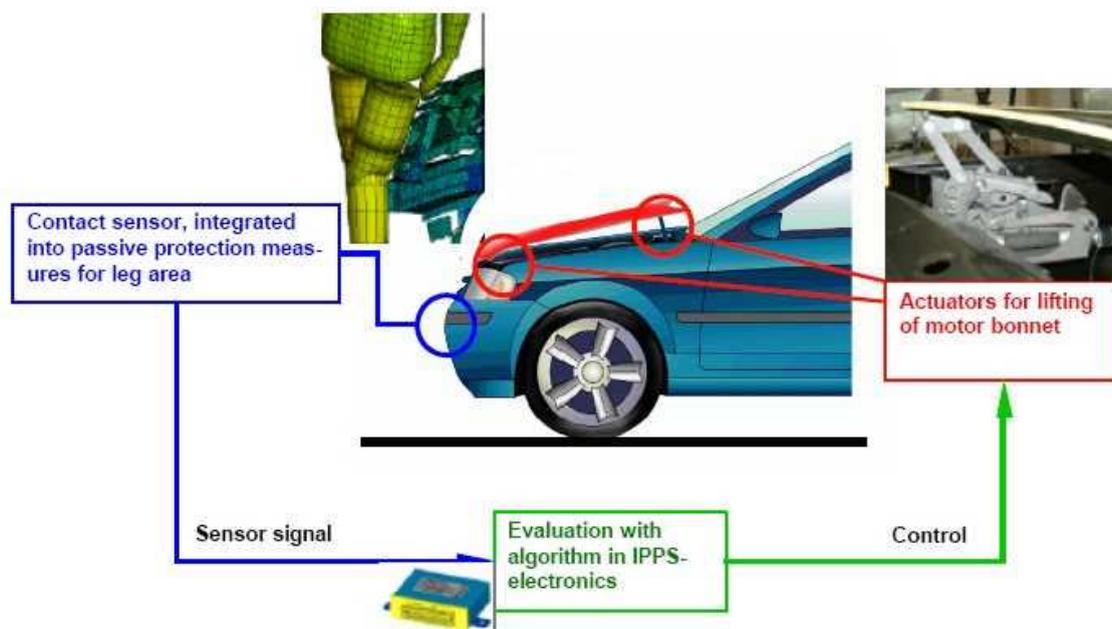


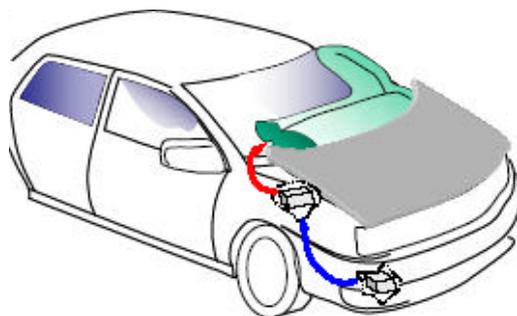
Abb. 7-5 System Aufbau [28]

Um schnell genug zu funktionieren, braucht der Muskel Druck-Luft von Druck-Luftpatronen oder einer Speicherart, die durch einen Kompressor befüllt wird. Das System ist leicht; für den Sensor und Kontrollplan nur 300g, sowie nur 600g für den Auslöser ohne den Kompressor. Das Konzept dieses Systems wird in Abbildung 7-5 [28] schematisch gezeigt.

Die Vorteile dieses reversiblen und anpassungsfähigen aktiven IPPS Motorhauben-Systems sind [31]:

- hohe Sicherheit bei der Unfallerkennung eines angefahrenen Fußgängers durch das System der Faser-Lichtsensoren
- Leiter-Sensoren sind unter dem Aspekt der elektromagnetischen Kompatibilität unproblematisch
- Anpassung des Sensor-Systems an verschiedene Frontformen von Pkws

Der im Folgenden dargestellte Lösungsansatz ermöglicht die Erweiterung des Kopfschutzbereiches von der Haube auf die angrenzenden Bereiche des unteren Scheibenrahmes und der A-Säulen durch die Verwendung eines Airbags (Prinzipdarstellung siehe Abbildung 7-6).



**Abb. 7-6 System Aufbau für den erweiterten Kopfschutz [32]**

Im eingebauten Zustand ist dieser Airbag ebenfalls unterhalb der Motorhaube positioniert. Er besteht in wesentlichen aus zwei Bereichen, ein Bereich zum Anheben der Motorhaube und ein weiterer zum Abdecken angrenzender Fahrzeugteile, die verletzungsgefährdend sein können. Ein entsprechendes Designkonzept ist in Abbildung 7-7 gezeigt.



Abb. 7-7 Airbagdesign für den erweiterten Kopfschutz [32]

## 7.2 Systemanforderungen für Aktoren aus FGL in PPS

Das aktive Motorhauben-System des IPPS Konsortiums wurde als ein konkretes Beispiel für eine Anwendung von schnell schaltenden Formgedächtnis Aktoren gewählt. Der Ersatz des beschriebenen pneumatischen Muskels durch einen FG-Aktor wird zu einigen zusätzlichen Vorteilen führen, zum Beispiel eine reversibel Funktion, kompakte Konstruktion und eine weniger kostenintensive Lösung. Die Voraussetzungen für jeden in Automobilfahrzeugen verwendeten Aktor sind stark von der Position abhängig, d.h. von der Stelle, an der der Aktor eingebaut wird. Im Fall vom IPPS System können die Voraussetzungen für den Formgedächtnis Aktor wie folgt und angegeben werden [31], [33]:

- Betriebstemperatur:  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $125^{\circ}\text{C}$
- Aktivierungszeit:  $<70\text{ms}$
- Aktivierungskraft (durch ein Verhältnis): 200N bis 300N
- Langzeitstabilität der verwendeten Materialien

In vorherigen Arbeiten ist es bereits bewiesen worden, dass FGL geeignet sind, um die geforderten Aktivierungszeiten und -kräfte für diese Anwendung [34] zu erfüllen. Dieses Projekt wurde schwerpunktmäßig auf die Erfüllung der erforderlichen Betriebstemperaturen und der Langzeitstabilität der eingesetzten Formgedächtnis-Elemente ausgerichtet.

## 8. Aktor-Material

Folgende Besonderheiten zeichnen einen hochwertigen FG-Aktor aus [35]:

- Große Arbeitsleistung pro Volumeneinheit
- Vollständige Arbeitsverrichtung in einem kleinen Temperaturintervall
- Es können verschiedene Bewegungsarten realisiert werden (Zug, Druck, Torsion, Biegung)
- Der FG-Effekt kann auf bestimmte Elementbereiche des FG-Elements beschränkt werden

Sollen große Kräfte und gleichzeitig akzeptable Stellwege erreicht werden, muss der Querschnitt des FG-Elements entsprechend groß sein. Einer Verwendung von großen Querschnitten stehen allerdings folgende Argumente entgegen:

- Wird das FG-Element durch Anlegen einer elektrischen Spannung direkt beheizt, treten sehr große Stromstärken auf, die meist nicht zu Verfügung gestellt werden können.
- Wegen der aufwendigen Herstellung eines massiven FG-Elements ist eine frühzeitige Festlegung der Konfiguration notwendig.
- Eine Garantie gleichbleibender Eigenschaften über die Querschnittsfläche ist wegen des metallurgisch komplexen Herstellungsprozesses nicht möglich.
- Im Querschnitt stellen sich inhomogene Spannungszustände ein. Diese werden verursacht durch die ungleich verteilten Bereiche mit austenitischer Umwandlung während der Erwärmung.
- Die Inhomogenitäten im Querschnitt verursachen eine ungleichmäßige Materialbeanspruchung, welche sich nachteilig auf die Lebensdauer auswirkt.

Aus den oben genannten Gründen ist folgendes ersichtlich: mehrere dünne Einzelquerschnitte sind besser als ein dicker Querschnitt [35].

Bei Tests aus der Diplomarbeit „Schnell schaltender Aktor aus Formgedächtnislegierungen“ [36] war es die Konfiguration aus vielen dünnen

Einzeldrähten, welche das beste Ergebnis lieferte. Bei diesen Tests sollte der FG-Draht ein bestimmtes Gewicht in max. 40ms um 12,5mm anheben. Erhitzt wurden die Drähte über einen Kondensator durch das Prinzip der Joule'schen Wärme. Dabei wurde die Bestromungsdauer variiert. Das beste Ergebnis lieferte die Konfiguration mit 30 Einzeldrähten eines Durchmessers von 0,254mm, welche zu einem Muskel geflochten waren. Diese Konfiguration schaffte die 12,5mm Hub in 24,9ms bei einem Gewicht von 20kg. Der Kondensator hatte eine Kapazität von 83700 $\mu$ F und war mit 100V aufgeladen. Die Bestromungszeit betrug 40ms.

Die hohe Geschwindigkeit der Energieeinbringung mittels Kondensator und die daraus resultierende schnelle Erwärmung sind ein Grund für die sehr schnellen Stellzeiten [36].

Wegen der langen Abkühlzeit des FG-Elements im Aktor ist die Dynamik von FG-Aktoren im allgemeinen schlecht. Das bedeutet, FG-Aktoren sind für schnelle zyklische Bewegungen nicht geeignet. Eine aktive Kühlung wäre eine Lösung.

Aus Sicht der Sicherheitstechnik sind FG-Aktoren allerdings äußerst interessant. In der Sicherheitstechnik ist nur die erste Bewegung eines Aktors wichtig - für eine nachfolgende Rückstellung steht meist weitaus mehr Zeit zur Verfügung. Diese erste Bewegung wird bei FG-Aktoren durch die Schnellerwärmung erzeugt. Wie sich gezeigt hat, liegen die Zeiten für eine Schnellerwärmung mittels Kondensator im Millisekundenbereich [36].

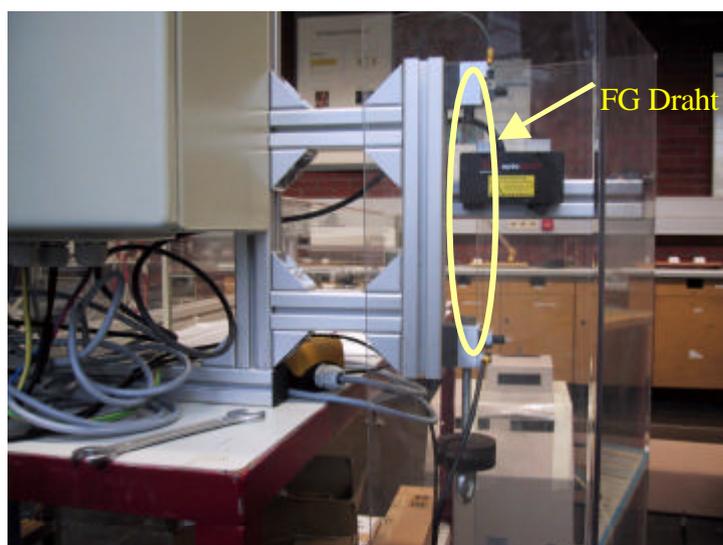
### *8.1 Draht-Spezifikationen*

Für alle Versuche wurde dieselbe Legierung mit demselben Drahtdurchmesser verwendet. Dieser Aktordraht ist ein NiTi-Draht vom Typ Legierung Dy90 (herstellerspezifische Angabe) und hat einen Durchmesser von 0,254mm. Der Draht wurde gegläht und thermomechanisch stabilisiert geliefert von der Firma Memory-Metalle GmbH, Weil am Rhein. Beschrieben wird die Legierung als „High temperature actuator alloy“ mit einer  $A_p$ -Temperatur von ca. 95°C.

Weiterhin ist die Drahtoberfläche oxidiert und wurde mit einer IC Batch Nummer 0026 ausgeliefert. Wichtig war, dass der Draht von einer Charge stammte, da die Verwendung von Aktormaterial aus mehreren Materialchargen einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte. Um eine Nachbestellung von Material zu vermeiden, welches aus einem anderen Herstellungsprozess stammt und somit andere Materialparameter hat, wurden 300m dieser Draht-Charge gekauft. Die genaue chemische Zusammensetzung dieses Aktormaterials wurde auf den Datenblättern des Herstellers leider nicht vermerkt. Des Weiteren ist die Legierung vom Hersteller auf den Einwegeffekt hin trainiert worden.

## 8.2 Training der Drähte

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Ölbadprüfstand und damit gesicherte Messergebnisse zu erreichen, sollen die erhaltenen Drähte genau mit der späteren Belastung trainiert werden. Dieses Training bewirkt eine Stabilität der FG-Drähte. Für das Drahttraining wurde der Laserprüfstand umgebaut. Durch den Umbau hängt das Gewicht direkt vertikal an dem Aktordraht (anstatt über die Umlenkrolle), was außerdem zu einer Verringerung der Reibung führte (siehe Abbildung 8-1).



**Abb. 8-1 Laser Prüfstand Umbau für Einzel Draht Training**

### Vorversuche an einem Einzeldraht

Der FG-Draht mit einer Länge von 244mm wurde zwischen den zwei Messingplatten festgeschraubt. Ein Gewicht von 697g (entspricht  $135\text{N/mm}^2$ ) hängt dadurch am unteren Drahtende und kann sich frei entlang des Item-Profiles bewegen.

Weiterhin wurde eine Messkarte direkt an den Prüfstand angebracht und angeschlossen. Es vereinfacht den Wechsel zwischen den zwei Prüfständen Laserprüfstand bzw. Draht-Trainier-Prüfstand und dem Ölbad-Prüfstand (der PC zur Messwertaufnahme und Weiterverarbeitung befindet sich auf einem Rollwagen und kann wahlweise an einen der Prüfplätze angeschlossen werden). Die Stromversorgung wurde durch Mithilfe des fachhochschuleigenen Hauselektrikers, Hr. Honsell, angeschlossen.

Nachdem die Probleme bei LabView, dem Messwerverfassungsprogramm, gelöst waren, wurden erste Vorversuche durchgeführt, um die geeigneten Werte bezüglich Stromhöhe, Bestromungszeit und Ruhephase zu ermitteln. Die Richtwerte hierfür wurden unter anderem aus den Angaben [37] bei den technischen Daten entnommen. Danach wurden folgende Einstellungen am Prüfstand, bzw. in LabView vorgenommen:

- Strom: 1,2A
- Bestromungszeit: 1s
- Ruhephase : 25s
- Zyklen: 40

Es zeigte sich, dass die Kurvenverläufe nach 40 Zyklen noch nicht stabil sind. Deshalb wurden noch zwei weitere Zyklenblöcke mit je 20 Zyklen gefahren. Es stellte sich heraus, dass die Stabilität immer noch nicht erreicht ist. Daher wurden weitere 80 Zyklen durchgeführt. Während der letzten 80 Zyklen wurde bemerkt, dass sich der Draht weiter verlängerte und diese Verlängerung pro Zyklus nun sogar stärker ausfällt, als bei den ersten Zyklen.

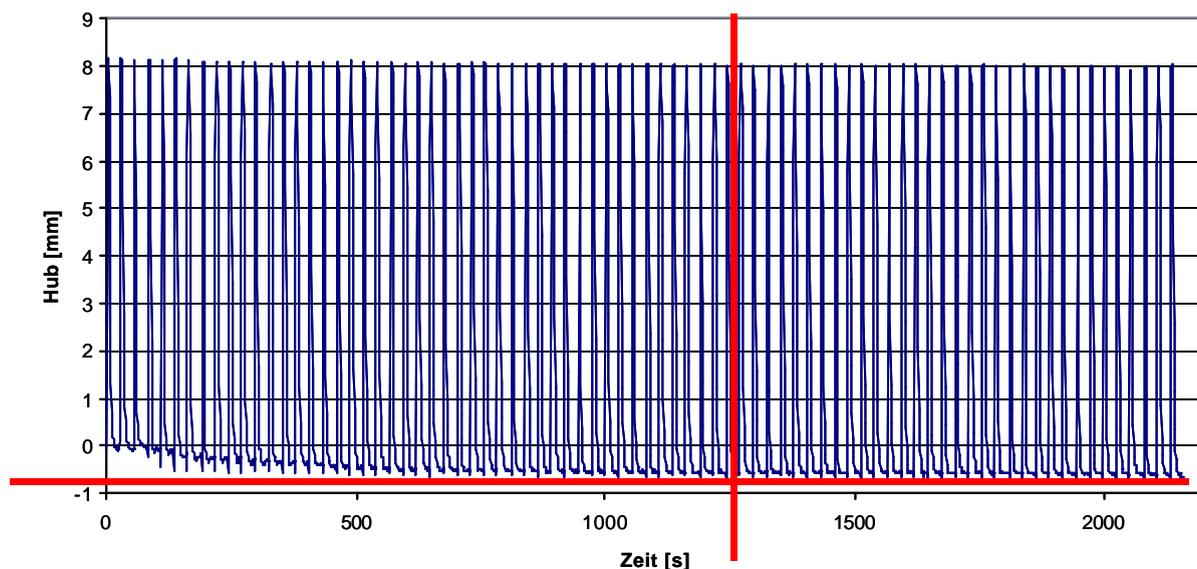
Aufgrund dieser unerwarteten Beobachtung wurde die Bestromungszeit (on-time) von Hand mitgemessen, wobei es sich herausstellte, dass die angegebene Zeit (on-

time) nicht mit der tatsächlichen Zeit übereinstimmt. Unabhängig davon, welche on-time über LabView eingegeben wurde, blieb die Bestromungszeit immer bei 8s (anstatt der angegebenen Zeit von 1s). Nun war klar, dass der Versuchsdraht durch das lange Bestromen auf sehr hohe Temperaturen erwärmt wurde, sich deshalb keine stabilen Verhältnisse einstellen konnten und der Draht nach erster Schädigung sich immer mehr verlängerte.

Das Problem der fehlerhaften LabView-Programmierung wurde behoben und nun konnte endlich mit dem Training begonnen werden. Folgende Einstellungen wurden vorgenommen für die folgenden Trainings Versuche verwendet:

- Strom: 1A
- Spannung: 30V
- On-Time: 2s
- Off-Time: 25s
- Zyklen: 80

In Abbildung 8-2 wird das Training des ersten Drahts dargestellt. Man sieht, dass sich ungefähr ab dem fünfzigsten Zyklus der FG-Draht stabil verhält. Aber zur Sicherheit wurden mehrere Zyklen durchgeführt. Abbildung 8-2 zeigt 80 Zyklen.

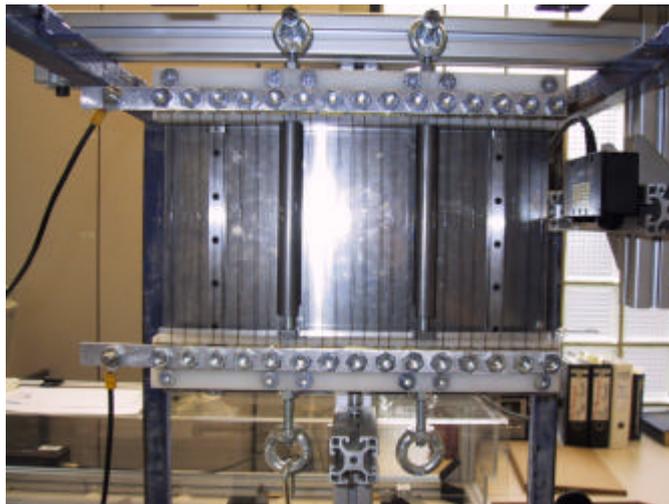


**Abb. 8-2 Darstellung des Trainings des ersten FG Drahts**

### Training aller Aktor-Drähte

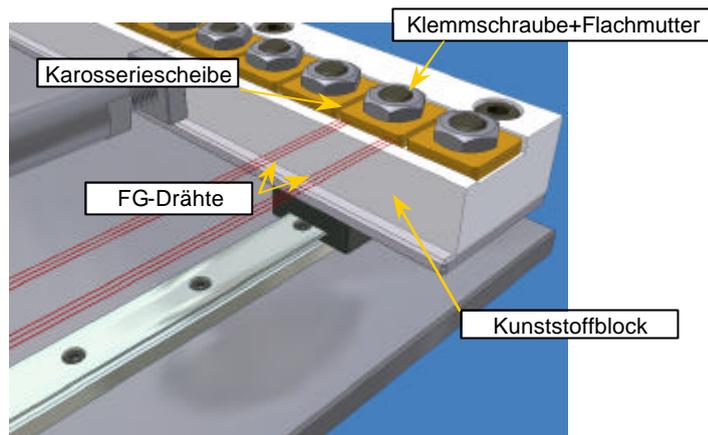
Aufgrund dieser Messwerte wurde entschieden, alle Drähte mit 80 Zyklen zu trainieren, um dann mit diesen effektstabilisierten Aktordrähften am Ölbad-Prüfstand die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu untersuchen. Durch das Training sollen sich nahezu gleiche Verhältnisse bezüglich Umwandlungstemperaturen und Effekt bei allen Proben einstellen. Für das Training werden die Proben mit derselben Belastung, nämlich  $135\text{N/mm}^2$ , vorgespannt wie bei den späteren Tests.

Zum Trainieren der 540 Drähte wurde eine Spannvorrichtung konstruiert und gebaut. In Abbildung 8-3 ist eine der sechs Spannvorrichtungen in der Trainierungsposition dargestellt, womit 90 Drähte auf einmal trainiert werden können. Diese Vorrichtung wurde in einen stabilen Rahmen vertikal hängend positioniert und unten mit entsprechenden Gewichten belastet.



**Abb. 8-3 Spannvorrichtung für Training und Auslagerung**

Da die Vorrichtungen nicht nur zum späteren Auslagern, sondern auch zum Trainieren der FG-Drähte benutzt wurden, musste gewährleistet sein, dass die beiden Einspannungen elektrisch voneinander getrennt sind. Zur elektrischen Trennung wurde der Hochtemperaturkunststoff (Polyvinylidenfluorid kurz: „PVDF“) verwendet.



**Abb. 8-4 Einspannung der FG-Drähte**

Nachdem die Drähte eingespannt wurden, wurde die Vorspannvorrichtung in eine senkrechte Position gebracht, befestigt und die Gewichte angehängt. Ein Gesamtgewicht von 62,73kg (entspricht 697g Einzelgewicht pro Probe) wurde für das Training an die Spannvorrichtung angehängt. Zur elektrischen Überbrückung jedes Probenpakets wurden zwei Stangen aus Aluminium angefertigt (siehe Abbildung 8-3) und an den Schaltkasten bzw. die Netzgeräte angeschlossen. Zur Bereitstellung der hohen Energie zum gleichzeitigen Training von 90 FG-Proben wurden mehrere Netzgeräte parallel geschaltet. Die Netzgeräte waren, damit alle gleiches Potential aufweisen, masseseitig miteinander und letztendlich mit der Mosfetschaltung verbunden. Auf der positiven Seite waren die Kabel des beweglichen Schlittens angeschlossen. Abbildung 8-5 zeigt den kompletten Versuchsaufbau.



**Abb. 8-5 Übersicht des Trainings mit parallel geschalteten Netzgeräten**

Die Taktung der Mosfets erfolgte analog zum Weg-Zeit Versuch mit Schnellerwärmung über das Messprogramm Labview mit dem Optokoppler. Zur Aufnahme des Weges wurde der Laser verwendet. Dazu war ein Aluminiumwinkel als Reflektor am beweglichen Schlitten angebracht.

### 8.3 Auslagerung

Um später eine Aussage über die Effektstabilität treffen zu können, werden die Proben bei verschiedenen Temperaturen ausgelagert, nämlich 140, 120, 100, 80 und 60°C. Bei diesen Versuchen werden 6 Proben je Temperatur und Zeit mit einer freien Weglänge von 200mm verwendet. Dabei sind 3 dieser Proben für den Laser Versuch und 3 für den Ölbadversuch. Parallel zu der Auslagerung im Ofen wird eine Probe bei Raumtemperatur (RT) für die gleiche Zeit ausgelagert. Am Ende von jedem Versuch werden die Diagramme der ausgelagerten Proben mit einem Referenzversuch verglichen, um festzustellen, ob eine Veränderung eingetreten ist.

Bei den Alterungsversuchen wird ausgenutzt, dass die Faktoren Zeit und Temperatur in direktem Zusammenhang zueinander stehen. So ist es möglich, Material künstlich altern zu lassen, indem der Faktor Zeit bis zu einem gewissen Grad durch den Faktor Temperatur ersetzt wird. Dieser Zusammenhang lässt sich bei FGL nicht komplett ausreizen, da während der Auslagerung keine Phasenumwandlung von Martensit in Austenit auftreten sollte. Ein weiterer Grund für die gewählte obere Temperatur sind die Bedingungen aus der KFZ-Industrie (Tabelle 8-1). Hier liegt für den gewählten Anforderungsbereich im Motorraum eine obere Betriebstemperatur ( $T_{OB}$ ) von 120°C zugrunde. Da ein Einsatz von FGL-Aktoren auch in anderen Anforderungsbereichen denkbar ist, wurde mit 140°C der Anforderungsbereich mit der höchsten  $T_{OB}$  gewählt [38]. Um die ausgewählte Legierung mit einer  $A_f$ -Temperatur von ca. 95°C überhaupt bei den oben genannten Temperaturen auslagern zu können, wurden diese mechanisch vorgespannt, um damit die Umwandlungstemperaturen zu höheren Temperaturen zu verschieben. Die Gründe hierfür sind folgende:

- Eine vorgespannte Auslagerung ist anwendungsbezogen, da der FG-Draht im fertigen Aktor später einmal vorgespannt eingebaut sein wird.
- Durch das Vorspannen des FG-Drahtes werden äußere Spannungen in das Material induziert. Diese äußeren Spannungen überlagern sich mit den inneren Spannungen und stören dadurch das thermodynamische Gleichgewicht des Materials. Die Störung des thermodynamischen Gleichgewichts hat eine Verschiebung der  $A_s$ -Temperatur nach oben zur Folge. Durch die äußere Spannungsbeaufschlagung kann laut Literatur eine Erhöhung der  $A_s$ -Temperatur von bis zu ca. 10 bis 20K pro 100N/mm<sup>2</sup> erreicht werden [5].

Die untere Temperatur (60°C) ist dazu da, um zu sehen, ob und bis zu welcher Temperatur sich ein eventueller Effektverlust bemerkbar macht. Die Versuche müssen bei 240 Tagen noch nicht abgeschlossen sein. Es gibt 6 Vorspannvorrichtungen mit denen je 15 Probenpakete ausgelagert werden können. Dies bedeutet, dass die Versuchsreihen mit 120°C und 140°C nach 240 Tagen auf jeden Fall abgeschlossen werden, da alle Proben aufgebraucht sind. Wenn schon früher ein Verlust des Effektes aufgetreten ist, werden diese Versuche soweit fortgeführt, bis der Effektverlust dreimal hintereinander keine wesentliche Schwankung aufweist. Die anderen Versuchsreihen können, falls sich bei 240 Tagen noch keine Änderung des Effektes bemerkbar gemacht hat, weitergeführt werden.

Da das fertige Produkt später einmal in einem Kraftfahrzeug eingebaut werden soll, wurden im voraus die Bedingungen für Tests aus der Automobilindustrie geprüft. Grundlage hierfür waren die Prüfbedingungen für elektrische und elektronische Baugruppen in Kraftfahrzeugen. Der Ausschnitt in Tabelle 8-1 zeigt, dass die Betriebs- und Lagertemperaturbereiche zwischen -40°C und 140°C sind.

Anforderung Anforderungs- Bereich	Schwing- Belastung nach	Mechanischer Schock nach Abschnitt 4.2.2	Betriebs- Temperatur- Bereich °C		Lagertempe- raturbereich °C	
			$T_{uB}$	$T_{oB}$	$T_{uL}$	$T_{oL}$
1 a: Frontbereich innen <sup>3)</sup> 1 b: Frontbereich außen	Abschnitt 4.1.4 Schärfegrad 2	erforderlich	-40	120	-40	130
2: Motorraum <sup>3)</sup>	Abschnitt 4.1.4	erforderlich	-40	120	-40	140
3: Motoranbau	Abschnitt 4.1.1	-	-40	140	-40	140

**Tab. 8-1 Ein Ausschnitt der normierten allgemeinen Prüfbedingungen aus der Automobilindustrie [38]**

Daraus folgte die Wahl der Auslagerungstemperaturen.

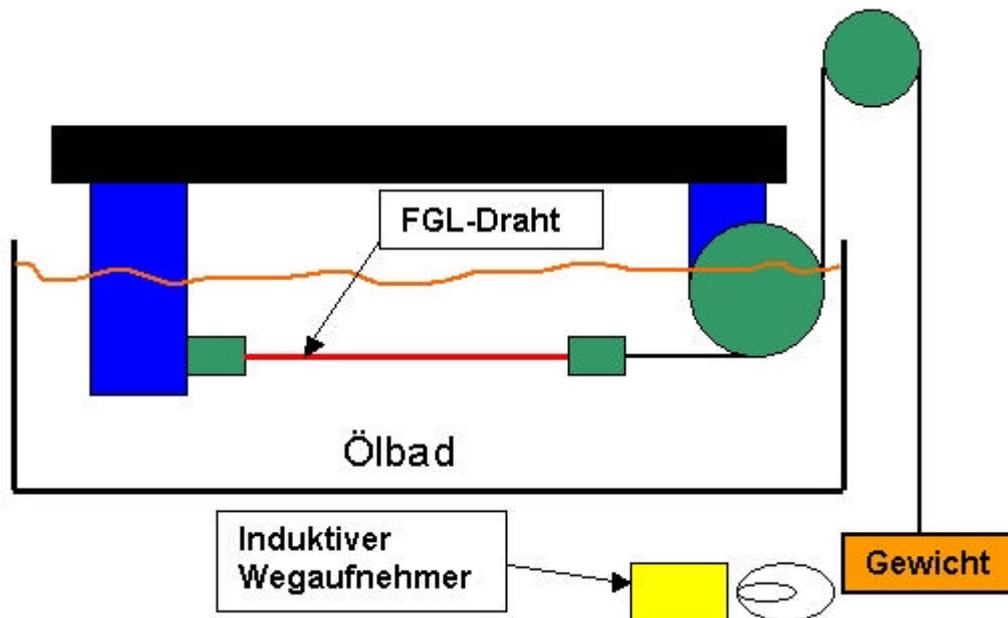
## 9. Versuchsstände

Die im Projekt zu konstruierenden Versuchsstände sollen die Möglichkeit bieten das sogenannte Langzeitverhalten der FG-Aktor-Elemente zu untersuchen. Wie im Kapitel 2 bereits erläutert, liegt die Hauptmotivation darin, eine mögliche Veränderung der FG-Elemente hinsichtlich des Effektes zu untersuchen. Für eine Anwendung im KFZ-Bereich in Sicherheitssystemen ist diese Langzeitstabilität von sehr großer Bedeutung, da gewährleistet sein muss, dass die eingesetzten Aktoren auch nach längerer Zeit, beispielsweise 8 Jahren, noch ihre Funktion erfüllen müssen – selbst wenn sie bis zu diesem Zeitpunkt noch nie aktiviert wurden.

Aus diesen Überlegungen heraus wurden zwei unterschiedliche Prüfstände konzipiert und gebaut, um zum Einen kleinste Veränderungen zu messen (Ölbad-Versuch) und zum Anderen die Funktionsweise (Laser-Versuch) zu testen. Wie bereits in Kapitel 8.2 beschrieben, erfolgte parallel dazu die Konstruktion einer Einspannvorrichtung, die es erlaubte, die Proben im Einbauzustand bei verschiedenen Temperaturen auszulagern. Nach erfolgtem Bau dieser Prüfstände wurden sie hinsichtlich ihrer Aufgaben optimiert und getestet (Kapitel 9.2 und 9.3). Die Ergebnisse dieser Versuche finden sich in dem nachfolgenden Kapitel 10.

### 9.1 *Aufbau der Versuchsstände*

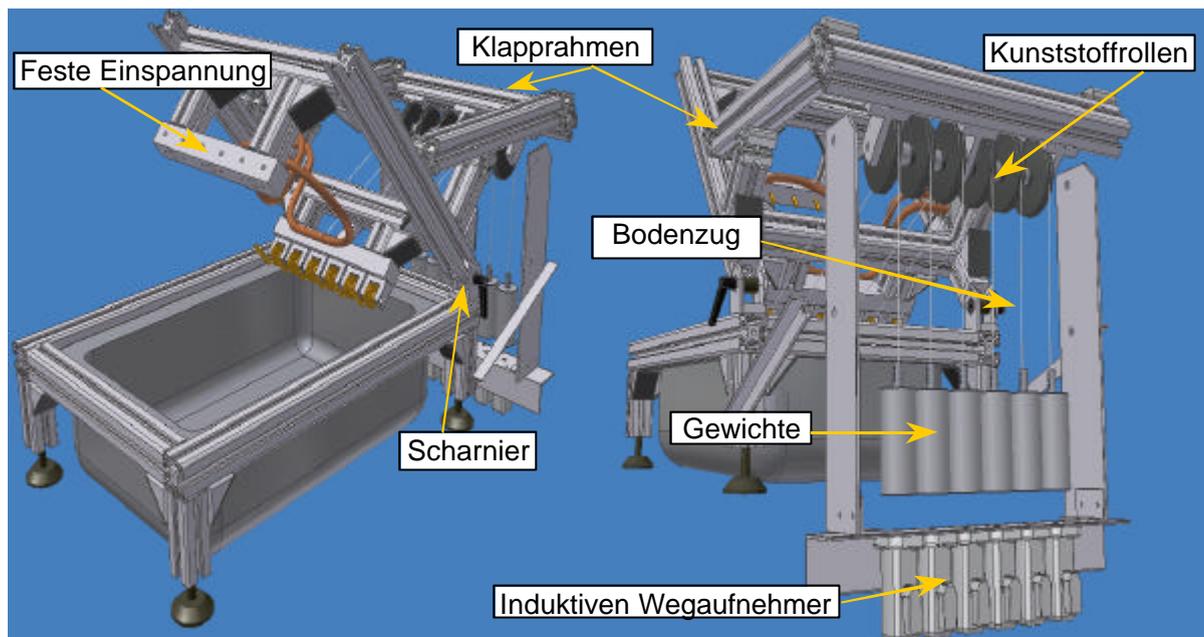
Durch das Wärmetauscher-Prinzip nimmt das FG-Element die Temperatur des umströmenden Mediums an. Bei dem Ölbadversuch wird die von einem definierten Gewicht vorgespannte Probe in einem Ölbad langsam erhitzt. Dabei kommt die Probe in den Bereich der Phasenumwandlung und verkürzt sich. Diese Verkürzung wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers gemessen und über der Temperatur dargestellt. Zu einem vollen Versuchsablauf gehört ebenfalls die Abkühlung auf die Ausgangstemperatur. Abbildung 9-1 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsaufbaus.



**Abb. 9-1 Schematischer Aufbau des Ölbadversuchs**

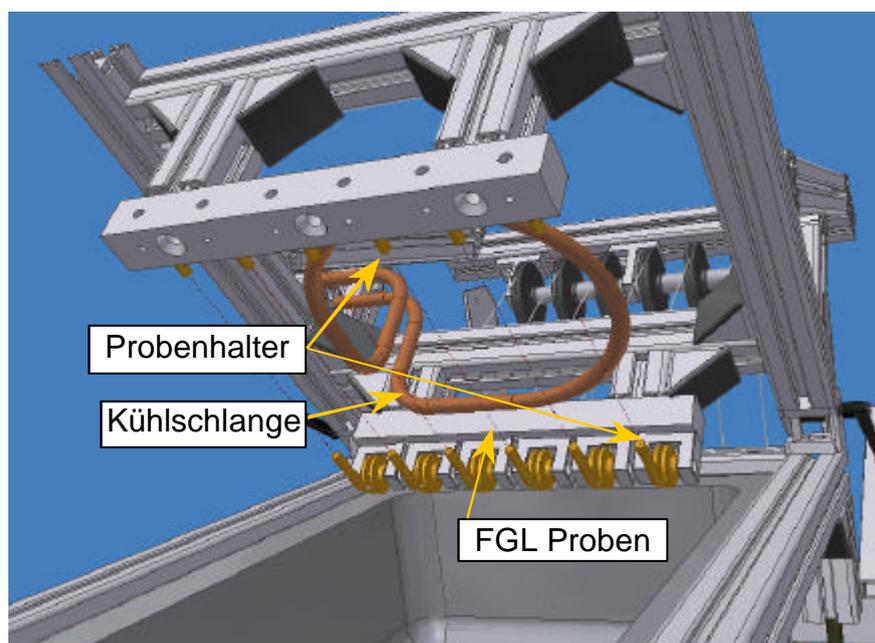
Das Grundgestell des Versuchstandes ist ein Rahmen, der eine isolierte Wanne fasst. Ein Thermostat mit einer Heizspirale ist an der Wanne montiert, der für die Erwärmung der Flüssigkeit sorgt. Eine Pumpe im Zentrum der Heizspirale gewährleistet eine ausgeglichene Temperatur in der ganzen Wanne.

Der bewegliche Rahmen in Abbildung 9-2 dient zu der Aufnahme der Probenhalter und der Umlenkrollen für die Gewichte. Für den Ein- bzw. Ausbau der Proben kann der Rahmen über die Scharniere gekippt werden. Zur Aufnahme der Proben dienen Messinghülsen, in denen ein Ende der Probe fest eingespannt wird, während das andere Ende lose an einem Bowdenzug hängt. Der Bowdenzug wird über zwei Rollen aus dem Ölbad geführt. Am anderen Ende des Bowdenzugs ist ein Gewicht befestigt, welches die Probe in der Versuchsposition vorspannt. Im aufgeklappten Zustand ist die Distanz zwischen der Kunststoffumlenkrolle und den induktiven Wegaufnehmern kürzer. Das hat zur Folge, dass der Bowdenzug nicht gespannt ist und erleichtert dadurch den Einbau der Proben erheblich.



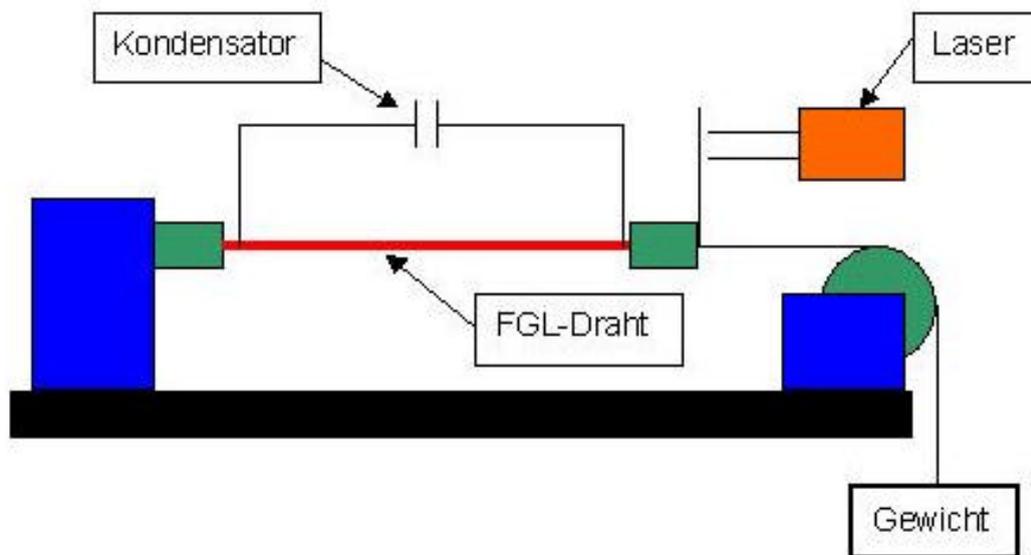
**Abb. 9-2 Klapprahmen mit den einzelnen Bauteilen**

Da die Tests im Ölbad wegen der langen Aufwärm- bzw. Abkühlzeiten viel Zeit in Anspruch nehmen, wurde dieser Prüfstand für die Aufnahme von 6 Proben konzipiert (Abbildung 9-3). Eine aktive Kühlung durch eine Kühlschlange im Öl senkt die Testzeit zusätzlich.



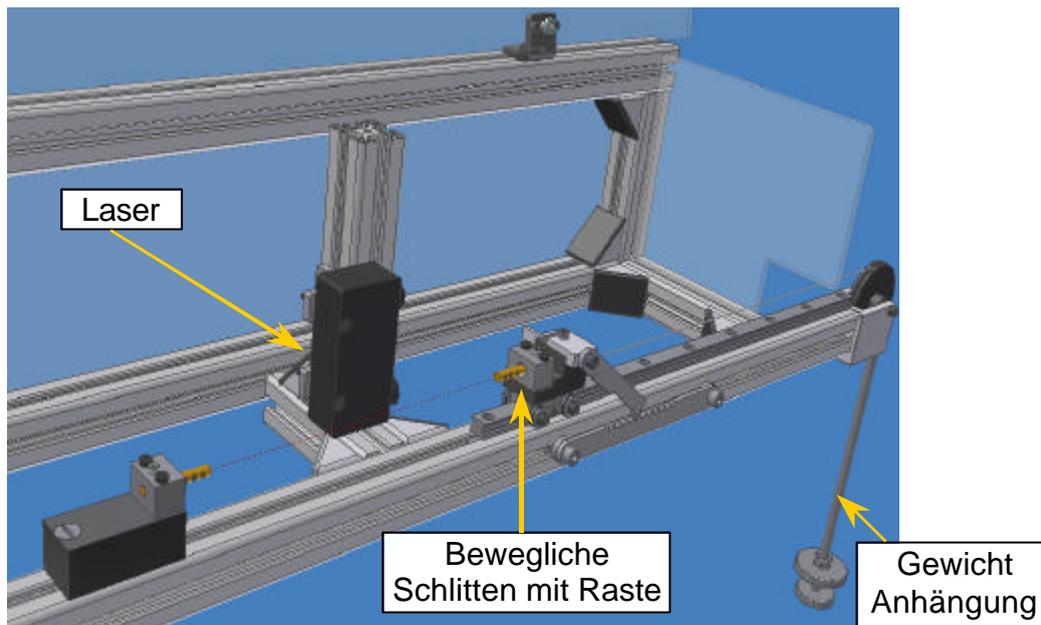
**Abb. 9-3 Probenhalter inklusive Proben und der Kühlschlange**

Bei den Laser-Versuchen wird die Probe ebenfalls von einem definierten Gewicht vorgespannt, wobei sie sich um einige Prozent dehnt. Anschließend wird die belastete Probe durch einen Kondensator bestromt. Dabei erwärmt sich die Probe schnell über ihre  $A_T$ -Temperatur und es kommt zur Phasenumwandlung. Hierbei wird der zurückgelegte Weg des FGL-Drahtes per Laser über der Zeit gemessen. Abbildung 9-4 zeigt den schematischen Aufbau des Versuches.



**Abb. 9-4 Schematischer Aufbau des Laser-Versuchs**

Die Grundkonstruktion des Laserversuches besteht aus Item-Profilen (Abbildung 9-5). Die Umlenkrolle wurde größer dimensioniert, um den Biegeradius des Stahdrahtes zu vergrößern. Zusätzlich wird anstelle des Stahdrahtes ein Bowdenzug mit Durchmesser 1,2mm verwendet, da dieser flexibler ist und sich besser um die Rolle legt. Die Gewichtsaufnahme wurde so konstruiert, dass handelsübliche Gewichte verwendet werden können und so in einem gewissen Bereich durch Zusammenstellen verschiedener Gewichte jedes Gewicht einfach realisiert werden kann. Bei der Rückschlagsicherung kam ein Teil aus der Scharniertechnik von Falltüren mit einem Mehrfachraster zum Einsatz. Auch die Sicherheit des Prüfstands wurde verbessert. Zusätzlich zur Plexiglashaube gibt es einen Stromkreis mit einem Lastwiderstand, der den Kondensator beim Öffnen der Haube entlädt.



**Abb. 9-5 Die einzelnen Bauteile des Laserprüfstandes**

## 9.2 Die Vorversuche am Ölbad-Prüfstand

Um zu gewährleisten, dass der Prüfstand einwandfrei funktioniert, müssen im Vorfeld einige Messungen am Prüfstand durchgeführt werden. Diese Messungen beinhalten unter anderem die Ermittlung der Reibung in den Rollen und die Berechnung des korrigierten Gewichtes für den Ölbadprüfstand, um eine definierte Zugbelastung auf den Draht aufzubringen [39] sowie die Überprüfung der Temperaturverteilung im Ölbad. Außerdem wurden die induktiven Wegaufnehmer kalibriert.

Parallel hierzu wurden in diesem Zusammenhang Versuche durchgeführt, um einige Effekte im Material zu überprüfen. Diese Vorversuche beinhalteten beispielsweise Vordehnungsversuche mit dem Ziel, bei den einzelnen Proben durch Vordehnung eine Erhöhung der  $A_s$ -Temperatur zu erreichen. Es wurde auch überprüft, ob es möglich ist in der Einspannvorrichtung bei 140°C martensitisches Drahtmaterial auszulagern.

### 9.2.1 Vordehnversuche zur Erhöhung der Stelltemperatur

Wie im Allgemeinen bekannt, können bei FGL die Umwandlungstemperaturen durch eine Erhöhung der Zugspannung nach oben verschoben werden. In diesem Forschungsprojekt treten bei der Aktivierung der FG-Drähte über die Kondensatorentladung sehr hohe Beschleunigungskräfte auf, so dass die gewählte Zugspannung von  $135\text{N/mm}^2$  (bei der Auslagerung wie auch in den Prüfständen) nicht mehr weiter erhöht werden darf. Eine weitere Möglichkeit, die Stelltemperatur  $A_p$  der Ausgangsdrähte zu erhöhen, liegt in dem Verfahren der Drahtvordehnung. Hierzu werden die Drähte verschieden stark vorgedehnt. Für die Vordehnung der Proben wurde eine Zugmaschine der Firma „Zwick Roell“ (Typ: Z 2,5) verwendet. Die Proben wurden zwischen zwei Keramikplatten geklemmt. Die eingestellte Dehnung bezieht sich auf die Maschine durch Messung über den Traversenweg. Die Probe hat einen elastischen Bereich, um den sie sich bei Entlastung wieder verkürzt.

#### Maschinenparameter:

Zielposition:	Je nach Versuch eingestellte Dehnung (12%, 11%, 10%, 8%, 6%)
Geschwindigkeit:	lagegeregelt 15mm/min
Haltezeit :	20s
Halteart:	dehnungsgeregelt
Vorkraft:	0,4N
Vorkraftgeschwindigkeit:	20mm/min
Vorkraft Haltezeitmodus:	Haltezeit abwarten
Halteart bei Vorkraft:	lagegeregelt
Haltezeit bei Vorkraft:	10s
Zeit bis Vorkraft:	300s
Kraftmessdose:	bis 500N

#### Probenparameter:

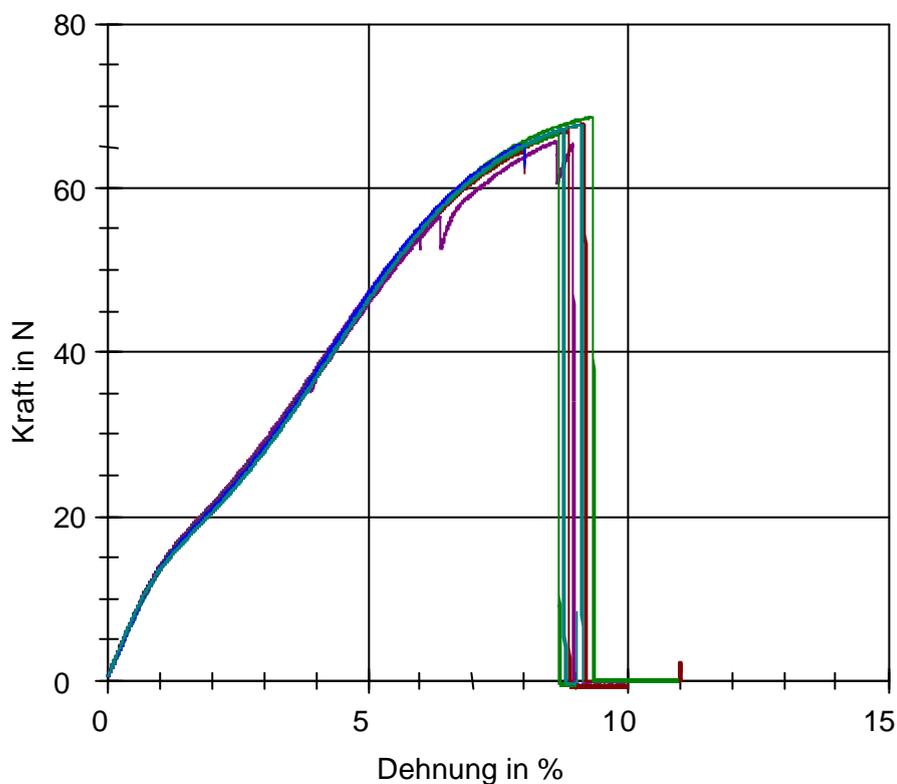
Material:	NiTi
Durchmesser:	0,254mm
Freie Länge:	140mm
Gesamtlänge:	ca. 200mm

Zusätzliche Messwerte:

Raumtemperatur: 22,5°C

Luftfeuchtigkeit: 42%

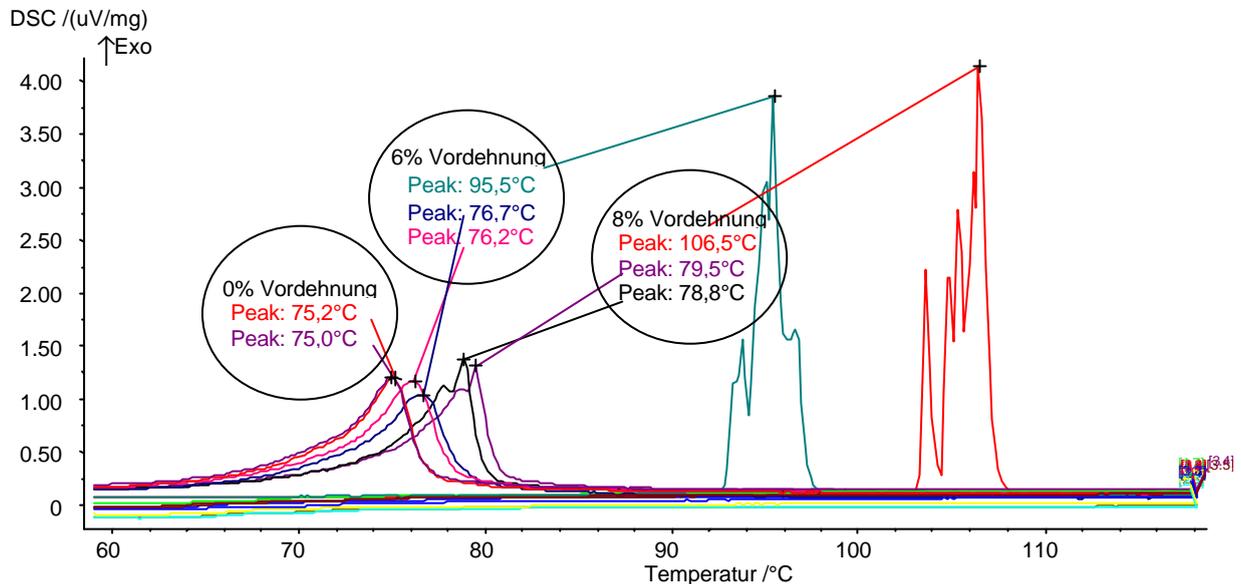
In Abbildung 9-6 ist aus der Serie aller Versuche zu erkennen, wie hoch die Dehnkraft für die jeweilige Dehnung ist. Außerdem zeigt die Abbildung, dass es nicht möglich war, die 200mm langen Drahtproben über 9% zu dehnen – bei allen Versuchen über diesem Grenzwert brach die Probe. Deshalb enthält dieser Versuchsbericht nur Ergebnisse der 6 und 8% vorgedehnten Proben.



**Abb. 9-6 Grafik mit allen Vordehnversuchen zusammen**

In einem weiteren Schritt wurde die sogenannte Differential-Scanning-Calorimetry (DSC)-Methode benutzt, um die spezifische Wärmeabgabe der Probe über der Temperatur zu messen. Ziel dieser Untersuchung ist eine Bestätigung der Theorie, dass sich die Umwandlungstemperaturen nach oben verschieben, wenn der FG-Draht vorgedehnt oder vorgespannt wurde.

Die Probe wurde von Raumtemperatur auf  $-50^{\circ}\text{C}$  abgekühlt, was gleichzeitig der Startpunkt für die Messung war. Anschließend wurde die Probe mit  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  auf  $150^{\circ}\text{C}$  erwärmt. Danach wurde die Probe wieder auf  $-50^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Solch ein



**Abb. 9-7 Ergebnis des DSC-Versuchs**

Zyklus wurde zwei bis drei mal durchgeführt. Abbildung 9-7 kann entnommen werden, dass die um 0% vorgedehnte Probe nur zwei Zyklen durchlaufen hat, die Proben mit 6 und 8% Vordehnung drei Zyklen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Umwandlungstemperatur der vorgedehnten Proben im Vergleich zu der ungedehnten Probe bei der ersten Umwandlung sehr stark zu höheren Temperaturen verschoben wurde (6% Vordehnung:  $95,5^{\circ}\text{C}$  und 8% Vordehnung:  $106,5^{\circ}\text{C}$  gegenüber  $75,2^{\circ}\text{C}$  ohne Vordehnung). Jedoch weisen die Peaks der zweiten und dritten Umwandlung dieser vorgedehnten Proben nur noch geringe Unterschiede in den Umwandlungstemperaturen auf (6% Vordehnung:  $76,7^{\circ}\text{C}$  bzw.  $76,2^{\circ}\text{C}$ , 8% Vordehnung:  $79,5^{\circ}\text{C}$  bzw.  $78,8^{\circ}\text{C}$  gegenüber 0% Vordehnung:  $75^{\circ}\text{C}$ ). Die Versuche bestätigen dadurch die Theorie. Aus der Abbildung 9-7 ist ein deutlicher Trend zu höheren Umwandlungstemperaturen sichtbar, der vor allem bei der ersten Umwandlung sehr deutlich ist.

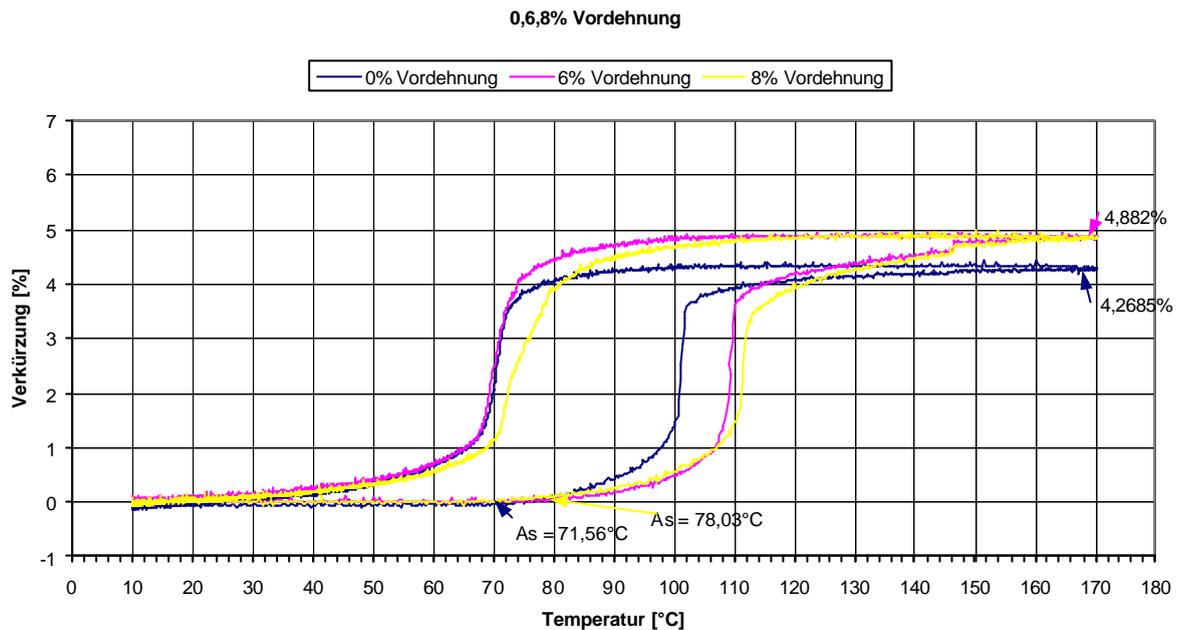
Zu den eigentlichen Vorversuchen am Ölbadversuch wird zunächst eine kurze Beschreibung der Ölbadversuche zur Ermittlung der Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) und der Verkürzung der FG-Drahts gegeben.

Es wurden stets 6 Proben pro Versuch getestet. Die Proben werden mit 200mm freier Probenlänge durch das Ölbad geführt. Über die Umlenkrollen wird jede Probe einzeln mit 876,6g belastet, was einer Spannung von  $135\text{N/mm}^2$  im Draht entspricht. Die Erwärmung und Abkühlung erfolgt über das Thermoöl im Temperaturbereich 10 bis  $170^\circ\text{C}$ . Die Verkürzungen bzw. Verlängerungen der FG-Drähte werden über die induktiven Wegaufnehmer bei jeder Probe einzeln aufgenommen und über das Programm LabView ausgewertet.



**Abb. 9-8 Ölbadversuchsaufbau**

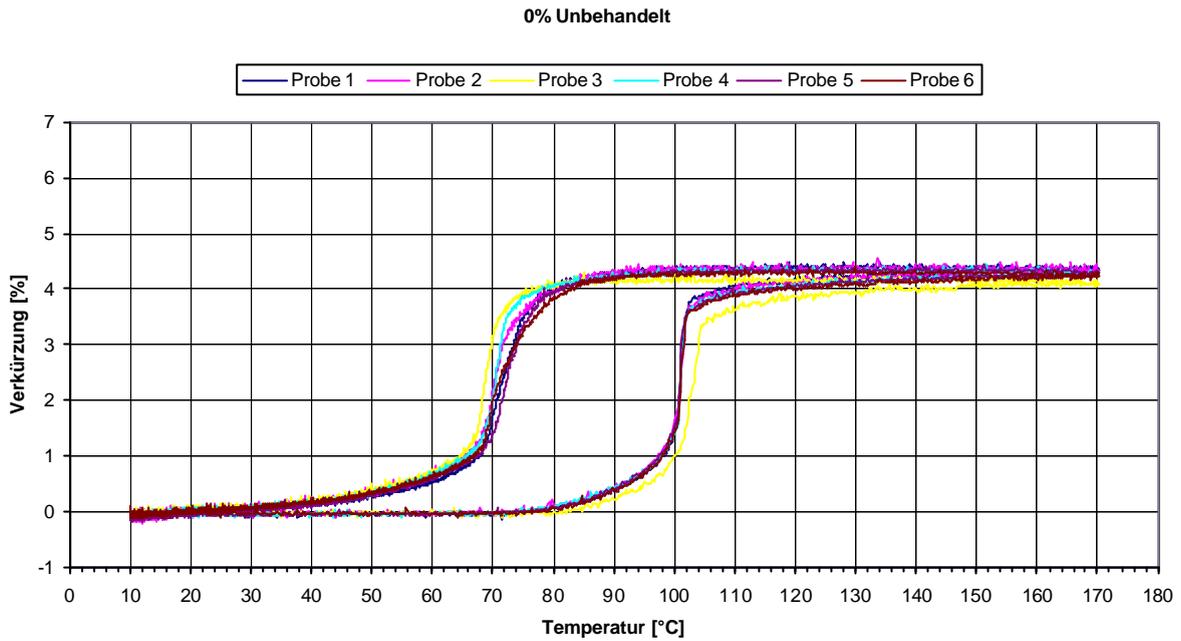
Abbildung 9-9 zeigt jeweils eine ausgewählte Probe der Reihe mit 0%, 6% und 8% Vordehnung im Vergleich, aufgetragen als kompletter Zyklus (Aufwärmung und Abkühlung) in einem Verkürzungs-Temperatur-Diagramm.



**Abb. 9-9 0%, 6% und 8% Vordehnung**

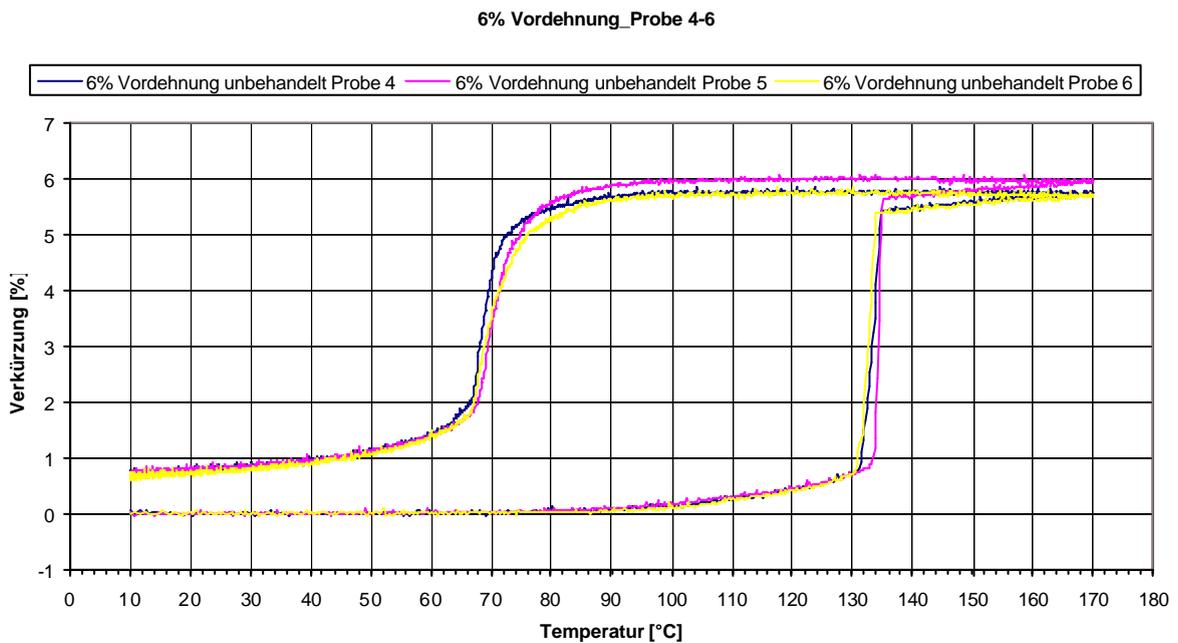
Man sieht deutlich, dass eine Vordehnung von 6% zu einer Erhöhung der Stelltemperatur ( $A_p$ ) von ca. 7°C führt, wobei der Effekt der Verkürzung um 0,7% zunimmt. Eine Vordehnung von 8% bewirkt eine noch leicht höhere Verschiebung der Stelltemperatur bei etwa gleicher Verschiebung des Effekts der Verkürzung. Bei der Abkühlung lässt sich nur bei der Probe mit 8% Vordehnung eine leicht frühere Rückstellung beobachten. Die beiden anderen Proben wandeln bei der gleichen Rückstelltemperatur um.

Bei einer genaueren Betrachtung aller Versuchsergebnisse zur exakteren Auswertung dieser hier nur tendenziell beschriebenen Verschiebung musste leider festgestellt werden, dass stets die Probe 3 zu anderen Ergebnissen führt, d.h. dass die vom Probenplatz 3 aufgezeichnete Kurve stets von den Kurven der Vergleichsproben abwich. Der Kontrollversuch aus Abbildung 9-10 zeigt, dass 6 nicht vorgedehnte Proben erwartungsgemäß zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen, jedoch auch hier die Probe 3 etwas aus der Reihe fällt.



**Abb. 9-10 Unbehandelte Proben aus einem Ölbadversuch**

Aber auch beim Prüfen der mit 6% und 8% vorgedehnten Proben, zeigt Probe 3 stets eine deutliche Abweichung. Es wurden 3 Proben mit 6% Vordehnung (Abbildung 9-11) und 3 Proben mit 8% Vordehnung (Abbildung 9-12) im gleichen Versuch geprüft.



**Abb. 9-11 Probe 4 bis 6 mit 6% Vordehnung**

8% Vordehnung\_Probe 1-3

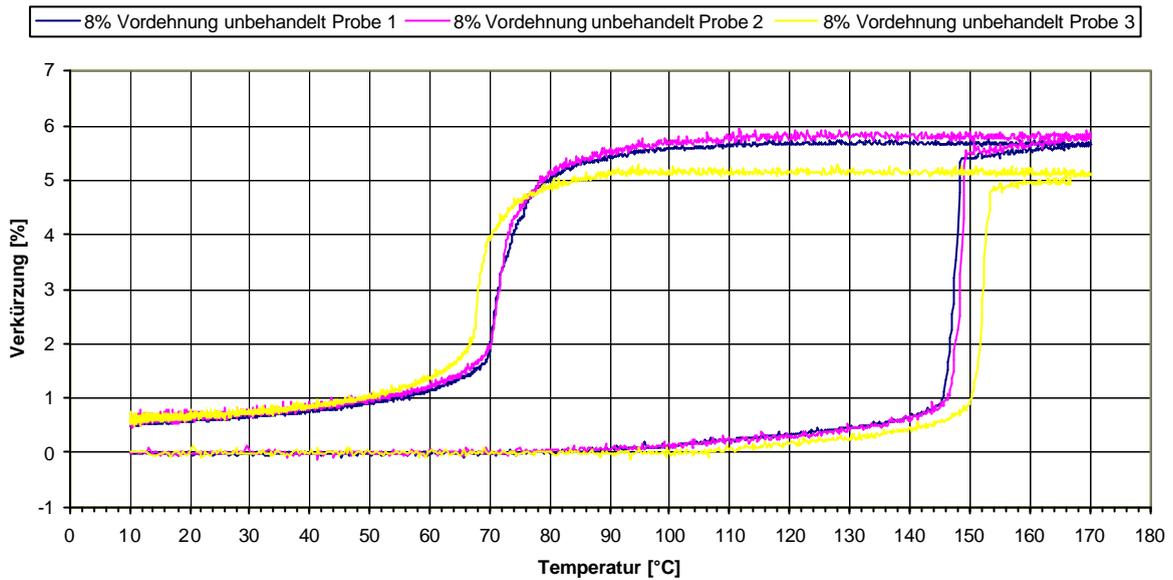
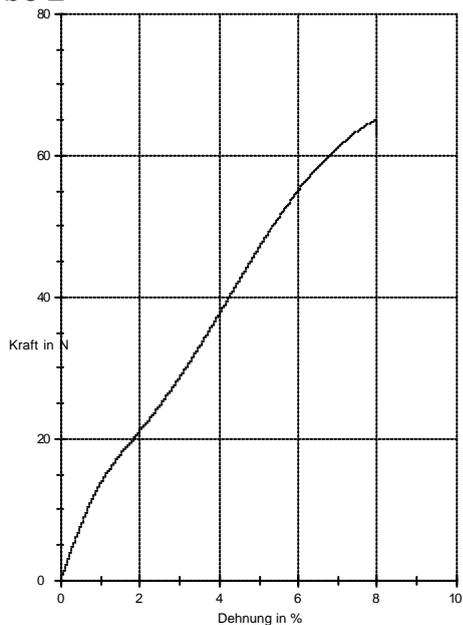


Abb. 9-12 Probe 1 bis 3 mit 8% Vordehnung

Da die Abweichung bei den vorgedehnten Proben größer war, wurden zunächst die Vordehnungsversuche genauer untersucht. Aus Abbildung 9-13 wird entnommen, dass beim 7. und 8. Versuch die Dehnung ziemlich genau ist, sprich 65N beim 7. Versuch und 65,3N beim 8. Versuch. Nicht der Endwert, wohl aber die Dehnungsverläufe sind nahezu identisch.

Probe 2



Probe 3

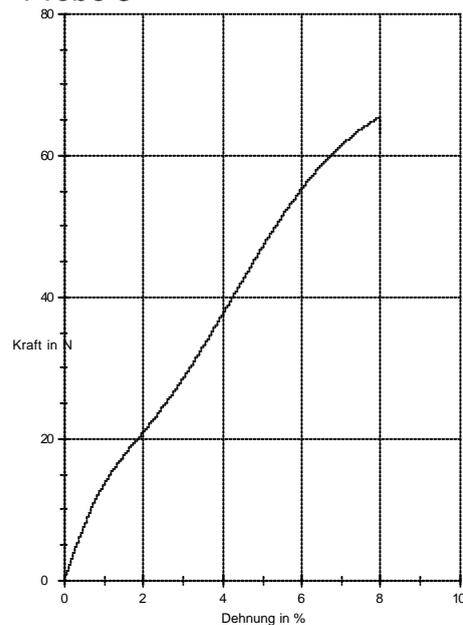
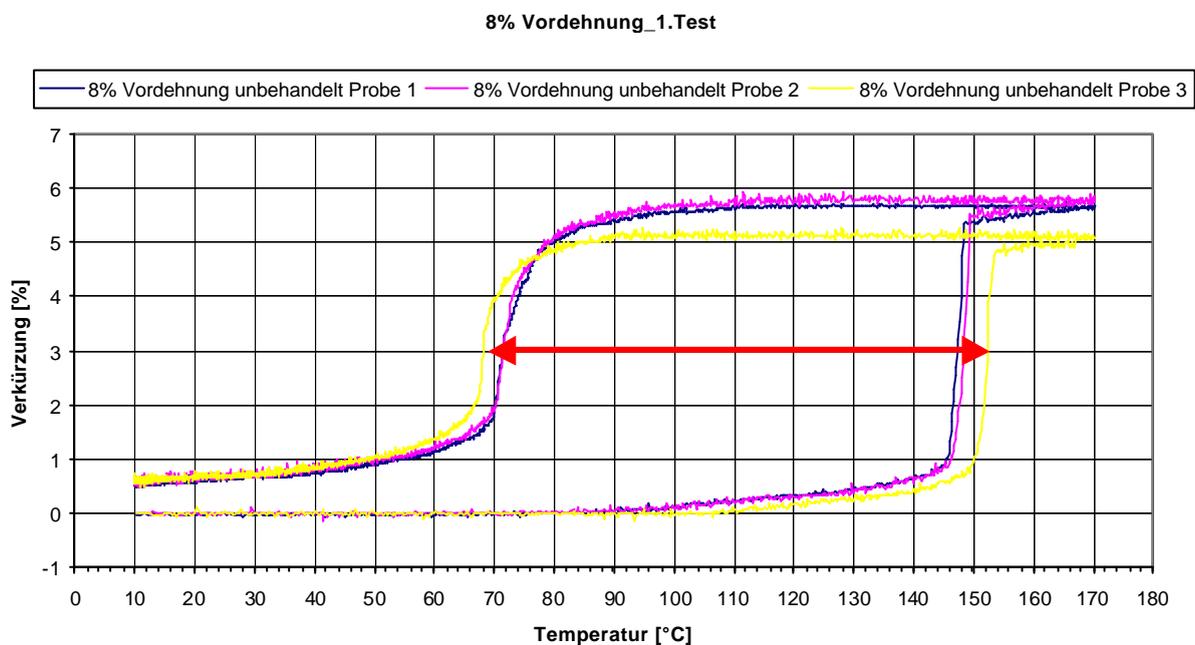


Abb. 9-13 7.Versuch mit 8% Dehnung (links) und 8.Versuch mit 8% Dehnung (rechts)

Es ist daher nahezu auszuschließen, dass ein Fehler bei den Vordehnungsversuchen durch unterschiedliche Vorbehandlung eingebracht wurde. Die anschließende Untersuchung aller zu dem Zeitpunkt vorliegenden Ergebnisse aus Ölbadversuchen an vorgedehnten Proben ergab:

Beim 8% Vordehnungsversuch im Ölbad wurden drei Versuche gemacht. Bei allen drei Versuchen zeigt sich eine deutliche Abweichung bei der 3. Probe. Die Hysteresebreite von der 3. Probe ist auch breiter als die der Proben 1 und 2. Abbildung 9-14 zeigt dieses Versuchsergebnis.



**Abb. 9-14 Hysteresebreite der 3. Probe 1. Versuch mit 8% Vordehnung**

Unten in der Abbildung 9-15 wird die Abweichung durch den roten Kreis angezeigt. Da ein Fehler beim Vordehnen nahezu ausgeschlossen werden kann, wurde auch geprüft, ob die mögliche Ursache beim gelieferten Material liegen könnte, z.B. in einer Inhomogenität aufgrund eines Trainiereffekts. Eine Nachfrage beim Drahtlieferanten schließt diese Vermutung aber nahezu aus, da die Drähte in einem Durchlaufverfahren wärmebehandelt und 600 mal trainiert wurden.

8% Vordehnung\_2.Test

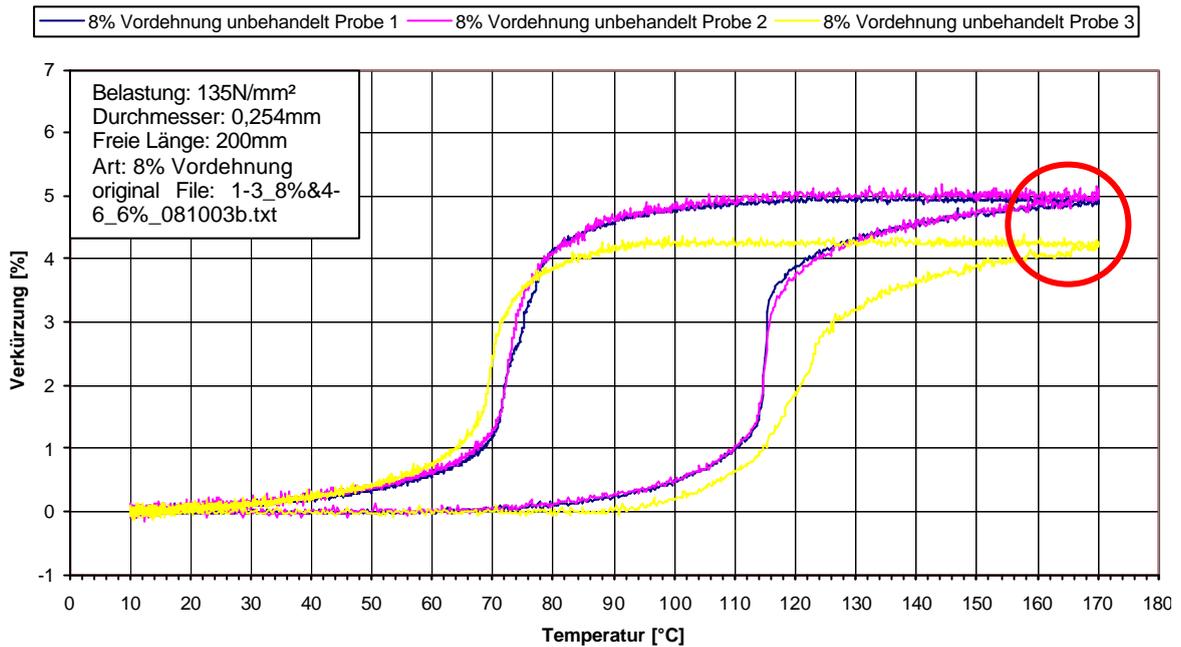


Abb. 9-15 Abweichung der 3. Probe 2. Versuch mit 8% Vordehnung

Um die Kurven besser vergleichen zu können, wurden über das Tangentenverfahren die PUT ermittelt und in die Diagramme mit eingetragen. In der nachstehenden vergrößerten Abbildung 9-16 sieht man, dass bei der Aufheizung die austenitische Start-Temperatur ( $A_s$ ) sich auch zwischen der 1. und 2. Probe mit 70°C gegenüber der 3. Probe mit 93°C unterscheidet. Die Steigung der 3. Probe ist auch flacher als die der beiden anderen Proben. Bei der Abkühlung kann auch ein großer Unterschied zwischen den beiden Proben 1 und 2 ( $M_s$  bei beiden 112°C) und der Probe 3 ( $M_s=95^\circ\text{C}$ ) festgestellt werden.

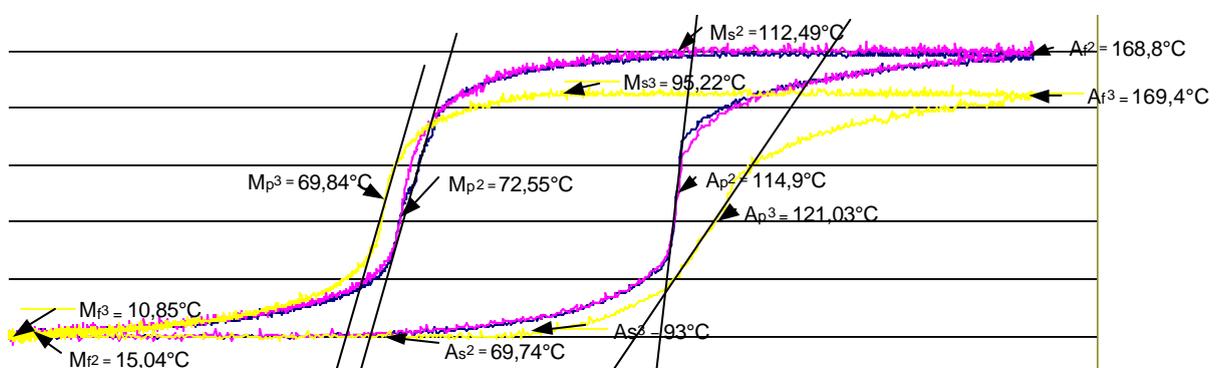
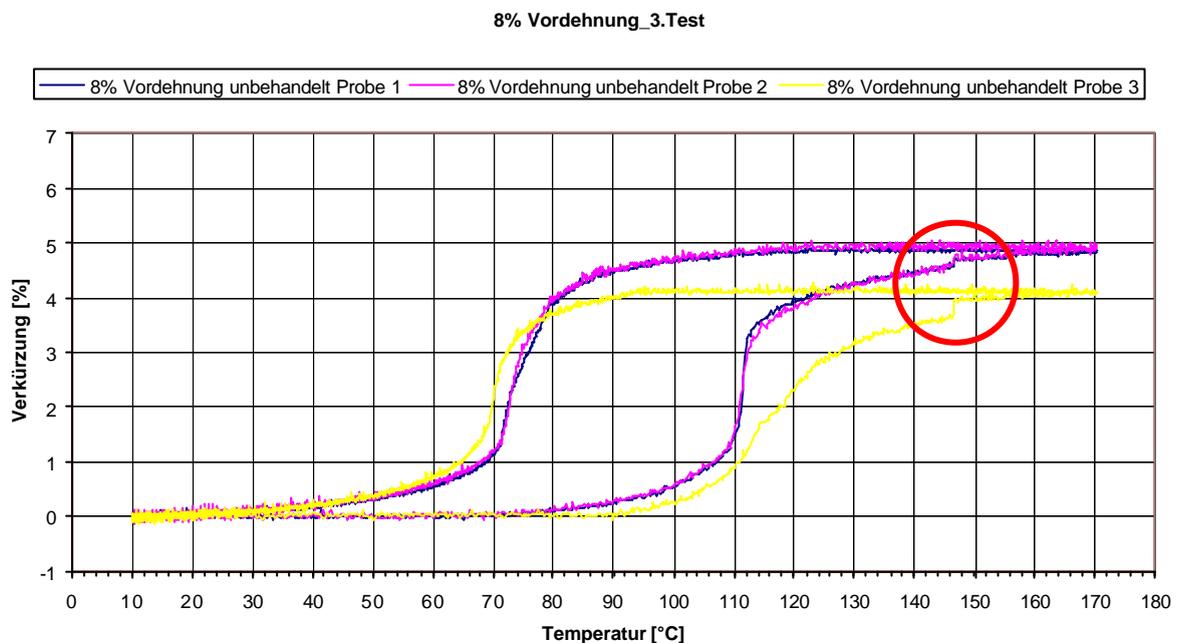


Abb. 9-16 PUT Ermittlung der 3. Probe 2. Versuch mit 8% Vordehnung

Bei Betrachtung der Ergebnisse im dritten Test (Abbildung 9-17) kann bei ca. 146°C eine schnelle Verkürzung („Stufe“) festgestellt werden. Diese unerklärliche Stufe ist bei der 3. Probe stärker ausgeprägt, findet sich jedoch auch bei den Proben 1 und 2.



**Abb. 9-17 Stufe der 3. Probe 3. Versuch mit 8% Vordehnung**

Es wurden zwei weitere Versuche durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Stufe am Ende der Austenitumwandlung sich nach und nach abbaut. Im 4. Test (Abbildung 9-18) tritt die Stufe etwas flacher noch mal bei höherer Temperatur (bei ca. 155°C) auf. Die Verkürzung ist im Vergleich zu den anderen Tests etwas kleiner geworden.

6% & 8% Vordehnung\_4.Test

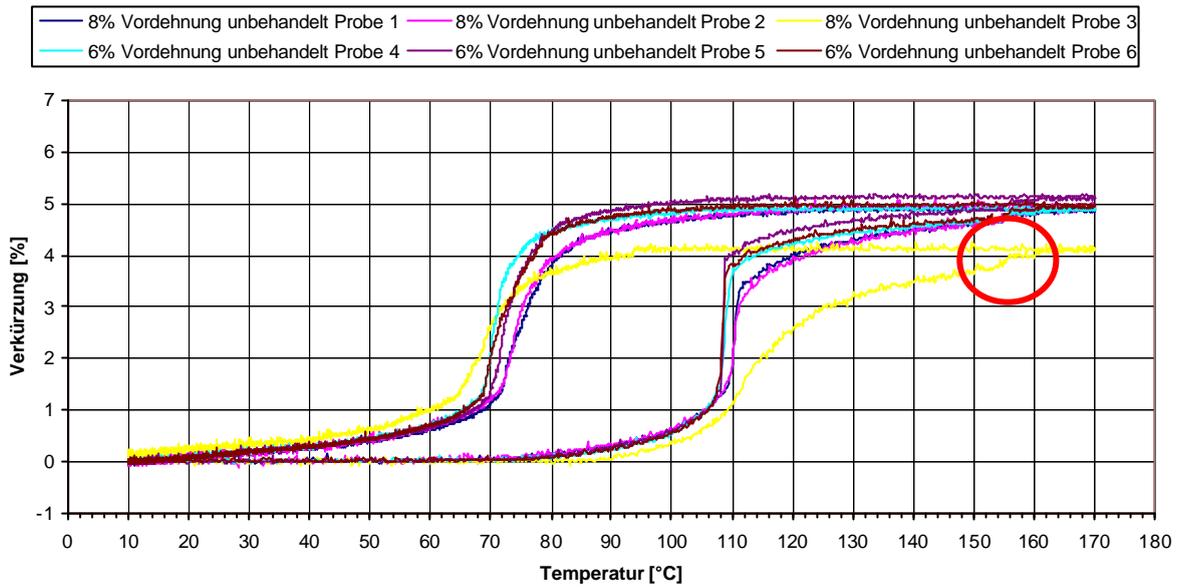


Abb. 9-18 Stufenabbau der 3. Probe 4. Versuch

Im 5. Test (Abbildung 9-19) war die Abweichung von Probe Nummer 3 noch deutlicher zu erkennen, die vorher festgestellten Stufen treten jedoch nicht mehr auf.

6% & 8% Vordehnung\_5.Test

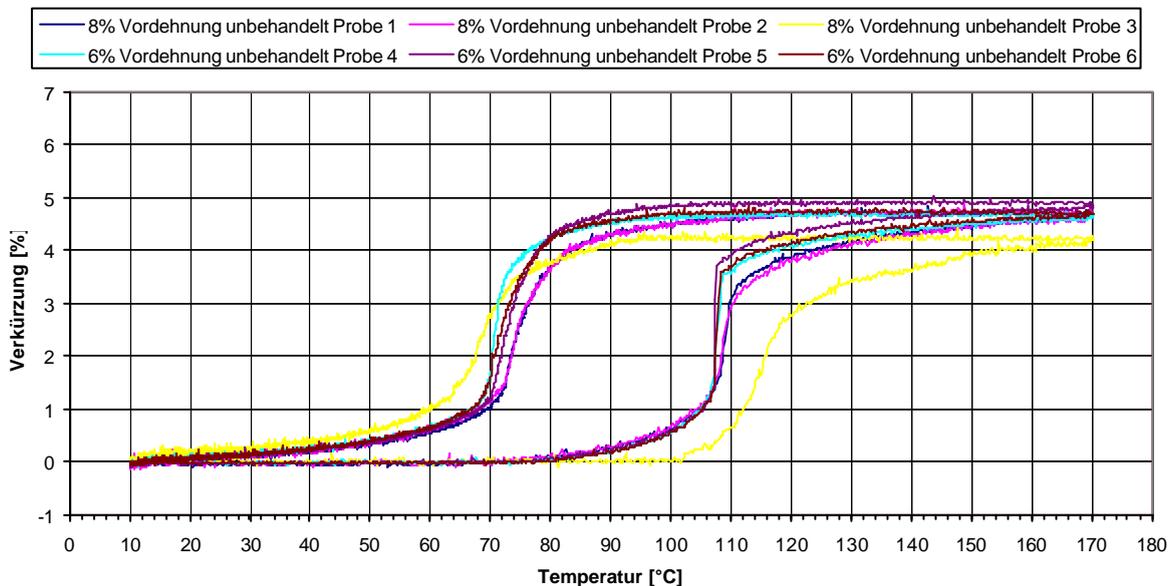


Abb. 9-19 Stufenabbau aber mit Abweichung der 3. Probe 5. Versuch

## Systematische Fehlersuche am Gesamtsystem

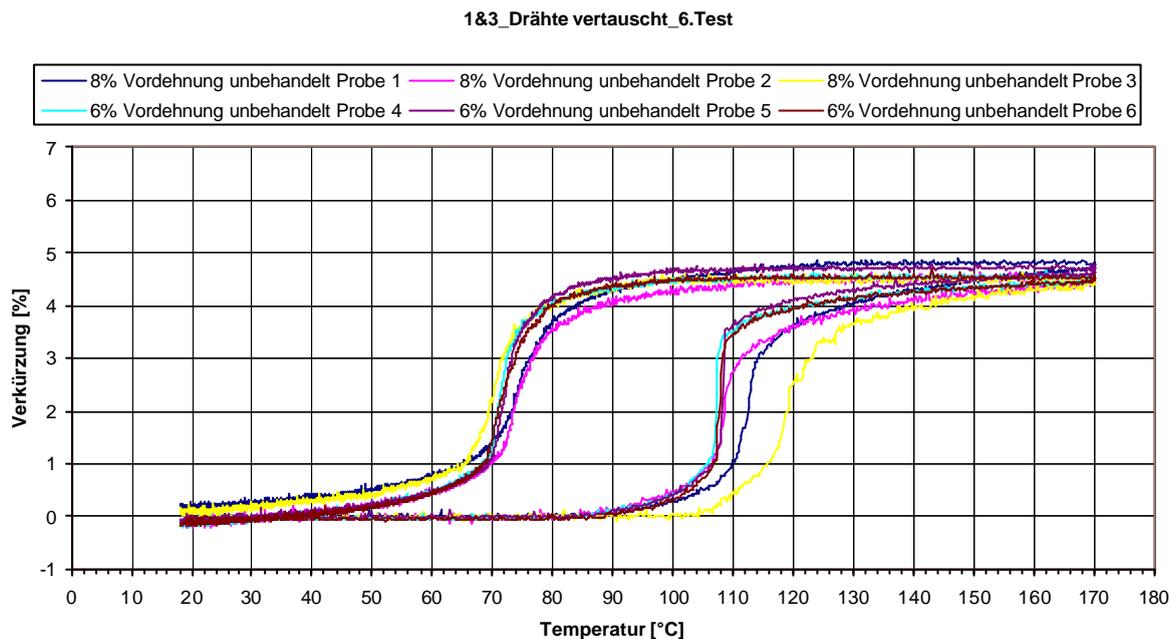
Bevor eine weitere, detaillierte Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf eine Erhöhung der Umwandlungstemperaturen durch Vordehnung stattfinden kann, muss zunächst der Fehler an der stets abweichenden Probe auf dem Probenplatz 3 behoben werden. Da ein eingebrachter Fehler bei der Vordehnung ebenso ausgeschlossen werden konnte, wie bei der Homogenität des Ausgangsmateriales, konzentrierte sich nun die weitere Fehlersuche bezüglich Probe 3 auf den Ölbadprüfstand.

Um die Ursache der „Ausreißerproben“ zu beheben, wurde die weitere Vorgehensweise besprochen. Es wurde beschlossen, die nachfolgenden Möglichkeiten in dieser Reihenfolge zu prüfen, bis die Fehlerursache gefunden wird:

1. die FG-Drähte von Probenplatz 1 und 3 zu tauschen (zur Feststellung, ob es an der Probe, oder an dem Probenplatz liegt)
2. die Rolle 3 zu schleifen (weil der Widerstand möglicherweise zu groß sein könnte und damit der Draht klemmen könnte, d.h. sich später verkürzt)
3. Messkarte von Probenplatz 3 und 4 tauschen (möglicher Messkartendefekt prüfen)
4. Bei Probenplatz 3 das Kabel vom Wegaufnehmer zur Messkarte ersetzen (möglichen Kabeldefekt prüfen)
5. Induktiven Wegaufnehmer von Probenplatz 3 mit 4 tauschen (möglichen Defekt am Wegaufnehmer prüfen)
6. Messingrolle zusammen mit Halter von Probenplatz 3 nach 4 tauschen (möglichen mechanischen Widerstand prüfen)
7. Den Kanal auf dem Connector Block 3 nach 4 umprogrammieren (möglichen Softwarefehlen prüfen)

**Zu 1:**

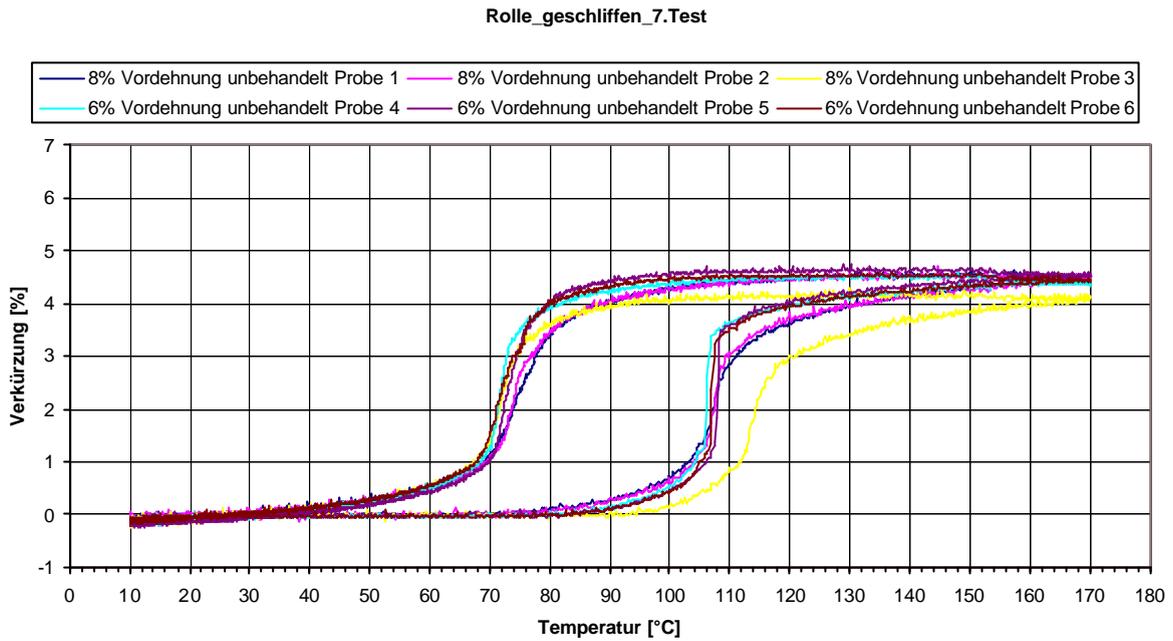
Nach dem Vertauschen der Drahtprobe von Platz 1 nach 3 und umgekehrt, wurde aus Versehen die falsche Schraube beim Offset-Kalibrieren gedreht. Dadurch wurde die Verstärkung (Steigung) geändert. Das hatte zur Folge, dass die Wegaufnehmer 1 bis 3 neu kalibriert werden mussten. Abbildung 9-20 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs.



Nach wie vor kann festgestellt werden, dass wieder das Ergebnis des Probenplatzes 3 eine Abweichung gegenüber den beiden Vergleichsproben 1 und 2 hat. Daraus kann gefolgert werden, dass die Abweichung der Ergebnisse nicht an der Drahtprobe liegt, sondern der Fehler an Probenplatz 3 liegen muss.

**Zu 2:**

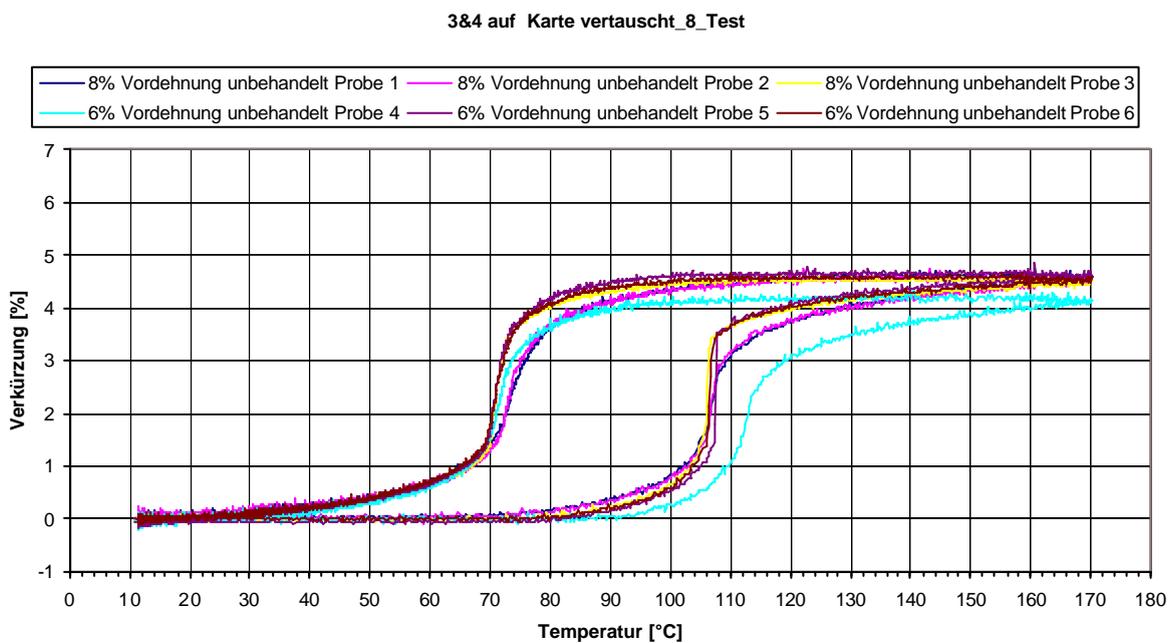
Die Rolle wurde nachgeschliffen, um sicher zu sein, dass keine Verklebung oder erhöhte Reibung des Probenplatzes 3 gegenüber den anderen Probenplätzen vorliegt. Abbildung 9-21 zeigt die Ergebnisse nach dem Einbau der überarbeiteten Rolle. Aus diesem mittlerweile 7. Versuch wird entnommen, dass an Probenplatz 3 kein mechanischer Fehler vorliegt: trotz Verringerung des mechanischen Widerstandes ist die Abweichung eher noch größer geworden.



**Abb. 9-21 Rolle der 3. Probe geschliffen 7. Versuch**

**Zu 3:**

Zur Messkartenprüfung wurden die Pins von Probenplatz 3 und 4 miteinander getauscht. Da auf Platz 4 eine Probe mit 6 % Vordehnung eingebaut ist und auf Platz 3 eine Probe mit 8 % Vordehnung, sollte der Unterschied bei defekter Messkarte sehr deutlich zu sein.

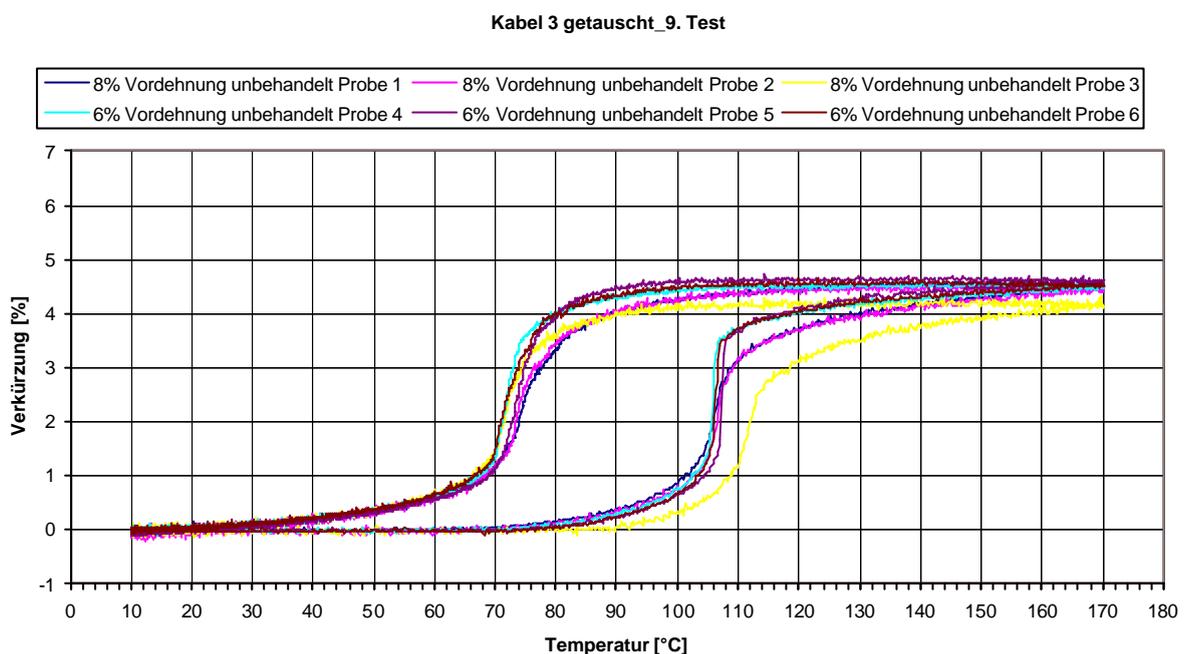


**Abb. 9-22 3. und 4. Probe auf Messkarte vertauscht 8. Versuch**

Das Ergebnis in Abbildung 9-22 zeigt, dass genau die gleichen Kurven wie in Abbildung 9-21 aufgezeichnet werden. Aufgrund des Messkartentausches ist jedoch die Zuordnung (Farbe der Kurven) von Probe 3 und 4 ebenfalls vertauscht. Daher kann die Messkarte als Problemquelle ausgeschlossen werden.

**Zu 4:**

Der Austausch des Kabels vom Wegaufnehmer zur Messkarte beim Messplatz 3 wird im Abbildung 9-23 aufgezeichnet.

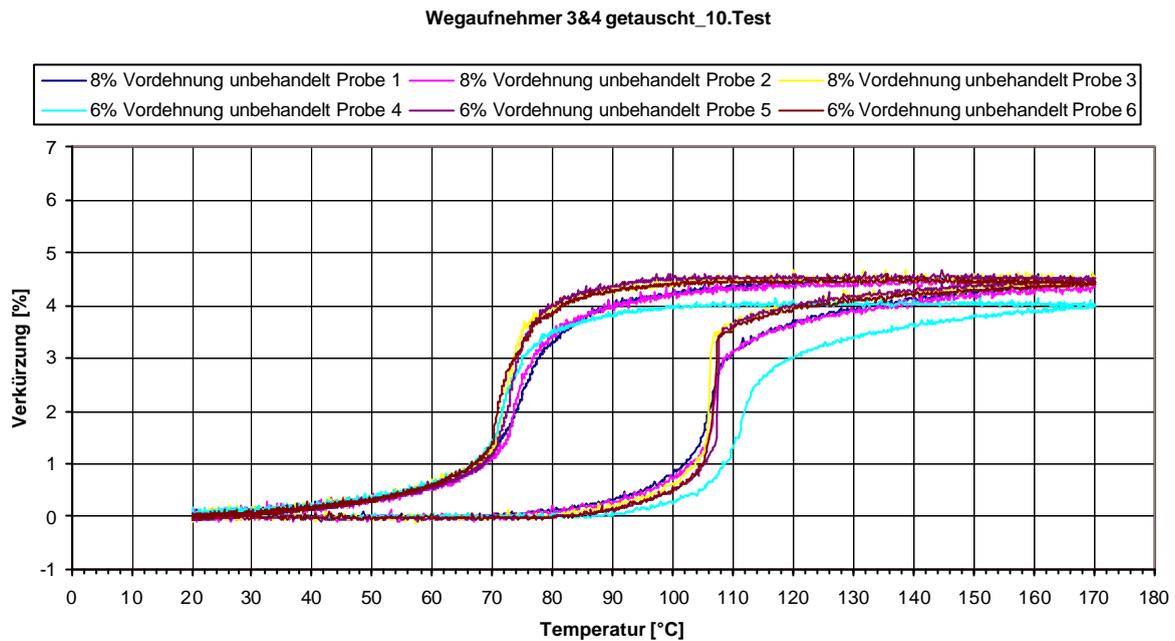


**Abb. 9-23 Kabel der 3. Probe vertauscht 9. Versuch**

Das Ergebnis ist mit den Kurvenverläufen in Abbildung 9-21 übereinstimmend und es zeigt sich wieder die deutliche Abweichung bei Probe 3. Dies zeigt, dass das Kabel an Probenplatz 3 in Ordnung ist.

**Zu 5:**

Abbildung 9-24 zeigt die Ergebnisse des 10. Versuches, bei dem die Wegaufnehmer vom Probenplatz 3 und 4 miteinander getauscht wurden.



**Abb. 9-24 Wegaufnehmer der 3. und 4. Probe vertauscht 10. Versuch**

Es ist eindeutig zu erkennen, dass nun eine Abweichung der Ergebnisse an Probeplatz 4 vorliegt. D.h., dass der Wegaufnehmer von Probeplatz 3 einen Defekt haben muss: In den vorherigen Versuchen zeigte er immer am Probenplatz 3 eine Abweichung. Bei Einbau auf Platz 4 liegt nun plötzlich eine Abweichung der Ergebnisse von Probe 4 vor.

Daraus folgte, dass dieser Wegaufnehmer zu ersetzen sei. (Aufgrund dieses Ergebnisses erübrigt sich natürlich Schritt 6 und 7). Alle Wegaufnehmer wurden unter die Lupe genommen und nachgemessen. Der Geberkern aller Wegaufnehmer befindet sich innerhalb des vorgeschriebenen Bereichs von 5mm von der Mitte.

Nach dem Einbau und der Kalibrierung des neuen Wegaufnehmers wurden drei weitere Versuche durchgeführt, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. In Abbildung 9-25, dem ersten dieser drei Kontrollversuche, zeigt der dritte Probeplatz (gelbe Kurve) immer noch eine kleine Abweichung, aber eine deutliche Verbesserung zu den vorherigen Versuchen. In den anderen beiden Versuchen war die Abweichung noch kleiner.

1.Test\_Wegaufnehmer 3 eingebaut

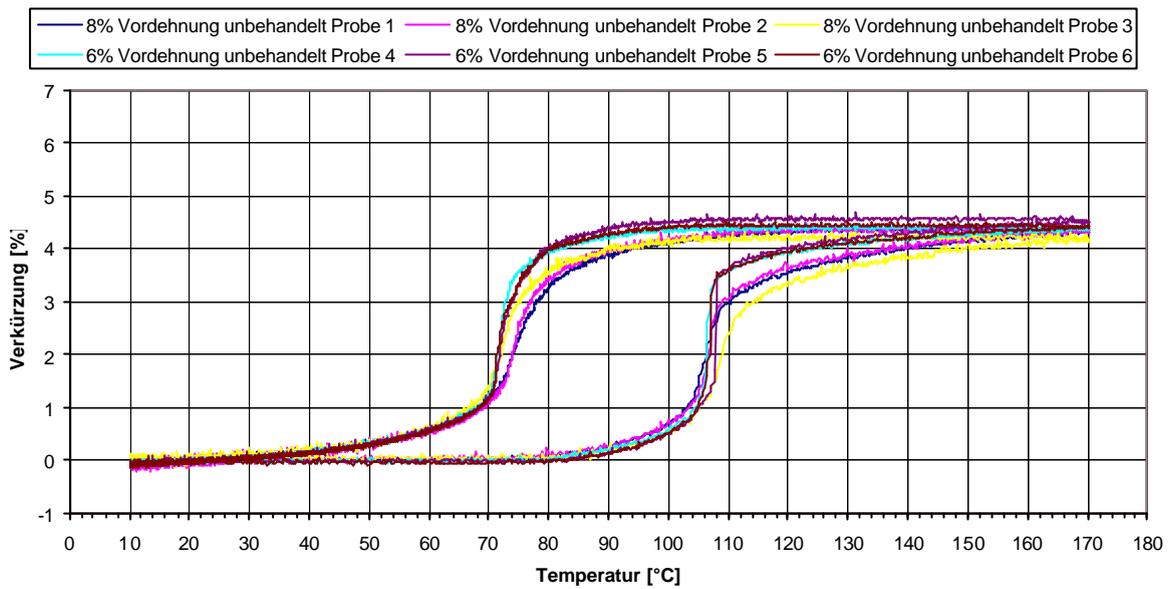


Abb. 9-25 1.Test mit dem neuen Wegaufnehmer

Nachdem durch den Austausch des Wegaufnehmers der Fehler an Probenplatz drei beseitigt wurde, galt das Ziel, die nicht erklärbare kleine Stufe zu überprüfen. Die nachfolgenden Abbildungen 9-26 und 9-27 zeigen zwar sehr ähnliche Ergebnisse, aber in Abbildung 9-26 (roter Kreis) wird bei ca. 144°C diese schnelle „stufenartige“ Verkürzung festgestellt (bei 6 neu eingebauten unbehandelten Drähte).

2.Test\_0% Vordehnung\_6 neue Drähte

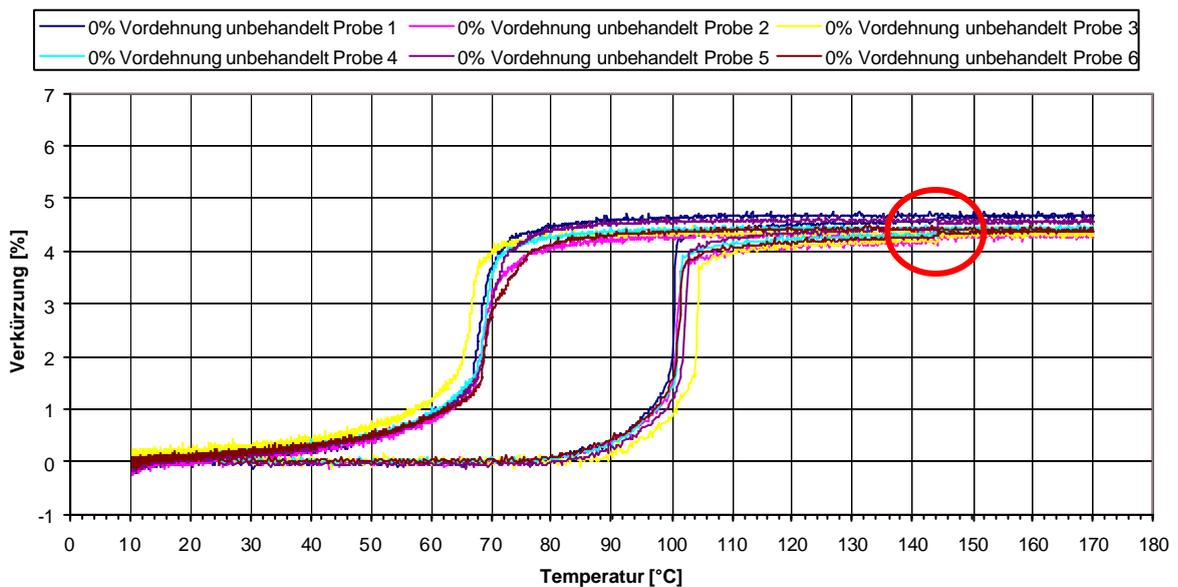
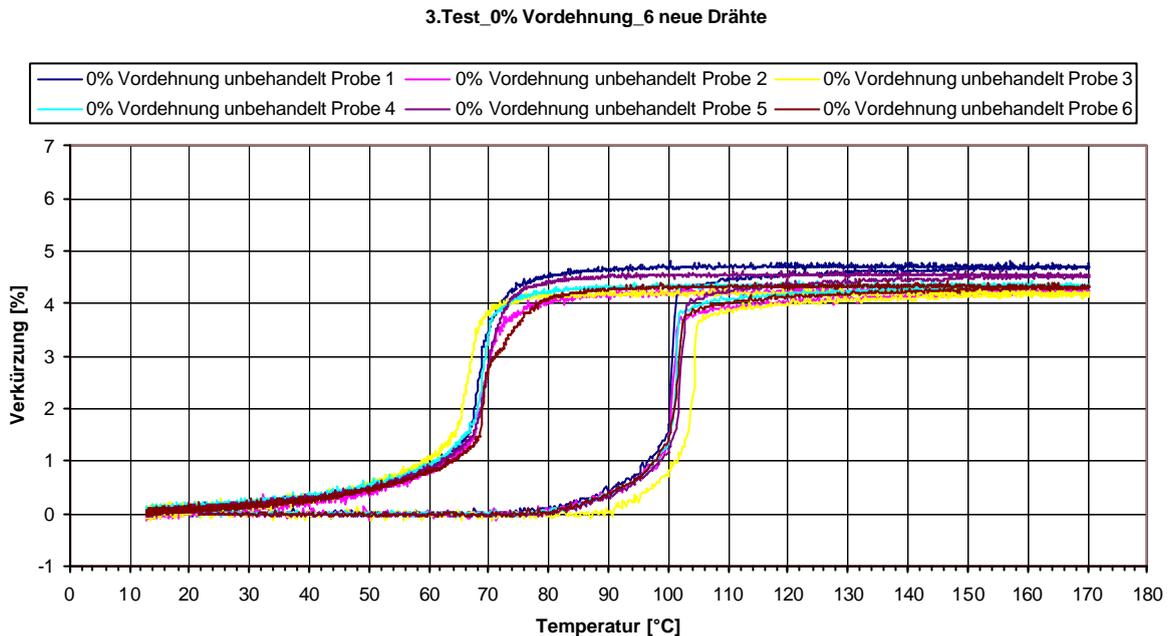


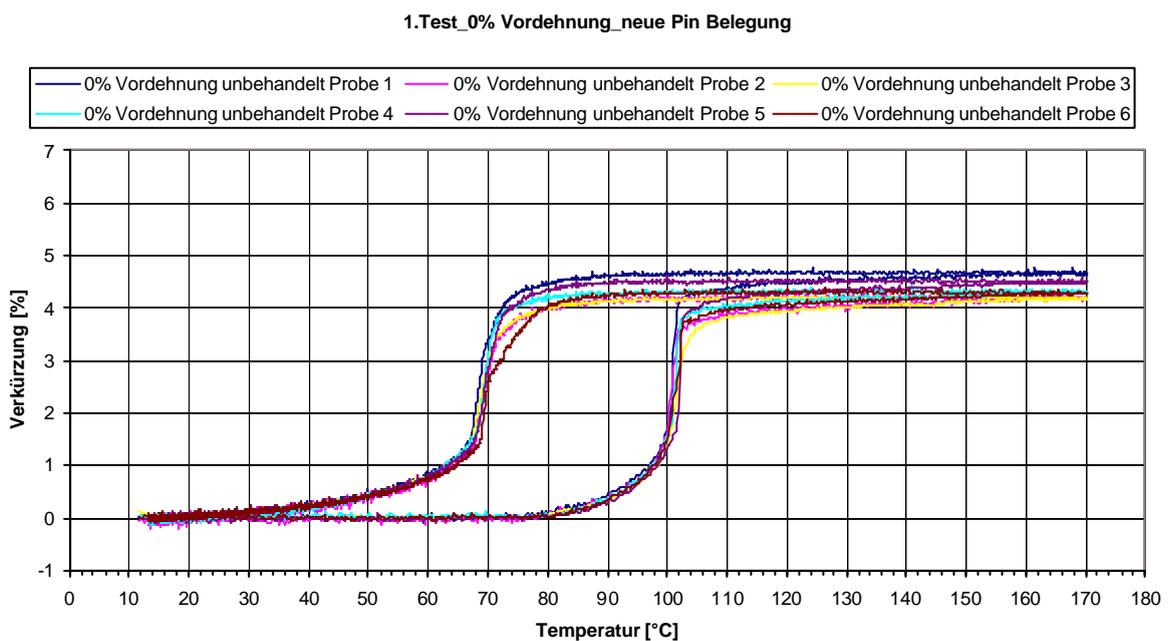
Abb. 9-26 2.Test mit unbehandelten neuen Drähten

Bei mehrmaligem Wiederholen des Tests trat diese kleine Stufe jedoch nicht mehr auf (Abbildung 9-27).



**Abb. 9-27 3.Test mit unbehandelten neuen Drähten**

Dieses Verhalten führte zur Vermutung, dass bei der Pinbelegung ein zusätzlicher Fehler vorliegt. Deshalb wurde auch Schritt 7 umgesetzt. Die Pinbelegung von Probeplatz 3 auf der Messkarte wurde neu belegt. In weiteren sechs Versuchen wurde der Versuchsstand getestet. Alle sechs Versuche zeigten weder Stufen noch Abweichungen bzgl. Probenplatz 3 (Abbildung 9-28).



**Abb. 9-28 1.Test mit neuer Pin-Belegung**

Mit dem nun verbesserten Versuchsstand wurden jetzt die Versuche zum Einfluss der Vordehnung durchgeführt. Im folgenden Versuch wurden je zwei Drahtproben mit 0, 6 und 8% Vordehnung untersucht. Ohne Drahtausspannung wurden 10 Zyklen nacheinander gefahren. Die Ergebnisse der Stelltemperaturen sind in Tabelle 9-1 dargestellt. Durch die Vordehnung wird die Austenit-Peak-Temperatur ( $A_{peak}$ ) erhöht, d.h. eine Probe mit Vordehnung von 8% hat eine höhere  $A_{peak}$  Temperatur als bei 6%.

	0%	6%	8%
Test 1	102,2	133,3	147,5
Test 2	102,2	110,8	115,0
Test 3	102,2	109,0	111,3
Test 4	102,2	108,8	110,6
Test 5	102,2	107,4	109,0
Test 6	102,2	108,0	110,4
Test 7	102,2	107,0	107,9
Test 8	102,2	106,4	107,2
Test 9	102,2	106,5	106,8
Test 10	102,2	107,2	106,8

Tab. 9-1  $A_{peak}$  Temperaturen der verschiedenen Drähte in °C

Im Abbildung 9-29 sind diese  $A_{peak}$ -Temperaturen über die 0, 6 und 8% Dehnungen aufgetragen. Die Steigung ist ein Maß, um wieviel °C die Stelltemperatur  $A_{peak}$  bei einer bestimmten Dehnung erhöht wird.

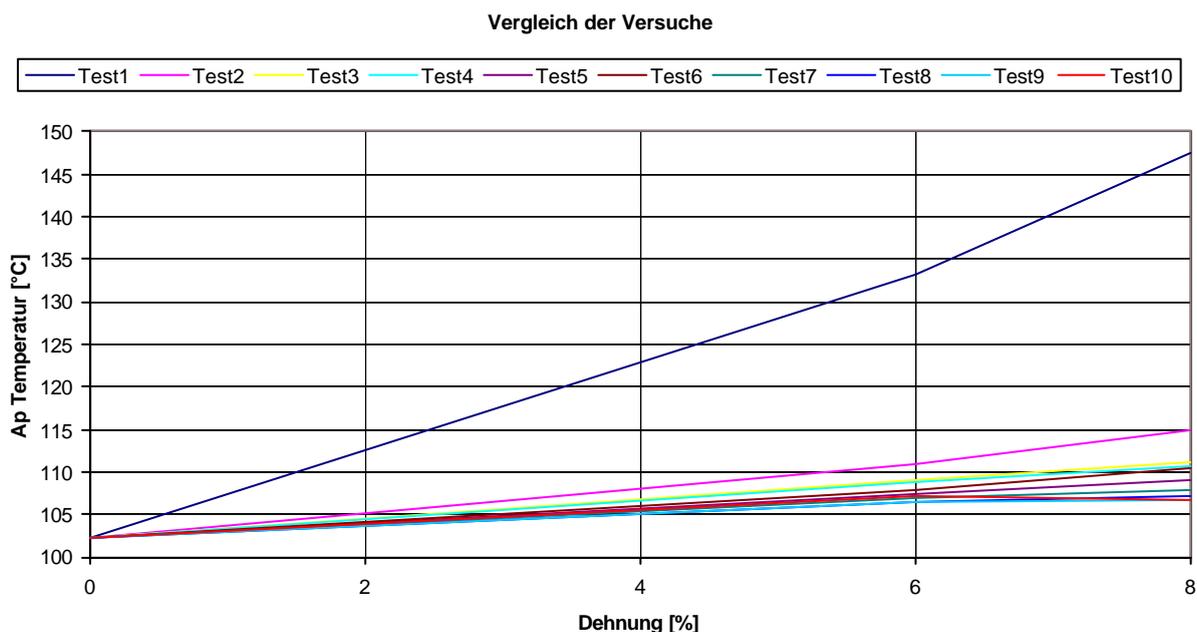


Abb. 9-29 Darstellung der  $A_{peak}$  Temperaturen über der Dehnung

Zur Beantwortung der Frage, wie die Erhöhung der Stelltemperatur durch eine Vordehnung zustande kommt, wurde folgender Hintergrund betrachtet:

Da sich das Volumen beim Vordehnen nicht ändert, verringert sich zwangsläufig der Drahtquerschnitt. Durch die Verringerung des Drahtquerschnittes erhöht sich die Vorspannung bei gleichbleibendem Gewicht ( $697\text{g}$  entspricht  $135\text{N/mm}^2$ ). Der Drahtquerschnitt verringert sich direkt proportional zu der Vordehnung ( $l_1 \times A_1 = l_2 \times A_2$ ). Dies wurde in den vorangegangenen Versuchen nicht berücksichtigt. In den nachstehenden Berechnungen wird dies gezeigt und durch weitere Versuche an unbehandelten Proben mit höherer Vorspannung (6 und 8% und weitere) untersucht.

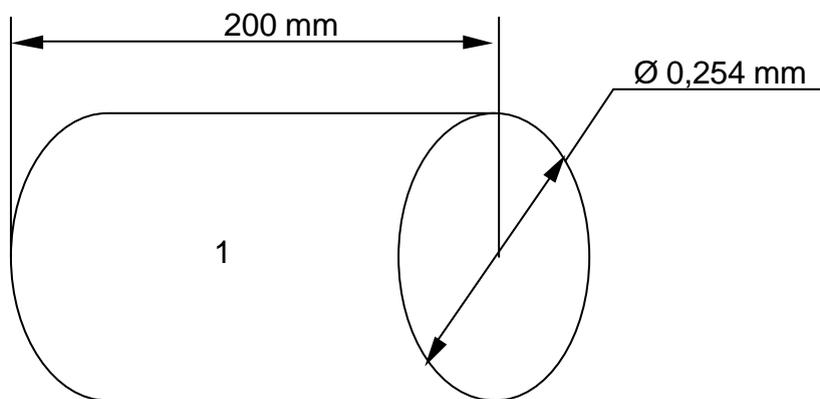


Abb. 9-30 FG-Draht bei 0% Vordehnung

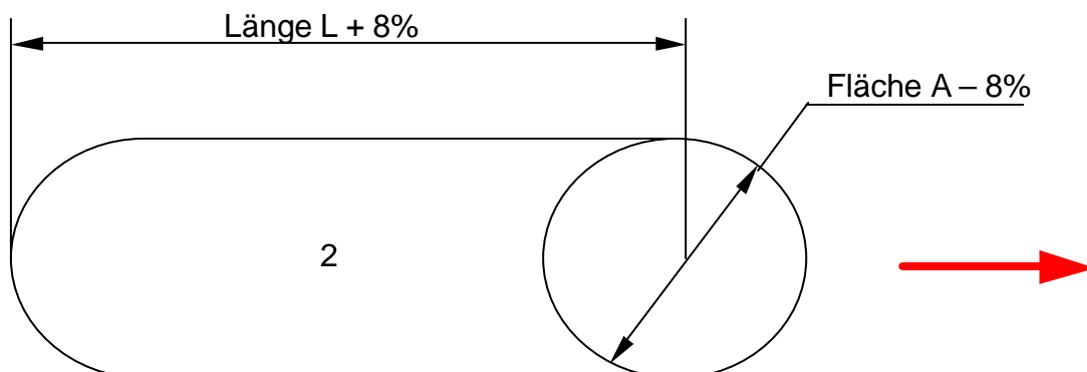


Abb. 9-31 FG-Draht bei 8% Vordehnung

$$V_1 = V_2 = \text{Konstant}$$

$$l_1 \times A_1 = l_2 \times A_2$$

$$A_2 = A_1 \times \frac{l_1}{l_2}$$

$$\text{Aber : } A_{\text{Quer}} = \frac{p \times d^2}{4}$$

$$A_2 = \frac{p \times 0,254^2}{4} \times \frac{200}{216}$$

$$A_2 = 0,0469 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow d_2 = 0,244 \text{ mm}$$

Weiterhin gilt:

$$F = m \times g$$

$$F = 0,697 \times 9,81 = 6,838 \text{ N}$$

$$s = \frac{F}{A}$$

$$\Rightarrow s_2 = \frac{6,838 \text{ N}}{0,0469 \text{ mm}^2} = 145,7 \text{ N / mm}^2$$

Die Vorspannung wird durch die 8% Vordehnung bei Anhängen des gleichen Gewichts um mehr als 10N/mm<sup>2</sup> erhöht. Bei 6% Vordehnung resultiert eine Vorspannung von 143N/mm<sup>2</sup>, was eine Erhöhung von 8N/mm<sup>2</sup> bedeutet.

### **Vergleich: Vordehnung und Spannungserhöhung**

In weiteren Versuchen soll nun untersucht werden, welchen Einfluss die reine Spannungserhöhung auf die Draht-Umwandlungstemperatur hat, indem bei unbehandelten, nicht vorgedehnten Drahtproben das angehängte Gewicht stufenweise erhöht wird. Dadurch soll gezeigt werden, ob die Temperaturerhöhung von  $A_p$  in vorgedehnten Drähten stärker ausfällt, als die Temperaturerhöhung von  $A_p$ , die durch Auflegen von Zusatzgewichten und die damit eingebrachte Spannungserhöhung erfolgt.

Die zusätzlichen Gewichte wurden wie folgt berechnet:

Das für 8% Vordehnung entsprechende Gewicht:

$$s_{8\%} = 145,7 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$s = \frac{F}{A}$$

$$F = \frac{145,7 \times 4}{p \times 0,254^2} = 7,38 \text{ N}$$

$$F = m \times g$$

$$m_{8\%} = \frac{7,38 \text{ N}}{9,81} = 752,57 \text{ g}$$

$$m_{\text{Ölbad}} = \frac{752,57 \text{ g} + 39,778 \text{ g}}{0,8213} = 964,75 \text{ g} \quad [39]$$

Das Gewicht mit Reibung abzüglich der Gewichte der Aufnahme für den Bowdenzug und der Geberstange, ergibt die tatsächliche Masse für die Gewichte.

$$m_{\text{Bowdenzug}} = 13,0 \text{ g}$$

$$m_{\text{Stange}} = 7,9 \text{ g}$$

$$\Rightarrow m_{8\%} = m_{\text{Ölbad}} - m_{\text{Bowdenzug}} - m_{\text{Stange}} = 67,25 \text{ g}$$

Das für die 6% Vordehnung entsprechende Gewicht:

$$s_{6\%} = 143 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$s = \frac{F}{A}$$

$$F = \frac{143 \times 4}{p \times 0,254^2} = 7,24 \text{ N}$$

$$F = m \times g$$

$$m_{6\%} = \frac{7,24 \text{ N}}{9,81} = 738,63 \text{ g}$$

$$m_{\text{Ölbad}} = \frac{738,63 \text{ g} + 39,778 \text{ g}}{0,8213} = 947,7 \text{ g}$$

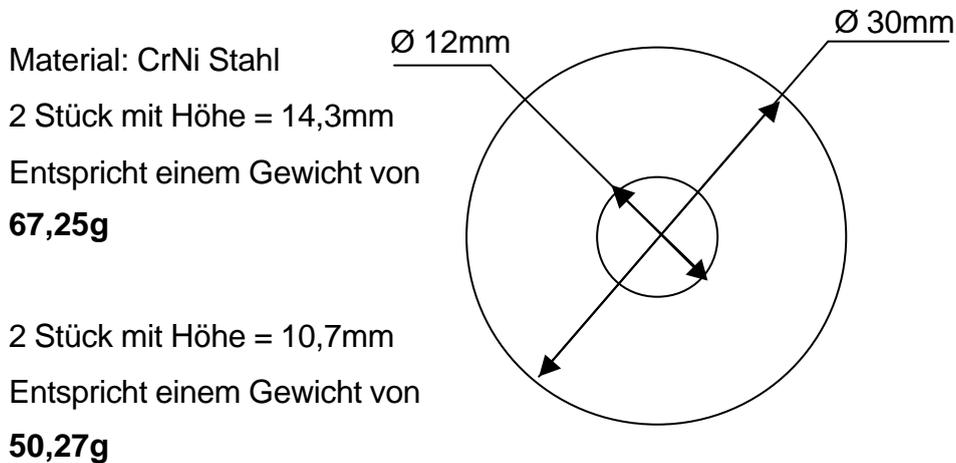
$$m_{\text{Bowdenzug}} = 13,0 \text{ g}$$

$$m_{\text{Stange}} = 7,9 \text{ g}$$

$$\Rightarrow m_{6\%} = m_{\text{Ölbad}} - m_{\text{Bowdenzug}} - m_{\text{Stange}} = 50,27 \text{ g}$$

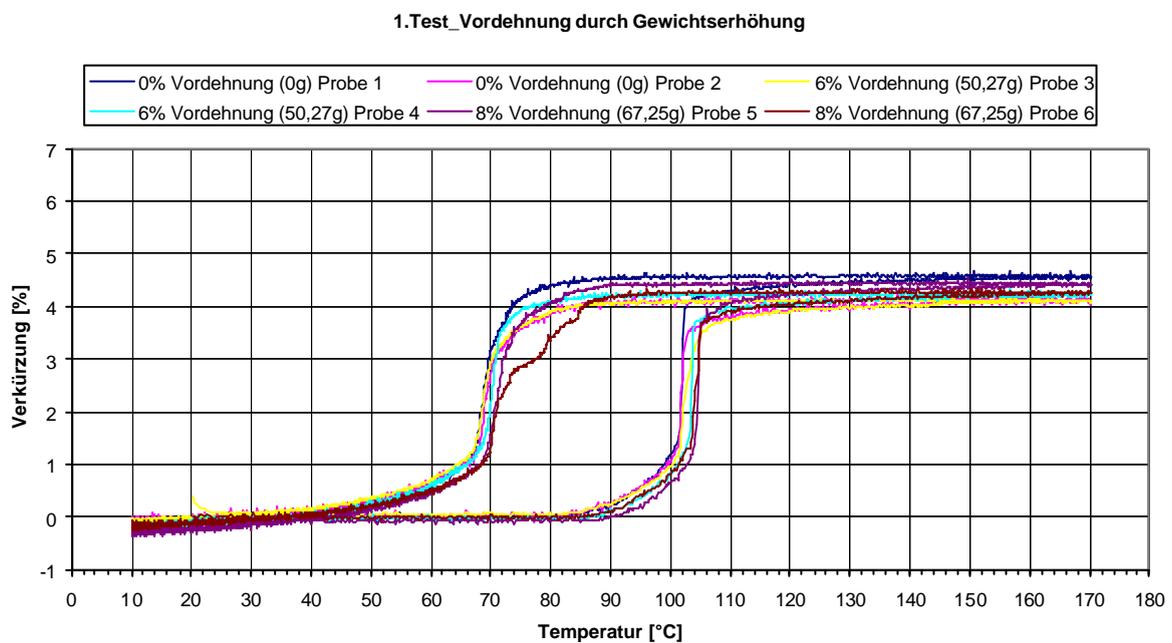
Für eine Vordehnung von 8% benötigt es ein zusätzliches Gewicht von 67,25g und bei 6% ein zusätzliches Gewicht von 50,27g.

Die Zusatzgewichte wurden in der hochschuleigenen Metallwerkstatt gefertigt.



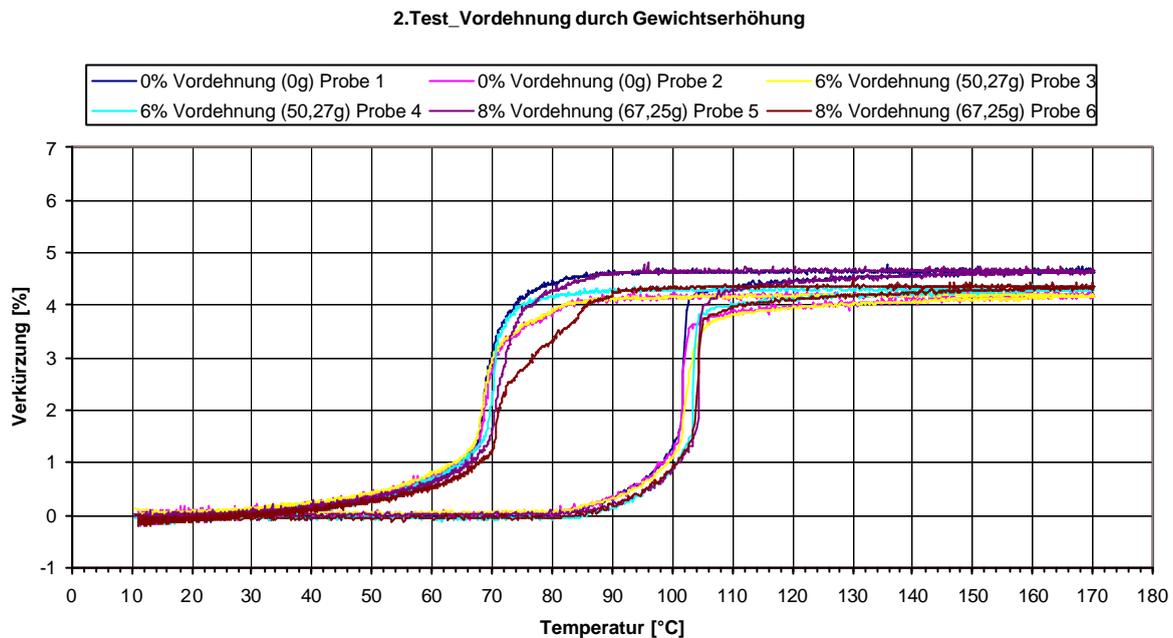
**Abb. 9-32 Gewicht-Anfertigung für Vorspannungs-Untersuchung**

Zwei Versuche wurden gemacht, um die Auswirkung der Gewichtserhöhung darzustellen.



**Abb. 9-33 1.Test mit Gewichtserhöhung**

Vergleicht man die Ergebnisse in Abbildungen 9-33 und 9-34 mit den vorherigen Versuchen an vordehnten Proben ohne zusätzliche Gewichte, dann können kaum Unterschiede bemerkt werden. D.h. eine Bewertung des Einflusses der Vorspannung auf die Ergebnisse kann hier nicht vorgenommen werden.



**Abb. 9-34 2.Test mit Gewichtserhöhung**

### Prüfung der Temperaturverhältnisse am Gesamtsystem

Aufgrund der starken Streuung der bisher ermittelten Messergebnisse an Drahtproben im Ölbad-Prüfstand wurde untersucht, ob möglicherweise eine ungleiche Temperaturverteilung im Wasserbad der Grund hierfür sein könnte.

Hierzu wurden im Abstand von jeweils 10°C Thermographie Bilder von der Ölbad-Oberfläche aufgenommen, beginnend bei 10°C bis zu 170°C. Die ganze Ölbadfläche konnte nicht fotografiert werden, da das Item Profil in der Mitte des Ölbad verläuft. Um aber bei der Thermographiemessung möglichst die gleichen Verhältnisse zu haben, wie bei den Versuchsbedingungen beim Ölbadversuch, wurde die Halterung mit den Itemprofilen bewusst im Bad gelassen.

In der Mitte von Abbildungen 9-35 sieht man dies genau. In den Abbildungen wurden zwei Bereiche (X01 und X02) dargestellt. Oben links im Bild sieht man die beiden Anschlüsse der aktiven Kühlung. Die Messwerte für jeden Bereich wurden als

Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Es stellte sich heraus, dass ein maximaler Temperaturunterschied zwischen den Bereichen X01 und X02 von  $4,4^{\circ}\text{C}$  auftritt und zwar bei  $160^{\circ}\text{C}$ . Die maximale Abweichung von der tatsächlichen Temperatur am Thermostaten (Anzeige) liegt bei  $4,2^{\circ}\text{C}$ , ebenfalls bei  $160^{\circ}\text{C}$ . In den nachstehenden Abbildungen sind die gemessenen Temperatur-Bilder dargestellt:

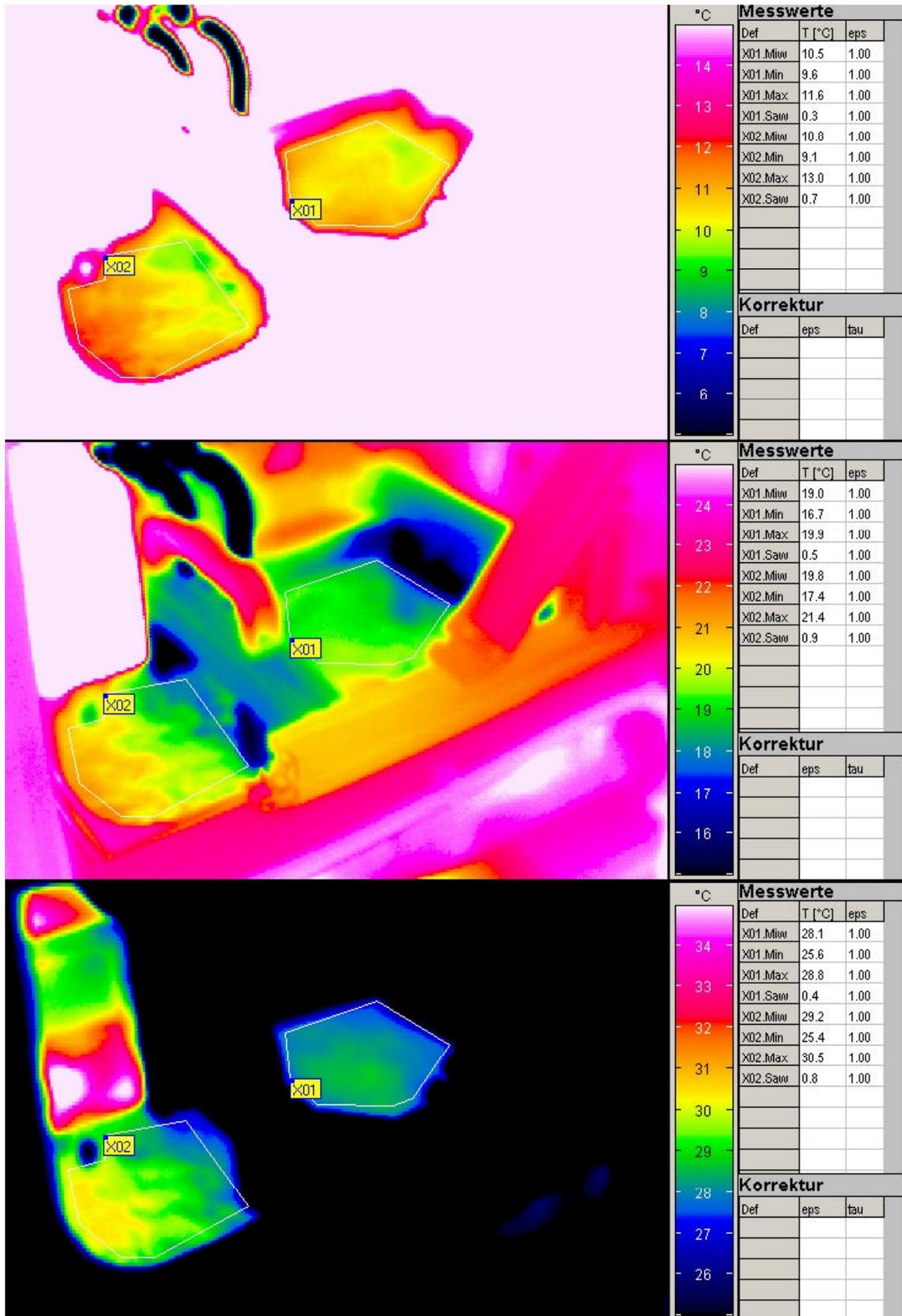


Abb. 9-35 oben 10°C, Mitte 20°C, unten 30°C

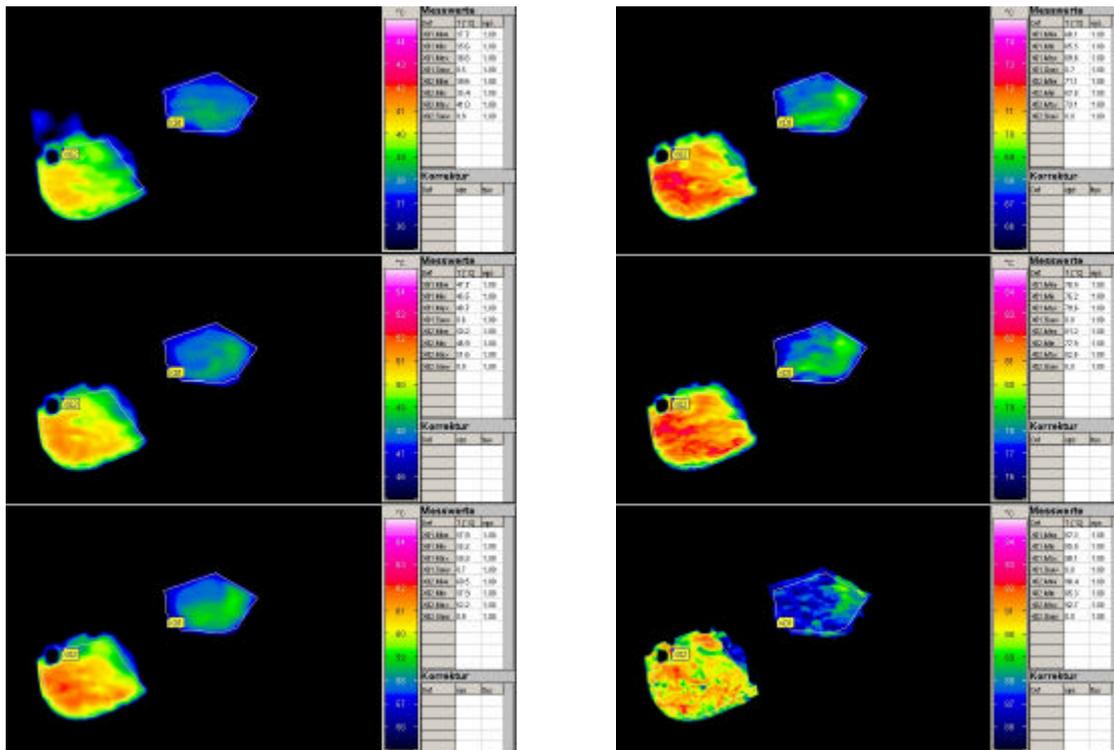


Abb. 9-36 links: 40°C, 50°C, 60°C; rechts: 70°C, 80°C, 90°C

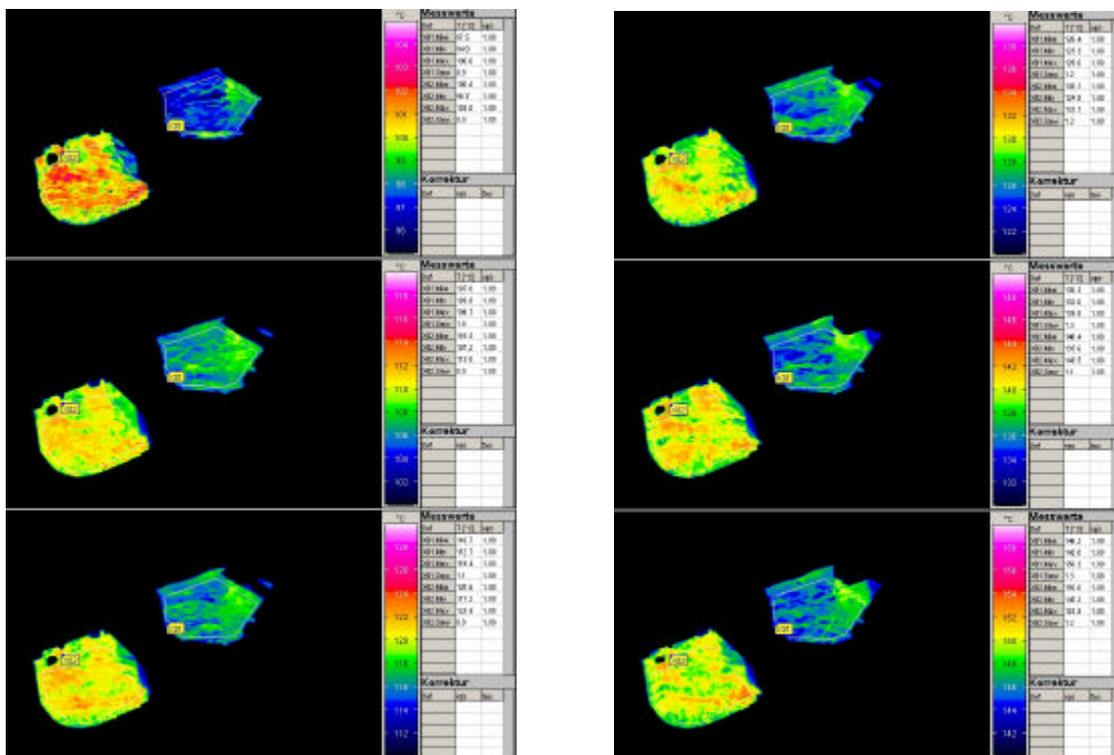


Abb. 9-37 links: 100°C, 110°C, 120°C; rechts: 130°C, 140°C, 150°C

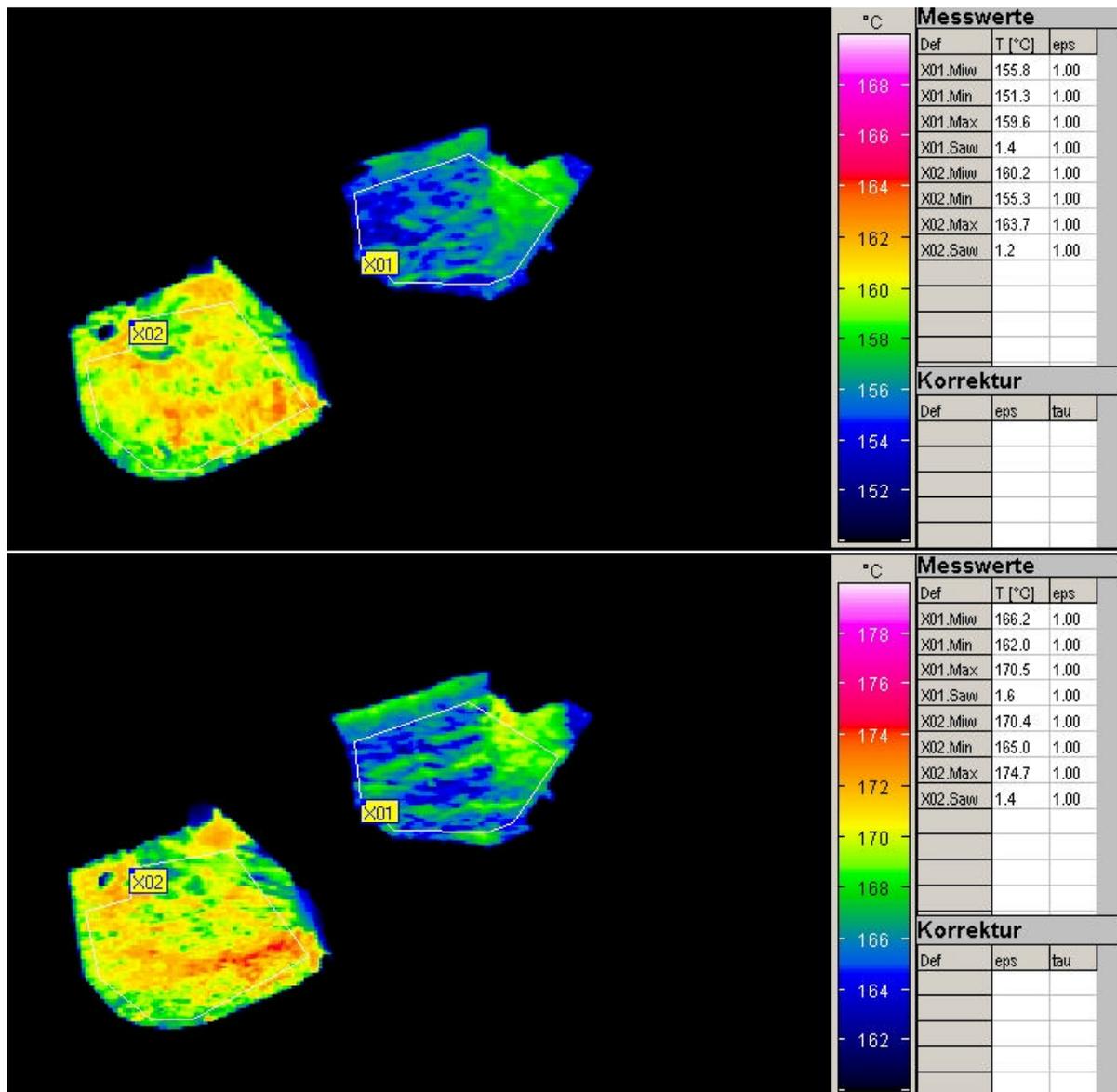


Abb. 9-38 oben: 160°C, unten: 170°C

Da die Thermographiebilder über die Strahlungswärme ermittelt werden und demnach nur die Temperatur an der Ölbad-Oberfläche wiedergeben, wurden weitere Temperaturmessungen durchgeführt. Diese erfolgten nicht nur an der Ölbad-Oberfläche und innerhalb des Ölbad in verschiedenen Tiefen, sondern auch an den Wegaufnehmern und an der Außenwand der Ölbadwanne.

Die Wegaufnehmer wurden alle 10°C an ihren Außenflächen mit einem Laser-Temperatur-Messgerät gemessen. Die Temperaturen an den Wegaufnehmern variierten zwischen 24 und 26°C. Deshalb kann eine Temperatur-Übertragung von

dem Ölbad zu den Wegaufnehmern über die Bowdenzüge und damit eine Beeinflussung des Messwertes durch eine unterschiedliche Temperatur der Wegaufnehmer ausgeschlossen werden.

Die Ölbad-Außenwände (besonders auch zur Wegaufnehmerseite hin) wurde ebenfalls mit dem Laser-Temperatur-Messgerät während des gesamten Versuches überprüft und stieg selbst bei 170°C im Ölbad nur auf 37°C. Dadurch kann eine Beeinflussung der Proben (und auch der Wegaufnehmer) durch Abstrahlung der Ölbad-Wanne so gut wie ausgeschlossen werden.

Durch Quecksilber-Thermometer wurden an fünf verschiedenen Stellen die Ölbadtemperatur gemessen, auch jeweils in 10°C-Abständen beim Hochheizen des Ölbadetes von 10°C bis 170°C. In der nachstehenden Skizze (Abbildung 9-39) sind die Messstellen zu sehen.

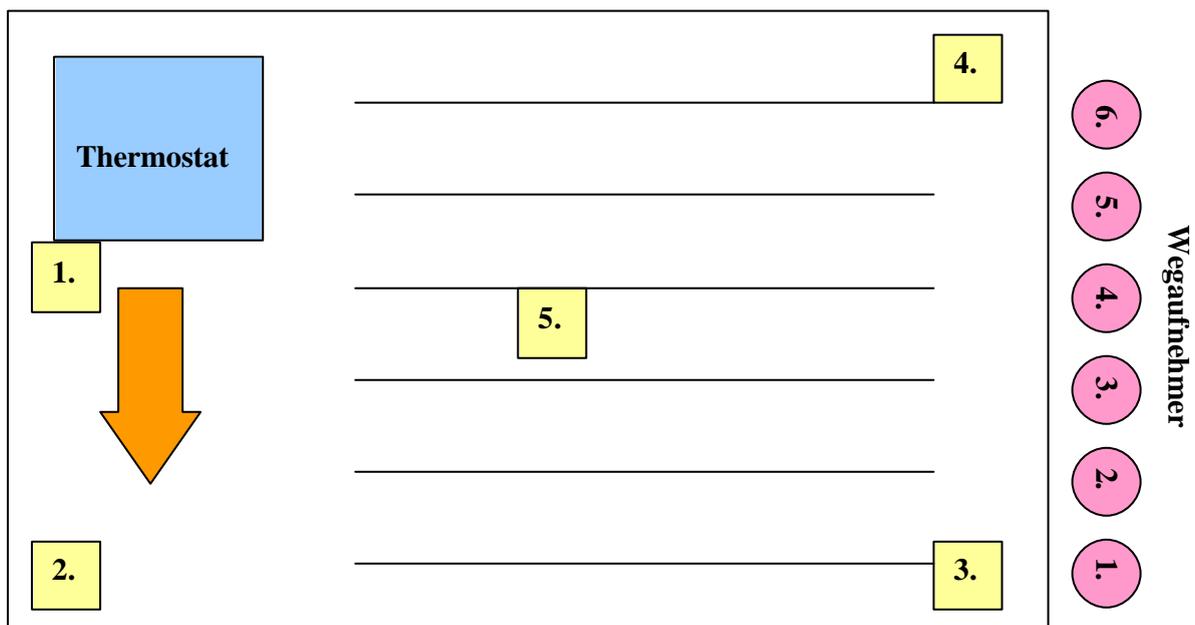
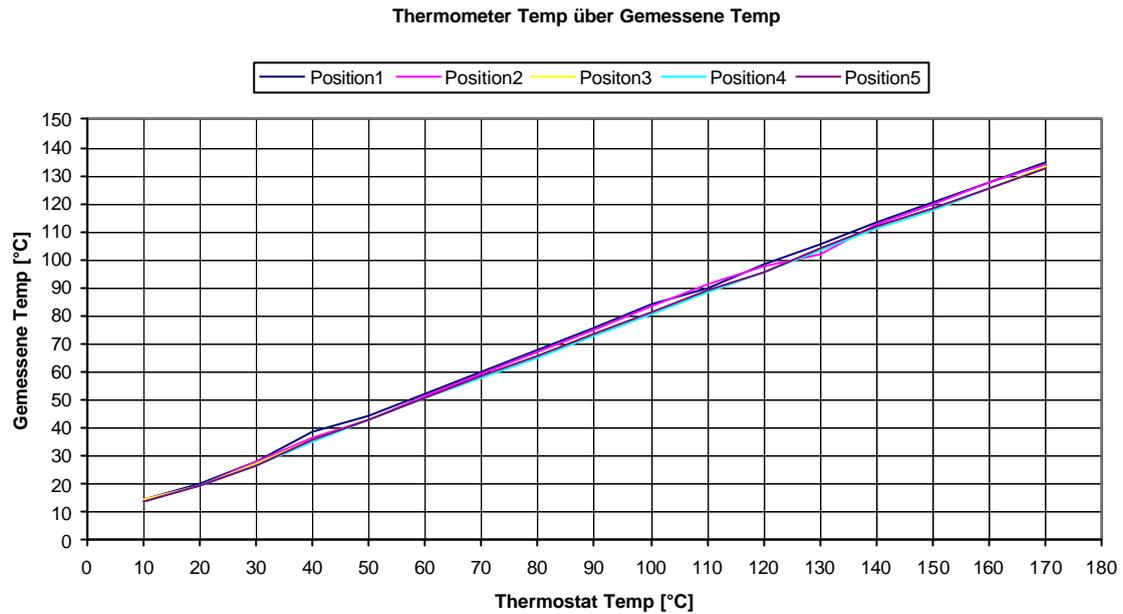


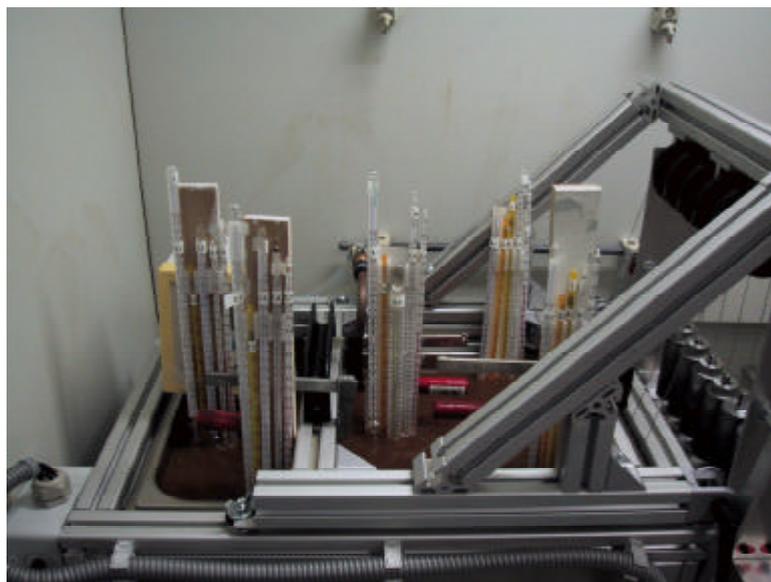
Abb. 9-39 Ölbad-Prüfstand mit den Temperatur-Messstellen

In Abbildung 9-40 werden die gemessenen Temperaturwerte über den angezeigten Thermostat-Werten dargestellt.



**Abb. 9-40 Gemessene Temperatur über der angezeigten Thermostat-Temperatur**

Es stellte sich heraus, dass die Temperaturunterschiede zwischen den gemessenen Temperaturen und den am Thermostat angezeigten Temperaturen zwar sehr gering waren, jedoch im Vergleich zu den Oberflächentemperaturwerten (Thermographiebilder bzw. Laser-Temperaturmessgerät) sehr groß sind. Es wurde daher beschlossen, weitere Temperatur-Messungen durchzuführen, und zwar an den gleichen Stellen wie in Abbildung 9-39 dargestellt, jedoch auf fünf unterschiedlichen Höhen im Ölbecken. In Abbildung 9-41 sieht man den realen Aufbau.



**Abb. 9-41 Temperatur Messung auf verschiedenen Höhen**

In Abbildung 9-42 sind die 25 Thermometer farblich und nummeriert dargestellt, Abbildung 9-43 zeigt die entsprechenden Höhen.

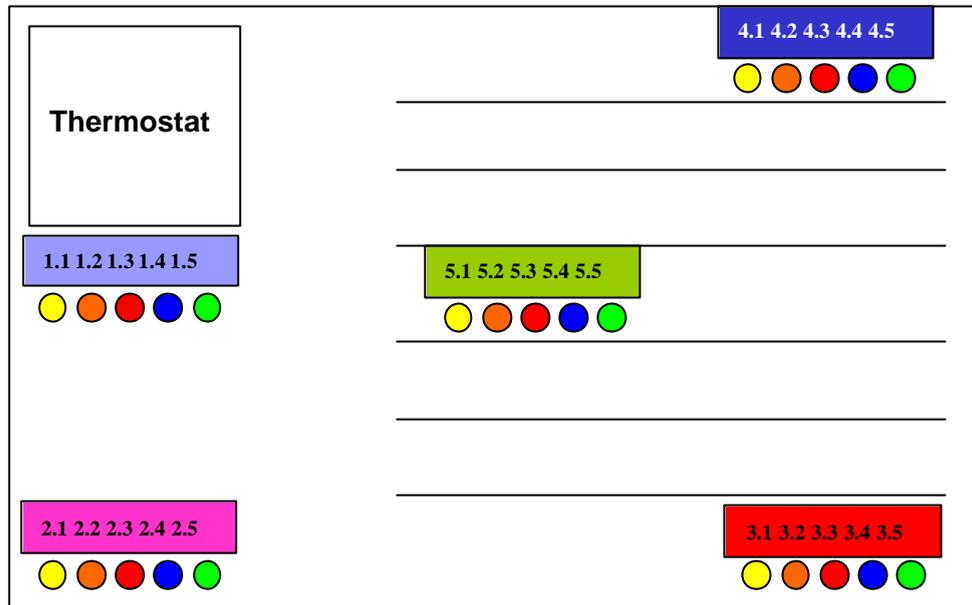


Abb. 9-42 Ölbad mit Thermometern farblich dargestellt

Die FG-Drähte sind auf einer Höhe von 50mm platziert, gemessen von dem Ölwanneboden aus. Einige der Thermometer sind daher auf ähnlicher Höhe wie die FG-Drähte (Abbildung 9-43).

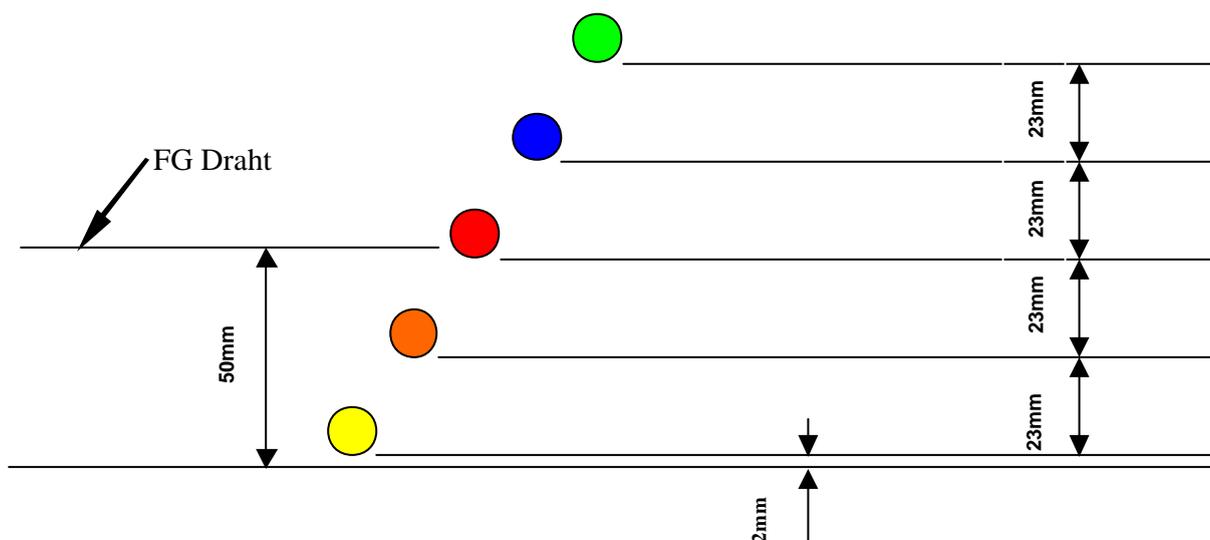
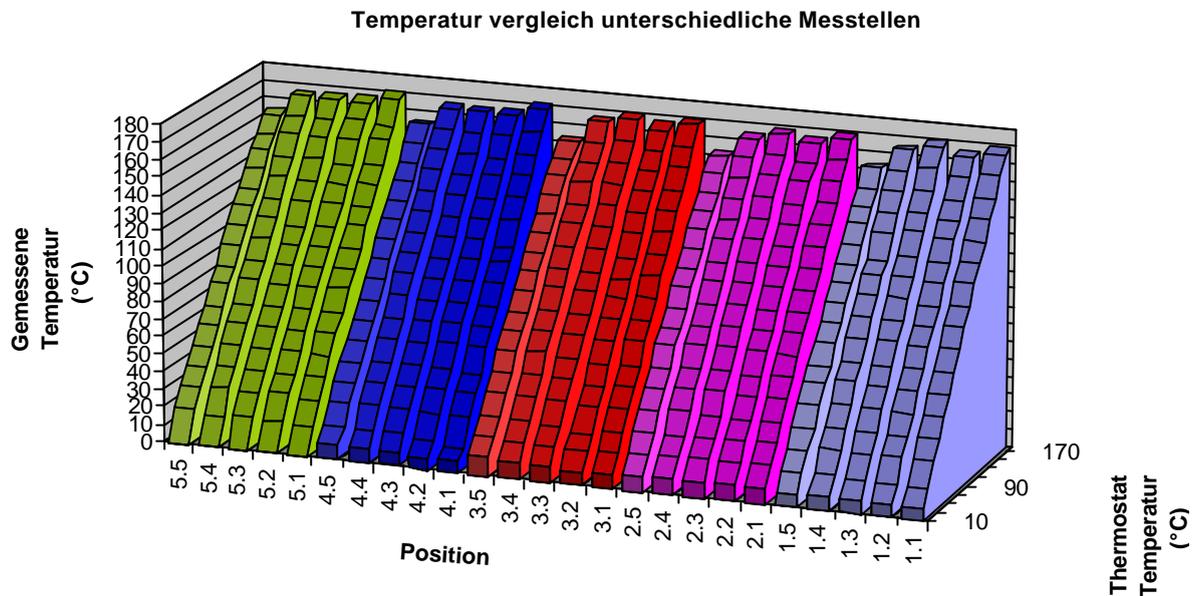


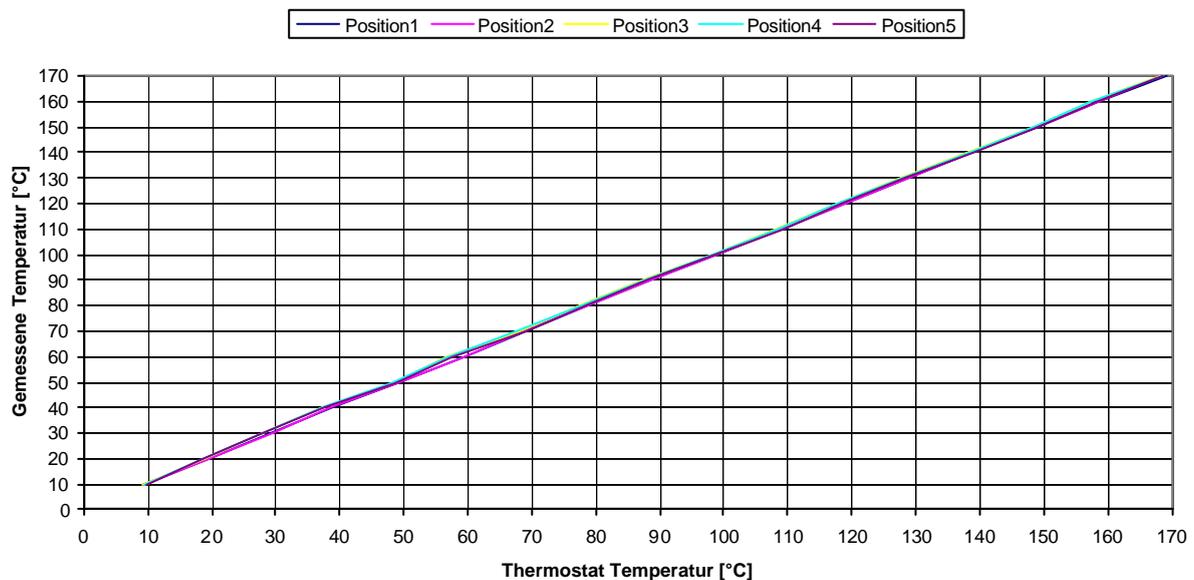
Abb. 9-43 Thermometer-Höhe

In Abbildung 9-44 sind die Ergebnisse der Temperatur-Messungen an den genannten Stellen graphisch dargestellt. Eine kleine Temperatur-Abweichung kann jeweils an der 5. Stelle festgestellt werden, d.h. an den oberen Thermometern. Zwischen den anderen Temperaturen können insgesamt nur sehr geringe Temperaturunterschiede von wenigen °C beobachtet werden.



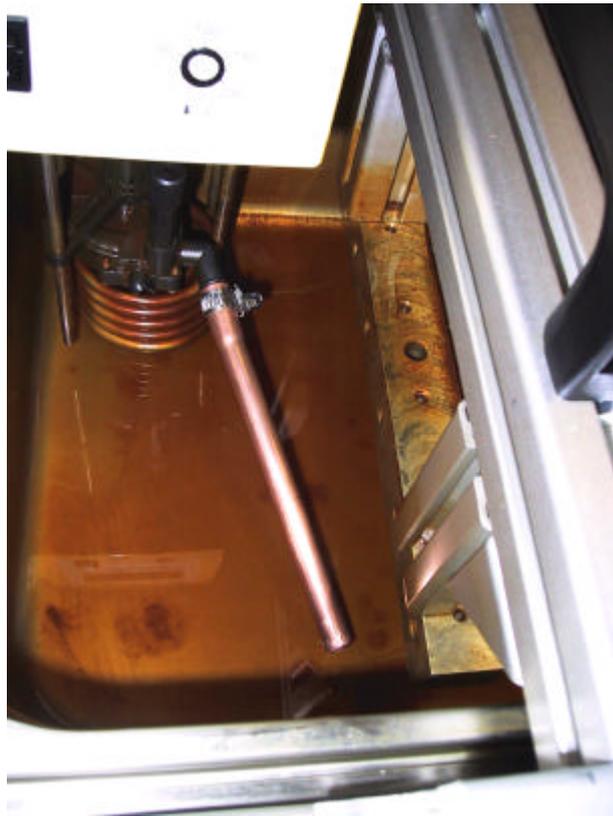
**Abb. 9-44 Temperatur Messungen an 25 Stellen**

Es wurde zusätzlich noch eine Temperatur-Messung auf der gleiche Höhen des FG-Drahtes durchgeführt. In Abbildung 9-45 entspricht die angegebene Thermostat-Temperatur auch der tatsächlichen Temperatur im Ölbad auf Drahhöhe.



**Abb. 9-45 Messungen der Temperatur auf FG-Draht-Höhe**

Als Abschlussbetrachtung zu den durchgeführten Temperaturermittlungen ist festzuhalten: Aufgrund der ermittelten Temperaturen ist der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen im Wasserbad auf die Ergebnisse an den FG-Drähten kleiner als anfänglich befürchtet. Eine Verbesserung im Ölbad soll dennoch angestrebt werden, indem die Badbewegung intensiviert wird. Abbildung 9-46 zeigt ein perforiertes Kupferrohr, um das Strömungsprofil zu verbessern.

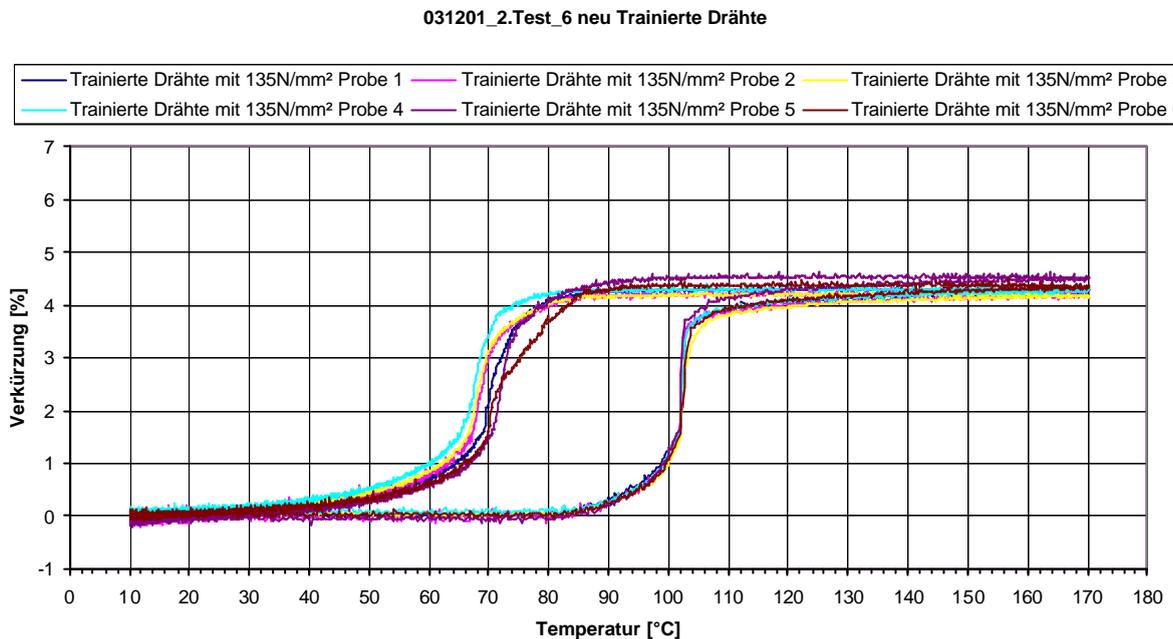


**Abb. 9-46 Intensivierung der Ölbad-Bewegung**

Weitere kleinere Verbesserungen wurden vorgenommen: U.a. wurden die Schläuche der aktiven Kühlung an der Krümmung beim Ein- und Auslauf der Ölwanne durch ein Kupferrohr unterstützt und der aktive Kühlring durch einen Haken festgehalten. Auch wurden die Kühlleitungen thermisch an den Stellen isoliert, wo die Messleitungen bzw. Stromleitungen nahe beieinander geführt sind.

Nach diesen Umbauten und der Prüfung der Temperaturverhältnisse im Ölbad und an den Messaufnehmern wurden nun sechs neue Drähte eingebaut, die zuvor auf die tatsächliche Belastung trainiert wurden (mit  $135\text{N/mm}^2$ ). Auch in dem

Wiederholungsversuch an 6 weiteren neuen, ebenfalls trainierten Drähten (Abbildung 9-47) wurden sehr ähnliche Ergebnisse gewonnen.



**Abb. 9-47 2.Test mit 6 neuen trainierten Drähten**

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Werte bei der Aufheizung, also bei der austenistischen Umwandlung, viel besser übereinstimmen als bei den Versuchen an nicht selbst trainierten Drähten.

Allerdings tritt innerhalb der Abkühlkurven, sprich bei der martensitischen Umwandlung, immer noch eine relativ große Spreizung der Abkühlkurven auf. In einem weiteren Versuch (siehe Abbildung 9-48) ohne aktive Kühlung soll nun noch überprüft werden, ob sich diese Streuung verkleinert, wenn entsprechend langsamer abgekühlt wird.

Diese Streuung hat sich etwas verkleinert, jedoch nicht bedeutend, wie aus Abbildung 9-48 zu entnehmen ist. Da der Zeitaufwand für einen Versuchsdurchlauf am Ölbadprüfstand selbst bei aktiver Kühlung schon viereinhalb Stunden benötigt, wurde anhand der nur minimalen Verbesserung und der Vielzahl an zu untersuchenden Drähten entschieden, die weiteren Versuche in diesem Forschungsprojekt mit aktiver Kühlung durch zu führen.

031202\_3.Test\_6 neue Trainierte Drähte\_ohne aktive Kühlung

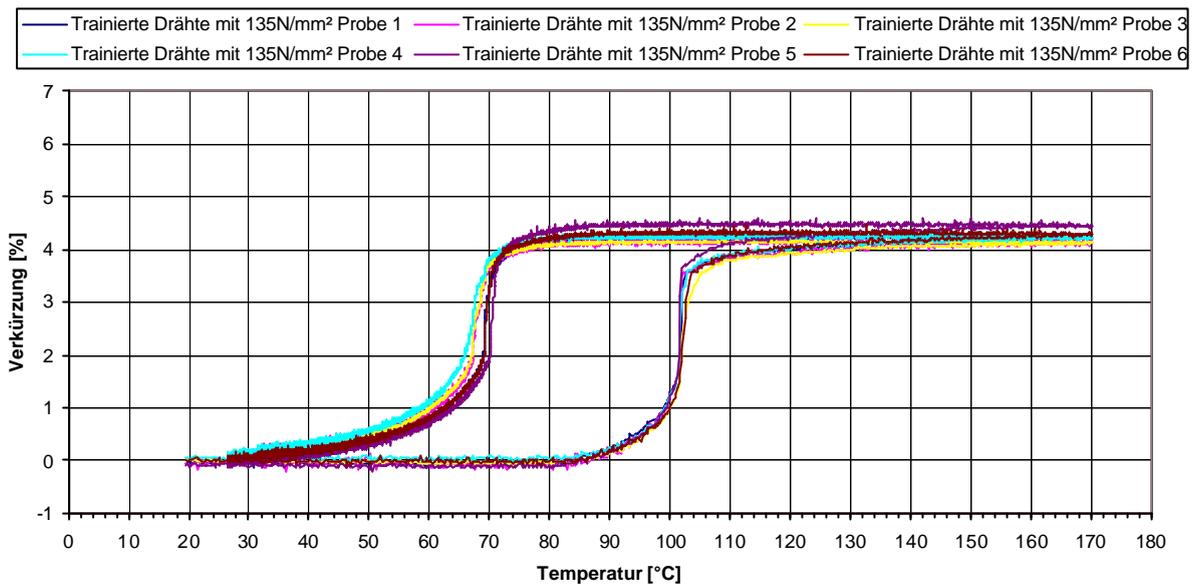


Abb. 9-48 3.Test mit 6 neu trainierten Drähten ohne aktive Kühlung

## 9.2.2 Kontrollversuch mit stark erhöhten Gewichten

Zur Prüfung, ob bei einer Auslagerungstemperatur von 140°C tatsächlich Drähte mit martensitischem Gefüge in der Spannvorrichtung ausgelagert werden, wurden fünf Vergleichversuche im Ölbad durchgeführt, wobei an die Drähte zusätzliche Gewichte (stufenweise bis zu einer Beanspruchung von 550N/mm<sup>2</sup>) gehängt wurden (Abbildung 9-49). Dadurch wird die feste Einspannung der Drähte bei der Auslagerung simuliert.

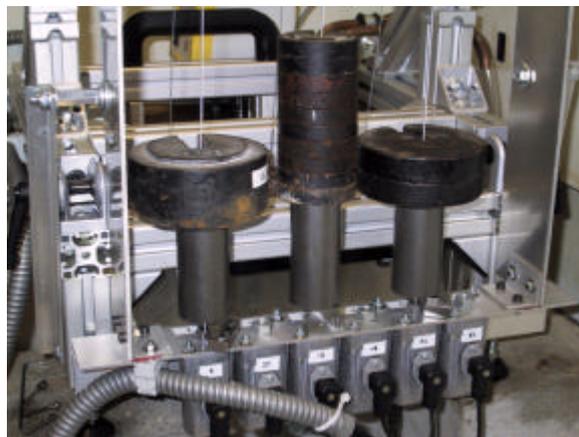
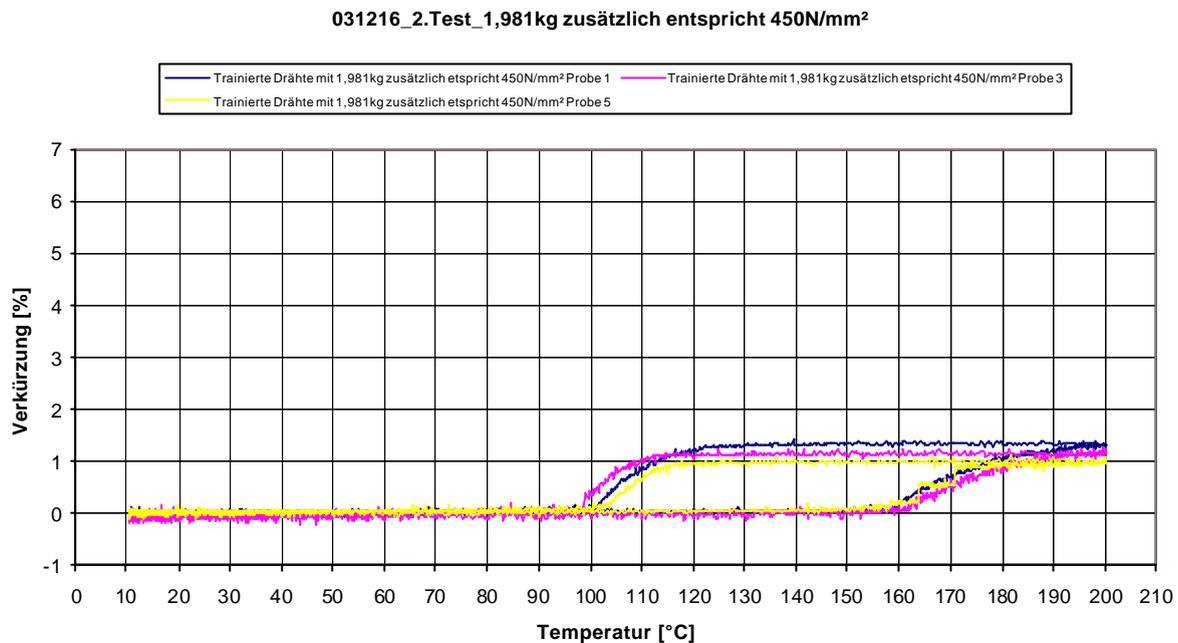


Abb. 9-49 Referenzversuch mit zusätzlichen Gewichten

Es zeigte sich in Abbildung 9-50, dass bei Werten von ca. 450N/mm<sup>2</sup> die A<sub>s</sub>-Temperatur auf über 150°C verschoben wird. Der Wert der erreichten Verkürzung sank im Vergleich zu den mit 135N/mm<sup>2</sup> belasteten Proben natürlich beträchtlich. Dadurch wurde bestätigt, dass bei den gewählten Auslagerungs-Temperaturen (140, 120, 100, 80 und 60°C) stets Martensit auslagert wird.



**Abb. 9-50 Verschiebung der A<sub>s</sub>-Temperatur**

### 9.3 Die Vorversuche am Laser-Prüfstand

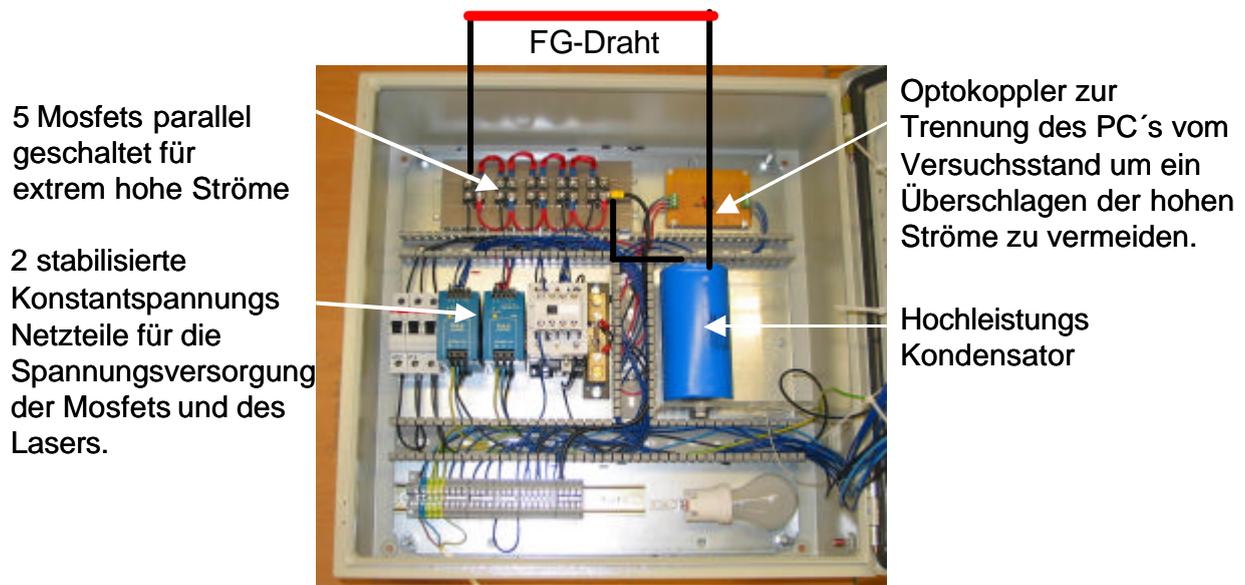
Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung der Langzeitstabilität der Aktor-Zugdrähte aus FGL. In dem Projekt werden derzeit langfristige Versuchsreihen durchgeführt. Für die wissenschaftliche Untersuchung erfolgen deshalb Ölbadversuche an den ausgelagerten Proben, die eine recht lange Versuchszeit benötigen. Ermittelt werden die Umwandlungstemperaturen und die erbrachten Wege (prozentuale Verkürzung bzw. Hub).

In einem zweiten Schritt werden zu einem späteren Zeitpunkt am Laserprüfstand die ausgelagerten Proben auf ihre Funktion hin getestet (Ermittlung von Verkürzungszeit und Hub). Der Anschluss an eine Gleichstromquelle erfolgt durch das Prinzip des

Ohm'schen Widerstandes und sorgt für den Stromfluss durch das FG Element. Bei richtigen Voraussetzungen, sprich einer geeigneten Einstellung bzgl. Strom, Spannung und Bestromungszeit, erfolgt eine sehr schnelle Erwärmung und dementsprechend eine sehr schnelle Umwandlung mit Verkürzung. Eine Grundvoraussetzung dabei ist, dass der Querschnitt im Vergleich zur Länge sehr klein ist. Dies ist bei einem Draht der Fall [39].

In Abbildung 9-51 ist der Ablauf der Ansteuerung dieses FG-Drahtes dargestellt. Über den Optokoppler wird ein 5V Spannungssignal vom PC gesendet und schaltet die 12V Schaltspannung für die Mosfets. Die Mosfets schließen den Stromkreis von Kondensator und FG-Draht und erwärmen somit den FG-Draht.

Für die Aufladung des Kondensators wird ein Netzgerät verwendet und der Laser wird durch eine Konstantspannungsquelle (24V) mit Energie versorgt. Die hohen Impulsströme werden durch den gleichen Schaltungsaufbau (5 parallel geschaltete Mosfets (Typ „XFN 170N/10“ der Firma Ixys) geschaltet. Die Mosfets benötigen eine Schaltspannung von 12V. Die Schaltspannung wird von einer Konstantspannungsquelle (12V) zur Verfügung gestellt. Die Ansteuerung der Mosfets-Schaltung erfolgt über LabView. Ein durch eine Messkarte der Firma National Instruments (Typ „PCI 6024 E“) ausgesendetes digitales Signal schaltet einen optischen Koppler. Dieser ist notwendig, um die Messkarte und den Computer vor den hohen Spannungen zu schützen. Die Mosfets würden schon bei einer Spannung von 10V durchschalten. Der optische Koppler steuert wiederum die Schaltspannung für die Mosfets. Durch die Programmierung von LabView auf diese Anwendung können durch die Länge des ausgestrahlten digitalen Signals die verschiedenen Bestromungszeiten eingestellt werden.



**Abb. 9-51 Elektrischer Schaltschrank**

Ein großer Bestandteil der Vorversuche des Laserprüfstandes war es die verschiedenen „richtigen“ Einstellungen am Laserprüfstand zu finden, um daraus die geeignetste Ansteuerung für die späteren Prüfungen der ausgelagerten Proben auszuwählen. Darunter fiel die Wahl der Kondensator-Konfiguration sowie die Ansteuerung des FG-Drahtes durch das Messwerterfassungsprogramm LabView. An dieser Stelle wurde auch der Laser-Prüfstand in Betrieb genommen und weitere Einstellungen z.B. die Verschiebung des Drahtes vorgenommen (die in der Spannvorrichtung eingespannte Drahtlänge im Ofen ist 244mm), sodass der Messpunkt jedes Mal auf Null beginnen kann.

Da hauptsächlich drei wesentliche Faktoren, nämlich Kondensator-Größe, Kondensator-Kapazität und die Bestromungszeit durch LabView bei der Ansteuerung der FG-Drähte eine Rolle spielen, wurden am Anfang die Laser-Vorversuche gemäß der beschriebenen Einstellungen aus der vorhergehenden Diplomarbeit [36] am Versuchsstand mit Test-Proben durchgeführt. Die Einstellungen wurden nur als erste Richtlinie benutzt, da die Drähte in diesem Projekt eine Länge von 244mm hatten gegenüber 144mm aus genannter Diplomarbeit. Damit ändert sich der Widerstand im Draht und der benötigte Energieverbrauch steigt. Weiterhin waren die Legierungseigenschaften des FG-Materials auch unterschiedlich, was bei der Bestromung ebenfalls zu unterschiedlichen Eigenschaften führen kann.

### 9.3.1 Zwischenversuche am Laserprüfstand

Der Kooperationspartner äußerte nach einer Projektpräsentation etwa in der Mitte der Projektlaufzeit den Wunsch nach einem Zwischenversuch am Laserprüfstand. Damit sollte in Erfahrung gebracht werden, ob ausgelagerte Drähte aufgrund der Wärmebeanspruchung eine Verminderung in ihrer Funktion erfahren. Zur Abschätzung, ob die Auslagerung einen Einfluss auf die Funktion der FG-Proben hat, sollte mit 120 Tagen ausgelagerten Versuchsproben (entspricht „Halbzeit“ der gesamten Auslagerungsversuche) diese Zwischenversuche durchgeführt werden. Da der Kooperationspartner vor allem wirtschaftliche Interessen mit diesem Entwicklungsprojekt verbindet und diesen Zwischenversuch für eine erste Abschätzung wünschte, wurde zu diesem Zeitpunkt direkt mit diesen 120 Tage ausgelagerten Versuchsproben ein Zwischenversuch durchgeführt. Deshalb wurden die laufenden Versuche am Ölbadprüfstand immer wieder kurz unterbrochen, um mit der fahrbaren Messauswertung den Laserprüfstand zum Zweck der Zwischenversuche vorzubereiten.

#### **Vorbereiten des Laserprüfstandes - Optimierungsphase**

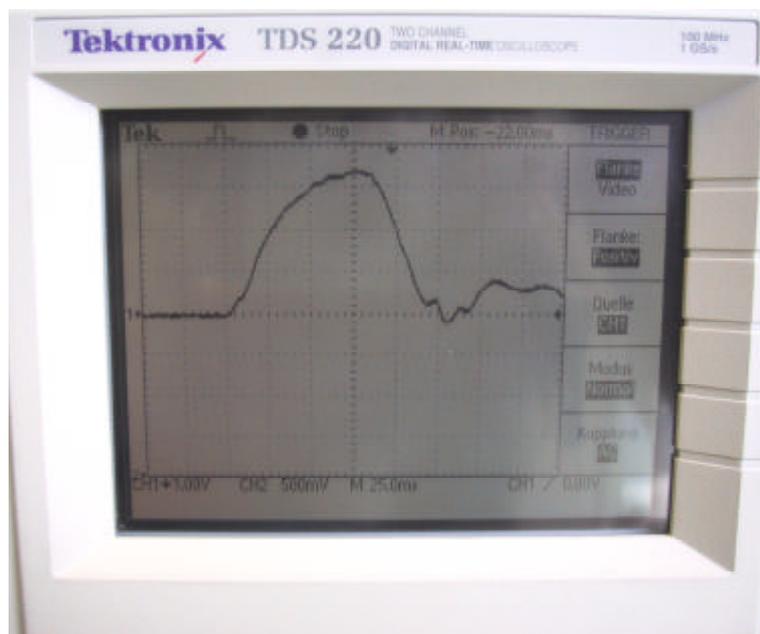
Zur Gewährleistung der Richtigkeit der Versuchsergebnisse wurde der Laserprüfstand zuvor getestet und dabei verschiedene Bauteile / Komponenten überprüft. Da zunächst nicht konstante Ergebnisse ermittelt werden konnten und da manche FG-Drähte bei der Bestromung durchbrannten, wurde der gesamte Laserprüfstand überprüft um dieses Problem des „Durchbrennens“ der FG-Drähte zu beseitigen. Die anfängliche Vermutung war, dass der Grund des Durchbrennens am Entladen einer zu großen Kondensator-Spannung liegen könnte, die die FG-Drähte schmelzen lässt. Deshalb wurde die Spannung des Kondensators verringert und die Bestromungszeit in LabView angepasst. Als weitere Vorbereitungen am Prüfstand wurden vorgenommen:

*Messkarte (Schnelligkeit, Ansteuerung):* Das gesamte Ansteuerungsteil des Versuchsstands (PC, Messkarte und Connector-Block) wurde untersucht. Es stellte

sich heraus, unter anderem auch bei Nachfrage beim Hersteller, dass eine Abtastrate der Messkarte von 200kS/s völlig ausreichend für diese Anwendungen ist und dass der PC sowie der Connector-Block ausreichend dimensioniert sind.

*Verkabelung und Schaltschrank:* Weiterhin wurden sämtliche Kabel und Verbindungen sowie der Schaltschrank (unter Mithilfe von einem Elektromeister im Haus) untersucht. Es konnte aber kein Fehler gefunden werden.

*Ansteuerungszeit:* Es stellte sich heraus, dass die Bestromungszeiten in den durchgeführten Versuchen nicht konstant waren. D.h. die tatsächliche Bestromungszeit an dem Connector-Block entsprach nicht der angegebenen Zeit im Softwareprogramm LabView. Die Unterschiede konnten durch ein digitales Oszilloskop nachgewiesen werden, das direkt an den Connector-Block angeschlossen wurde und damit das Signal vom Programm LabView bzw. der angegebenen Bestromungszeit erfasste.



**Abb. 9-52 Digitales Oszilloskop**

*LabView (Programm):* Deswegen wurde das LabView Programm genauer unter die Lupe genommen und umprogrammiert – jedoch wurde zunächst keine Verbesserung damit erreicht. Am Anfang funktionierte das Programm sehr gut, aber nach genauerer Untersuchung durch Messungen mit dem digitalen Oszilloskop stellte sich

heraus, dass die vom LabView aus gesteuerten Signale, d.h. Bestromungszeiten, nicht der Zeit an der Messkarte entsprachen. Ein sogenannter Doppelimpuls wurde direkt an dem Connector-Block festgestellt, der in Abbildung 9-53 dargestellt wird. Wenn der Impuls mittels LabView ausgelöst wurde, entstand ein kleiner Vorimpuls zusätzlich zu dem eigentlichen Impuls, der wiederum einen Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

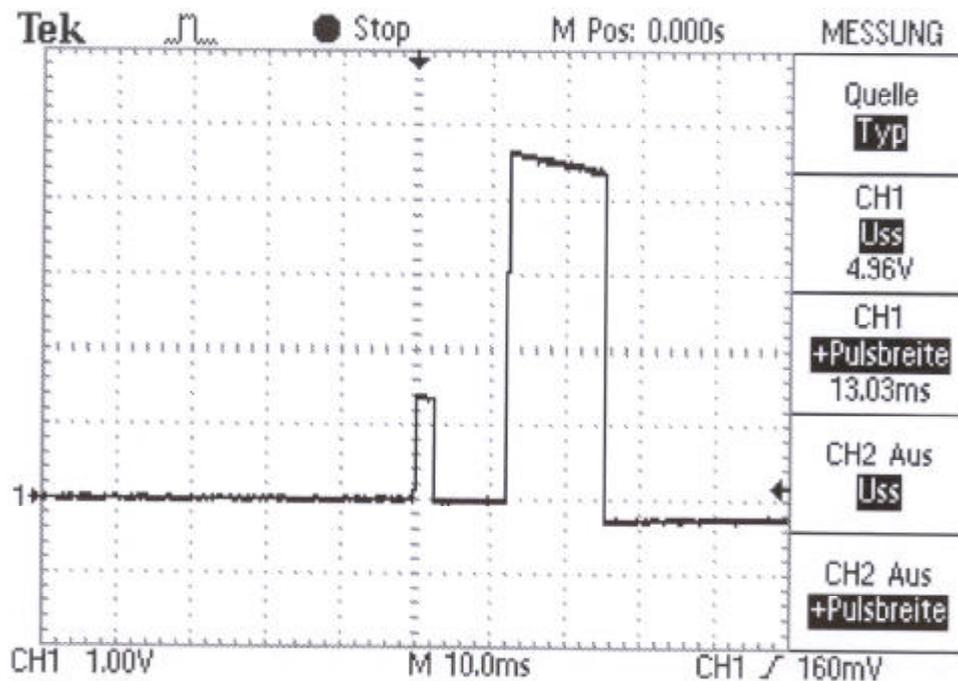


Abb. 9-53 Vom Oszilloskop gemessener Doppelimpuls

Zur Kontrolle wurde der tatsächliche Impuls, der an dem Connector-Block ankam nochmals durch ein zweites Oszilloskop überprüft. In Abbildung 9-54 wird im Ausdruck 1 der Doppelimpuls mit direktem Anschluss an den Optokoppler dargestellt, während in Ausdruck 2 das Signal ohne Optokoppler gemessen wurde.

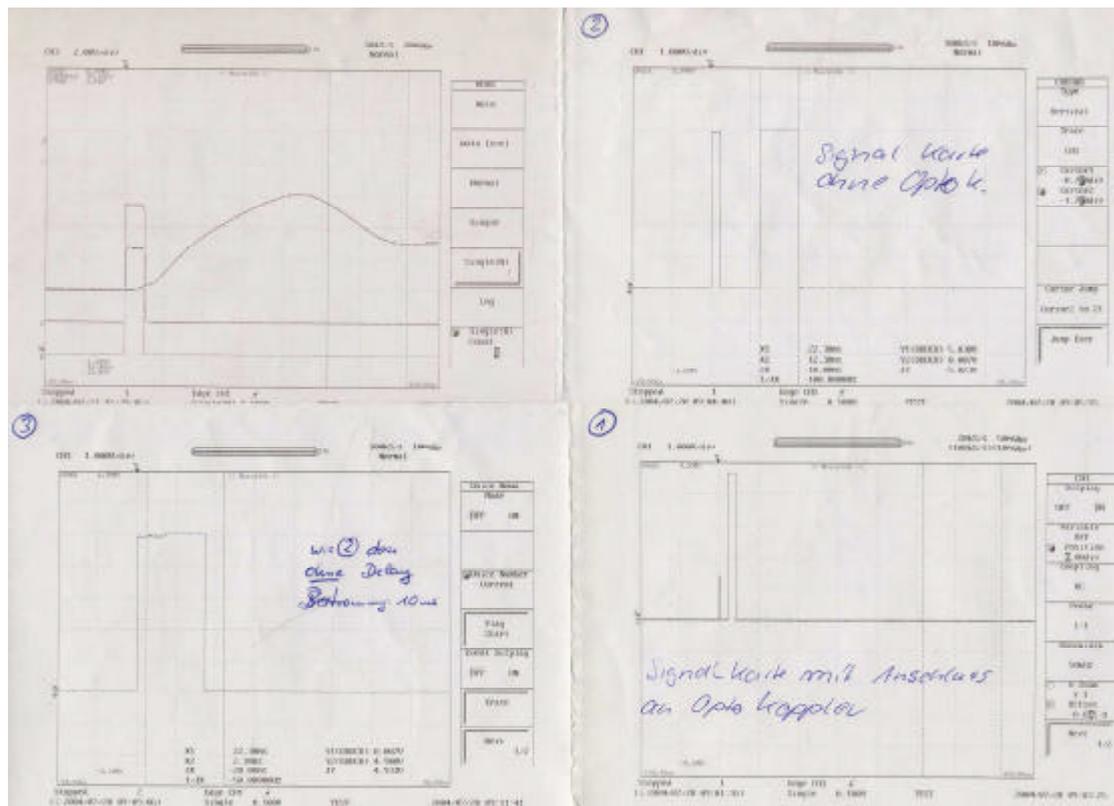


Abb. 9-54 Weitere Messungen am Prüfstand

Eine völlig neue Version des LabView Programms wurde erstellt. Diese funktionierte zwar besser, aber noch nicht einwandfrei. Schließlich wurde durch die EET Abteilung (Versuchsabteilung) des Kooperationspartners durch Herrn Lutzke eine funktionierende LabView-Version (Single-Impuls) erstellt, mit der reproduzierbare Versuchsergebnisse ermittelt werden konnten. D.h., dass damit die in LabView angegebene Bestromungszeit auch genau der tatsächlichen Bestromungszeit entspricht und genau so an dem Connector-Block ankommt.

Damit wurde das Problem behoben und konstante Werten erreicht. Durch eine weiter überarbeitete Version des LabView Programms wurde ein Schalter („Counter zurücksetzen“) mit eingebaut (Abbildung 9-55), der den Zähler zurücksetzte. Ist dieser Zähler während der Messung ausgeschaltet, wird dadurch ein möglicher Doppelimpuls beseitigt.

In Abbildung 9-55 wird die endgültige LabView-Version mit der Abkürzung 1.4 gezeigt, die für alle weiteren Versuche verwendet wurde. Dieses Programm gibt einen Impuls auf den gewählten Counterausgang aus. Die voreingestellte

Impulsdauer (Bestromungszeit) wird unabhängig von der PC-Tätigkeit von der Messkarte ausgeführt (gepuffert). Die Aufzeichnung beginnt ungetriggert, d.h. direkt bei der Ausgabe des Impulses. Wichtig zu beachten ist, dass die Analogkanäle differenziell gemessen wurden und deshalb die Messkarte auf differenziell einzustellen ist bzw. die Anschlüsse am Connector-Block richtig zu wählen sind. Die Eingangskanäle Impuls und Laser werden in einen Puffer geschrieben und nach einer kurzen Verzögerung am Monitor dargestellt. Nach der Berechnung wird die Messung als \*.txt und \*.dat (Excel-lesbare) Dateien gespeichert. Es werden zusätzlich zwei weitere Kanäle, nämlich Strom und Spannung, aufgezeichnet (die beide bis zu maximal 10V belastbar sind). Zusätzlich zu der Textdatei mit den Laserdaten wurde eine weitere Excel-lesbare Datei erzeugt, in der allen vier Eingangskanälen, Impuls, Laser, Strom und Spannung, eine Messpunktnummer zugeteilt wird. Dadurch lässt sich aus der im LabView angegebenen Zeit  $t$  in ms (Messpunkt zu Messpunkt) die genaue Zeit berechnen. Eine weitere Programmänderung erfolgt in dieser Version 1.4 dadurch, dass man nun die Messfrequenz variabel einstellen kann, von 1kS/s bis zu einer Abtastrate von 50kS/s. Dadurch wird die Darstellung der Ergebnisse erheblich verbessert. Dabei ist zu beachten, dass bei längeren Messzeiten die Messfrequenz nicht zu hoch gewählt werden sollte, da es sonst zu Datenverarbeitungsproblemen kommen kann.

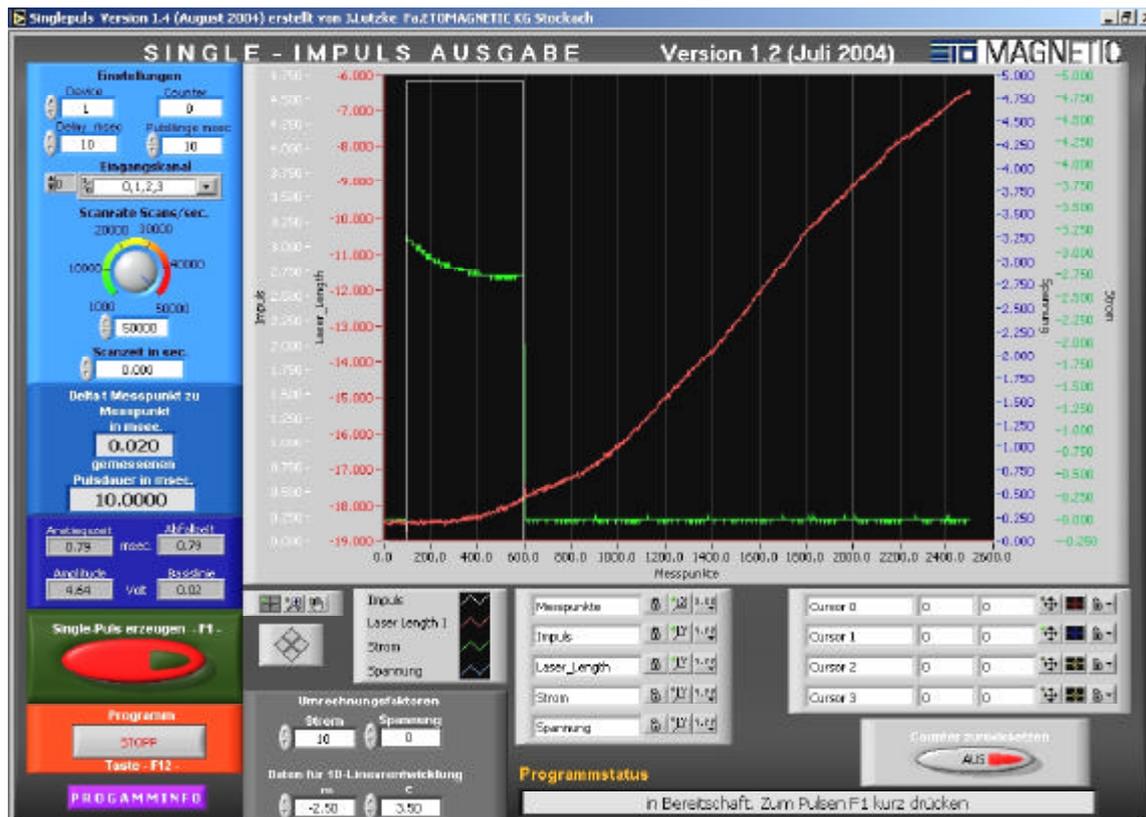


Abb. 9-55 LabView Single-Impuls Version 1.4

In Abbildung 9-56 ist eine Auswertung als in Excel dargestelltes Ergebnis abgebildet. Dies war einer von vielen Versuchen, um die Richtigkeit und Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten. Aus der Abbildung können Impuls, Strom und Hub herausgelesen werden.

In dem Diagramm ist zu erkennen, dass bei einer angegebenen Bestromungszeit von 10ms der Impuls genau 10ms entspricht. Darüber hinaus ist der Stromabfall (Kondensator-Entladung) innerhalb dieser 10 ms zu erkennen (gelbe Kurve). Daraus kann gefolgert werden, dass der Laserprüfstand genau und präzise funktioniert.

2. Test\_50V\_10ms\_2,5A Shunt

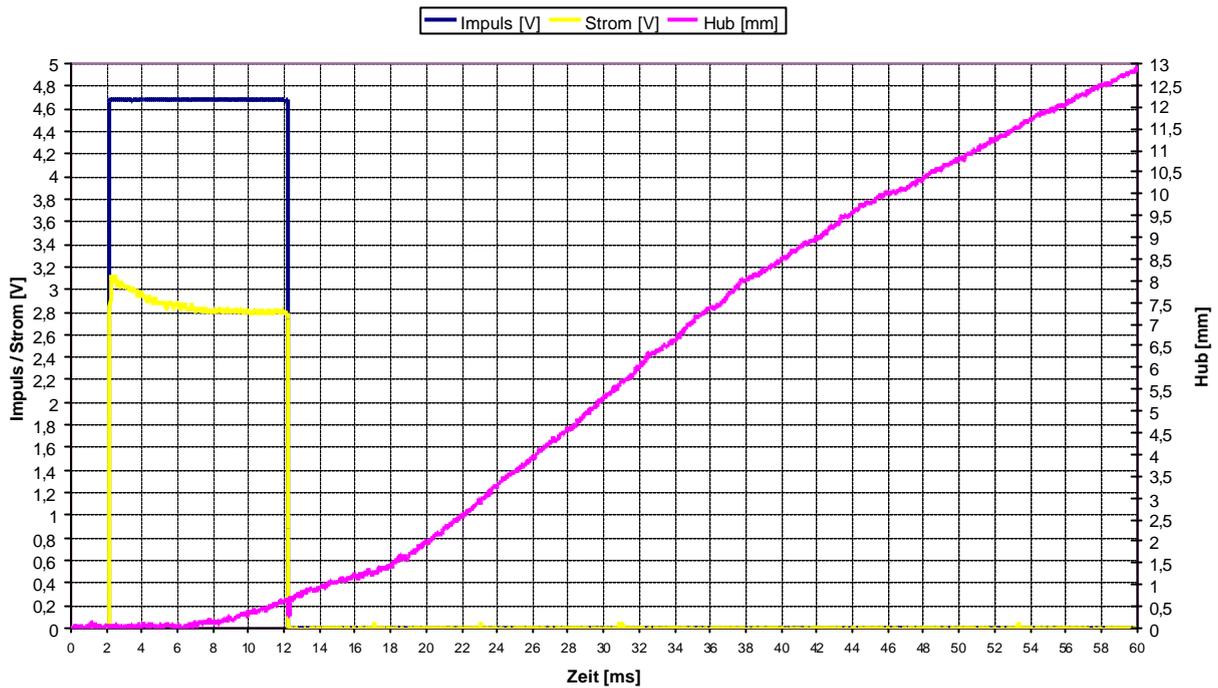


Abb. 9-56 Laserprüfstand-Kontrollversuche bzgl. Impuls, Zeit und Hub

In Abbildung 9-57 ist noch einer der vielen anderen Versuchen dargestellt; in diesem Fall mit einer Impuls von 2ms. Der FG-Draht beginnt sich genau nach dem Impuls von 2ms zusammenzuziehen.

3. Test\_100V\_2ms\_2,5A

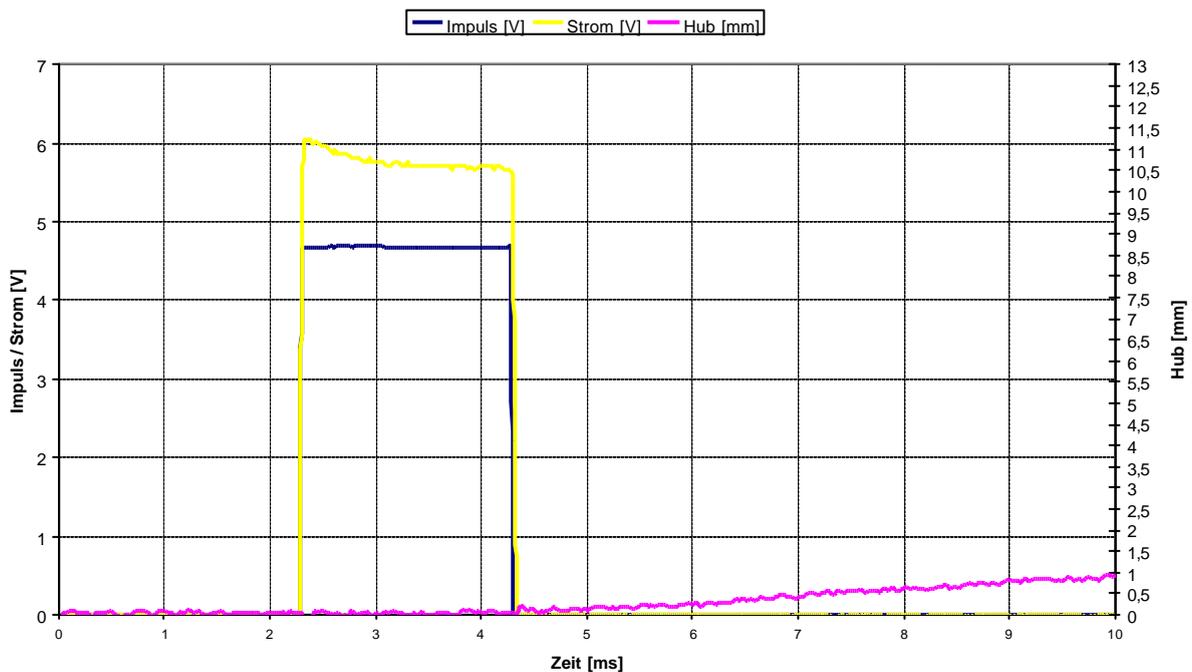


Abb. 9-57 Bestimmung des Verkürzungspunkts der FG-Drähte

### **Vorversuche zur Optimierung von Bestromungszeit und Kondensatorgröße**

Während dieser Optimierung des Laserprüfstandes wurden mit nichttrainierten FG-Proben viele Versuchsreihen durchgeführt. Hierbei war es ein weiteres Ziel (neben der Überprüfung der Versuchsstand-Komponenten) eine möglichst schnelle Verkürzung der Drähte zu erreichen (Ziel: 12,5mm Hub in 35ms, vergleiche Lastenheft).

Zum Erreichen dieses Ziels wurden die Bestromungszeiten sowie die Kondensator-Größe, bzw. Kapazitäten variiert (auch mittels paralleler Schaltung).

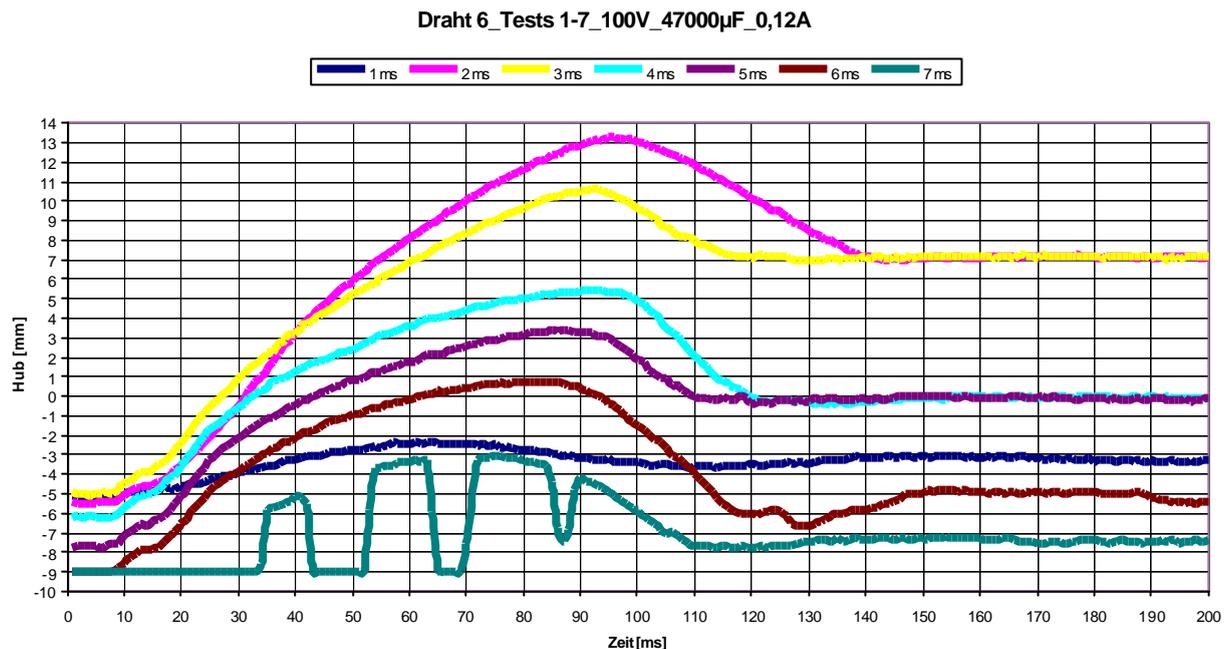
### **Versuchsablauf**

Die Bestromungszeit wurde beim ersten Versuch mit 1ms gewählt und der Versuch durchgeführt. Danach wurde die Bestromungszeit auf 2ms erhöht und ein Versuch mit der gleichen Drahtprobe durchgeführt, danach mit 3ms usw. bis der FG-Draht endgültig plastisch verformt war und keine Verkürzung mehr aufgezeichnet werden konnte. Dies erfolgte normalerweise bei 7ms für den 100V / 47000 $\mu$ F Kondensator und bei 9ms für den 63V / 100000 $\mu$ F Kondensator. Es stellte sich heraus, dass das beste Ergebnis mit dem 100V / 47000 $\mu$ F Kondensator bei dem vorgeschriebenen Hub von 12,5mm mit einer Bestromungszeit von 2ms innerhalb von 46 bis 50ms erreicht wurde. Bei dem 63V / 100000 $\mu$ F Kondensator konnten die besten Ergebnisse bei einer Bestromungszeit von 6 ms erreicht werden und lagen zwischen 58 und 59ms.

Unter der Zielsetzung, den aus dem Pflichtenheft vorgegebenen Hub innerhalb kürzerer Zeit zu erreichen (möglichst nahe der 35ms), wurde sodann die Kapazität erhöht, indem verschiedene Kondensatoren parallel geschaltet wurden. Zunächst wurden der 47000 $\mu$ F- und der 22000 $\mu$ F-Kondensator parallel geschaltet. Mit den resultierenden 69000 $\mu$ F wurde bei einer Bestromungszeit von 2ms der vorgeschriebene Hub innerhalb von 50ms erreicht. Danach wurde zu den beiden Kondensatoren zusätzlich ein 10000 $\mu$ F-Kondensator parallel geschaltet. Die beste Zeit wurde ebenfalls bei einer Bestromungszeit von 2ms erreicht und lag innerhalb von 47,4 bis 49,1ms. Ein letzter Kondensator mit 4700 $\mu$ F wurde zusätzlich parallel

geschaltet und der schnellste Hub wurde wieder bei einer Bestromungszeit von 2ms erreicht, diesmal innerhalb von 48,3 bis 51,3ms.

Da die Kapazitätserhöhung nicht das erwartete Ergebnis (eine Verringerung der Aktionszeit) hervorgebracht hatte, wurde entschieden die Zwischenversuche mit dem 100V / 47000 $\mu$ F Kondensator durchzuführen.



**Abb. 9-58 Versuch mit 1 ms Schritten**

Wie aus Abbildung 9-58 zu entnehmen ist, wird das beste Ergebnis hinsichtlich der Stellzeit mit trainierten, nicht ausgelagerten Proben bei Verwendung eines 100V / 47000 $\mu$ F-Kondensators und einer Bestromungszeit von 2ms erreicht. Bei der Bestromungszeit von 1ms wird noch nicht der vorgeschriebene Hub erreicht, bei Bestromungszeiten von 3ms und mehr erfolgte bereits eine Drahtschädigung und der erreichbare Hub wird immer geringer. Da die LabView-Programmierung leider keine Zwischenwerte zulässt, wird mit 2ms Bestromungszeit das beste Ergebnis erreicht.

## Wiederholbarkeit der Versuche

In einem letzten Schritt vor der eigentlichen Prüfung der 120 Tage ausgelagerten Proben wurde die Wiederholbarkeit der Ergebnisse getestet mit dem genannten Kondensator (100V / 47000 $\mu$ F). Es wurden 3 bis 6 Wiederholungen mit 2ms Bestromungszeit am gleichen FG-Draht durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 9-59. Die Versuchsergebnisse entsprechen den vorherigen Versuchen mit einer Aktionszeit zwischen 50 und 52ms. Es zeigt sich zwar ein leichter Rückgang des Hubes, jedoch werden auch im sechsten Versuch noch gut 13mm erreicht. Dass die Kurven der Tests 1 bis 3 nach erfolgtem Hub auf einen anderen Wert zurückgehen als die Kurven der Tests 4 bis 6 liegt an dem Zahnabstand der Zahnstange, in der die Klinke des Schlittens nach Verkürzung einrastet und das angehobene Gewicht hält.

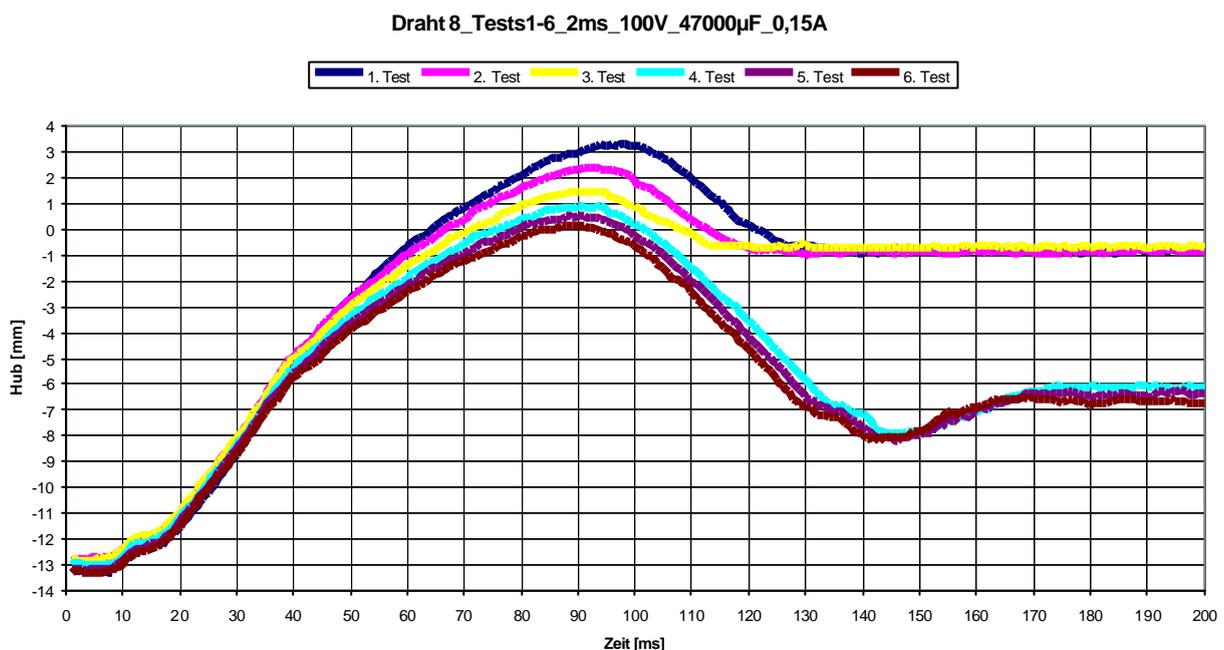
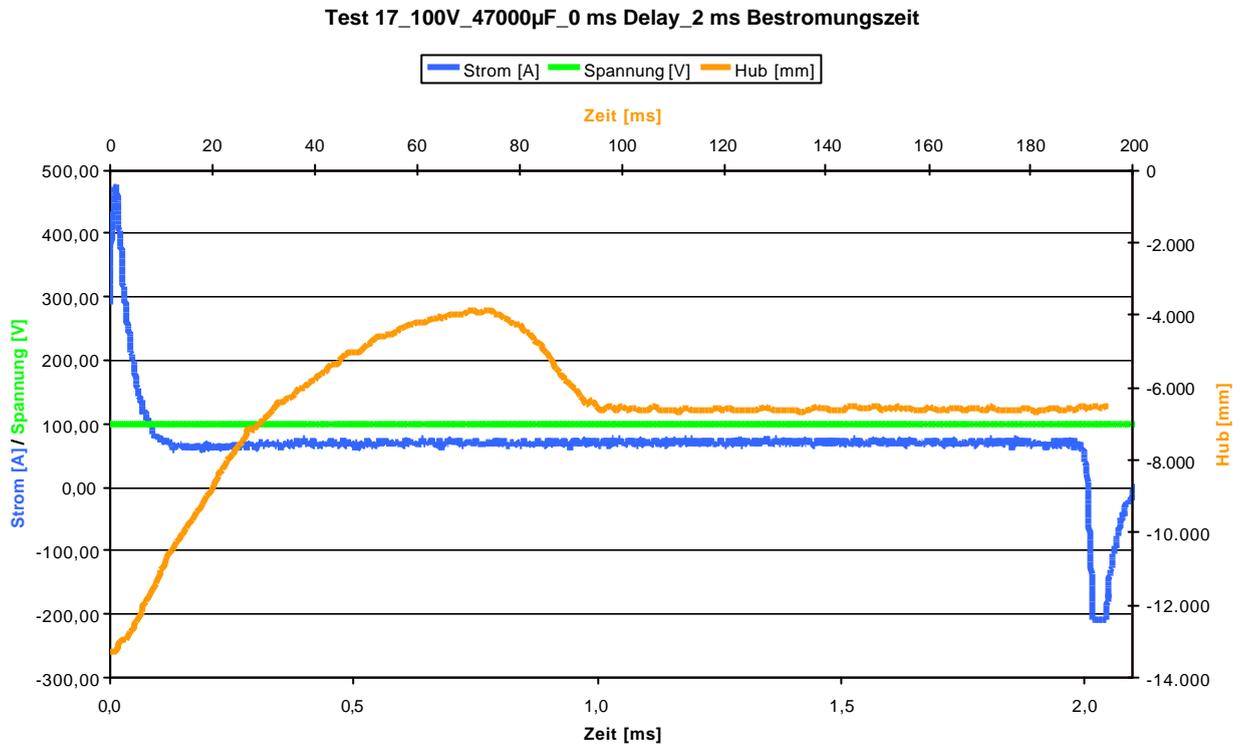


Abb. 9-59 Wiederholungsversuche

## Letzte Überprüfungen am Laserprüfstand

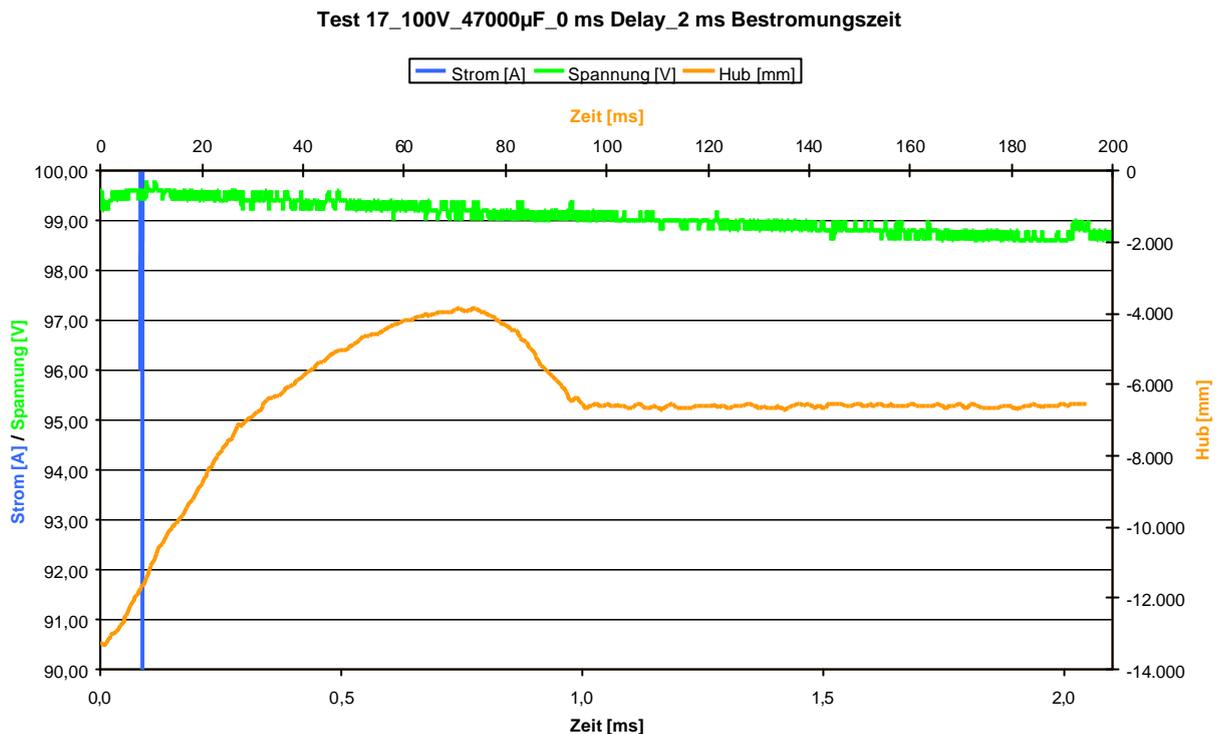
Bevor nun die eigentlichen Zwischenversuche durchgeführt wurden, wurde in einer letzten Überprüfung der Spannungsabfall am Kondensator ermittelt. Unter Zuhilfenahme des „Verbindungsprogrammes WaveStar“ wurde das digitale Oszilloskop mit dem PC verbunden, d.h. die gemessenen Werte können somit in Excel-Dateien umgewandelt werden. Es wurden die Werte für den Hub, die Spannung und den Strom ermittelt und dargestellt (siehe Abbildung 9-60). Dabei

wurde der Hub direkt über den Laser gemessen, die Spannung in der Probe am Kondensator (direktes Messen an der Probe hätte einen Kurzschluss verursacht) und der Strom, indem an einem Shunt von 1m $\Omega$  die Spannung gemessen und der zugehörige Stromwert berechnet wurde.



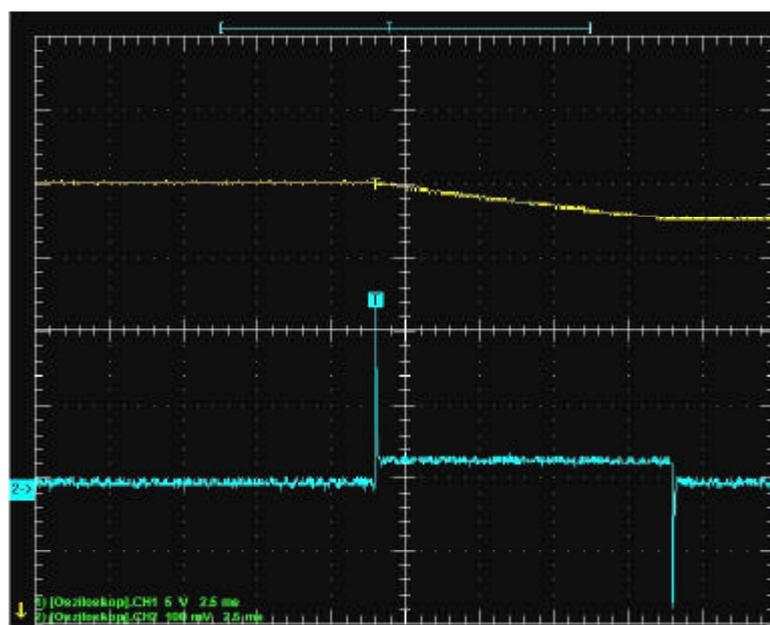
**Abb. 9-60 Spannungsabfall am Kondensator**

Der Spannungsabfall am Kondensator während der kurzen Bestromungszeit von 2ms ist sehr gering. Abbildung 9-61 zeigt dies als Vergrößerung bezüglich dem aufgetragenen Spannungswert etwas deutlicher.



**Abb. 9-61 Vergrößerte Darstellung des Spannungsabfalls am Kondensator**

Man kann sagen, dass der Spannungsabfall für die „beste Einstellung“ unter 1,5% liegt: der größtmögliche Abfall wurde bei 2ms mit 98,60V gemessen (Excel-Tabelle). In Abbildung 9-62 wurde dieser Versuch als Bildschirm Ausdruck der LabView-Anzeige dargestellt, wobei der Spannungsabfall (gelb) deutlich zu sehen ist, wenn der Strom (blau), bzw. Impuls ausgelöst wird.

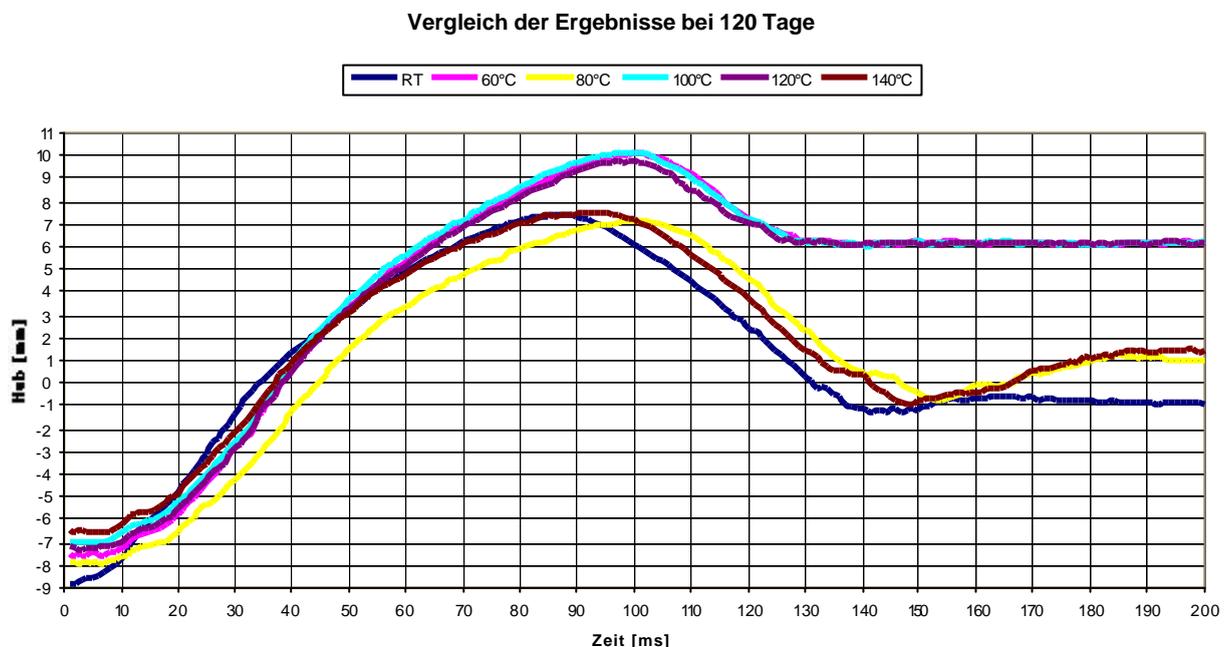


**Abb. 9-62 WaveStar Verbindungsprogramm**

Aufgrund dieser Werte konnte mit den Zwischenversuchen begonnen werden.

### Zwischenversuche mit ausgelagerten Proben

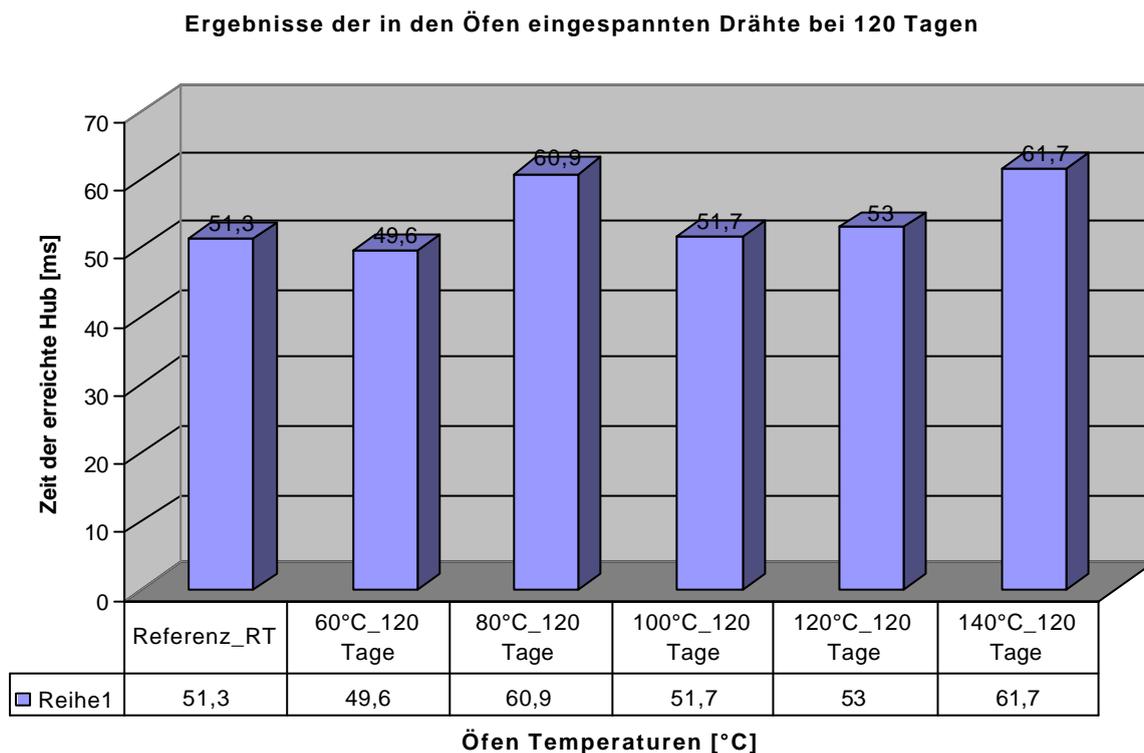
Mit dieser „besten“ Einstellung wurden nun Versuche an 120 Tagen ausgelagerten Proben durchgeführt, und zwar jeweils an einer Probe pro Auslagerungstemperatur (60°C, 80°C, 100°C, 120°C und 140°C). Die beiden anderen bei dieser Auslagerung entnommenen Proben sollten erst im Rahmen der abschließenden Untersuchungen an allen ausgelagerten Proben am Laserprüfstand zum Einsatz kommen. In Abbildung 9-63 sind die ermittelten Werte im Vergleich zur ebenfalls 120 Tage bei Raumtemperatur (RT) ausgelagerten Referenzprobe dargestellt.



**Abb. 9-63 Vergleich der Zwischenversuchsergebnisse bei 120 Tagen**

Bei dem Kurvenverlauf zeigen sich geringe Unterschiede hinsichtlich des erreichbaren maximalen Hubes, allerdings starten die Kurven auch nicht alle vom exakt gleichen Wert. Bei Betrachtung der einzelnen Kurven und beim Herauslesen der Zeiten für den geforderten Hub von 12,5mm zeigen sich insgesamt wenig Unterschiede, lediglich bei den bei 80°C und 140°C ausgelagerten Proben werden etwas längere Zeiten ermittelt. In Abbildung 9-64 sind die erreichten Zeiten hinsichtlich eines erforderlichen Hubs von 12,5mm nochmals separat dargestellt.

Für diese Zwischenuntersuchung konnten leider keine weiteren Proben untersucht werden, da alle weiteren ausgelagerten Proben für die wissenschaftliche Untersuchung am Ende der Auslagerungszeit benötigt werden, wenn alle Proben nacheinander im Laserprüfstand unter stets gleichen Bedingungen getestet werden sollen.



**Abb. 9-64 Zeiten erreicht bei 120 Tagen**

### Schlussfolgerung

Aufgrund der in dieser Zwischenuntersuchung ermittelten Werte erscheint es als unwahrscheinlich, dass die Auslagerung der FG-Proben bei diesen Temperaturen eine Beeinträchtigung des FG-Effektes und damit der Funktion der FG-Proben in der Anwendung als schnellschaltender Aktor bewirkt. Dass gerade bei der bei 80°C ausgelagerten Probe eine etwas längere Stellzeit auftrat, liegt wahrscheinlich an den Umwandlungstemperaturen der Ausgangsdrähte. Diese liegen beim unbehandelten und nicht ausgelagerten Material zwischen ca. 75°C und 90°C, unter Zugbeanspruchung wie in der Spannvorrichtung etwas höher. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass bei diesem Versuch der Werte der 80°C-Probe von den Werten der anderen Proben abweicht. Bei dieser Auslagerungstemperatur ist der

Auslagerungszustand nicht genau definiert. Ein Grund für diese Vermutung stützt sich auch auf die bis zu dem Zeitpunkt erfolgten Ergebnisse der Ölbadversuche, da auch dort stets die Werte für die Drähte aus dem 80°C-Ofen „nicht zu den anderen ermittelten Werten passten“. Ob bei der einen untersuchten Probe aus dem 140°C-Ofen schon eine Materialveränderung auftritt und zu dem zweiten leicht erhöhten Wert bzgl. der Stellzeit führte, kann anhand dieses einen Zwischenversuches nicht gefolgert werden. Dazu müssen die gesamten Ergebnisse aller Laserversuche an ausgelagerten Proben untersucht werden, was jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich war.

### 9.3.2 Letzte Versuchsumbauten und Definition der Prüfeinstellung

#### Änderung der Kondensator-Aufladung

Da die FG-Aktordrähte in einer Anwendung im Automobilbereich eingesetzt werden sollen, wurde in Anlehnung an das heute im PKW vorhandene Bordstromnetz beschlossen, den Kondensator mit einer verringerten Spannung zu laden. Darüber hinaus sollte die Bestromungszeit vergrößert werden, um überhaupt eine Kontraktion der FG-Drähte bei den niedrigeren Werten zu bewirken. Dies bedeutete, dass das vorgegebene Ziel (vergleiche Lastenheft: 12,5mm Hub in 35ms) nicht mehr galt – es ging in dieser Untersuchungsreihe primär darum, auch mit einem vorhandenen Bordstromnetz die FG-Drähte zu aktivieren.

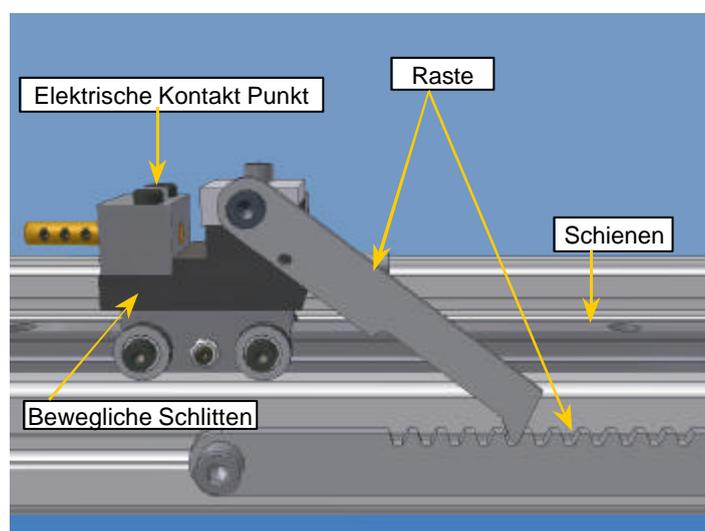
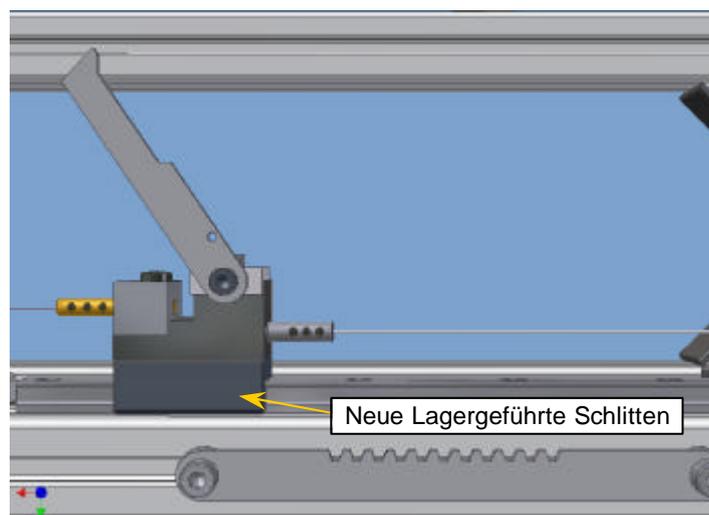


Abb. 9-65 Einrasten des Schlittens

Es wurde weiterhin entschieden, die Versuche ohne Einrasten des Schlittens zu fahren (Abbildung 9-65), da bei den vergangenen Versuchen die mitgezogene Raste zusätzliche Energie verbrauchte und den Widerstand des Schlittens erhöhte. Es wurden eine Reihe von Versuchen durchgeführt, stets mit dem gleichen Kondensator, allerdings mit niedrigerer Aufladung. Mit einer Ladespannung von 100V beginnend wurde mit jedem weiteren Versuch in 10V Schritten abnehmend bis zu 10V Ladespannung experimentiert. Bezüglich den Bestromungszeiten wurde für jede Ladestromreihe von 10ms beginnend in 10ms Schritten bis zu einer Bestromungszeit von 100ms bestromt.

Es wurden auch Versuche mit einem neuen, lagergeführten Schlitten durchgeführt (Abbildung 9-66), da es für möglich gehalten wurde, dass durch Fett auf der Schiene der Widerstand vergrößert sei. Es stellte sich heraus, dass keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Ergebnissen ohne Fett bzw. dem beweglichen Schlitten und dem neuen, lagergeführten Schlitten mit Fett auf der Schiene, vorkommen.



**Abb. 9-66 Neuer lagergeführter Schlitten**

Der neue, lagergeführte Schlitten wurde intensiv mit den zwei „besten“ Ergebnissen aus den Versuchsreihen mit verringerter Kondensator-Aufladung (40 und 30V) getestet. Die 40V-Reihe wurde auch mit verschiedenen Bestromungszeiten in 5ms Schritten mit mehreren FG-Drähten weiter getestet. Aus dieser 40V-Reihe stellte sich die Bestromungszeit von 10ms als „bestes Ergebnis“ heraus, sprich maximaler Hub nach der Überschwingung. Diese Einstellung (40V, 10ms) wurde weiter getestet.

Parallel dazu wurde mit der anderen „besten Einstellung“ am Prüfstand Versuche durchgeführt und zwar mit der Einstellung von 30V. Die 30V-Reihe wurde wie die 40V-Reihe in Bestromungszeiten von 5 ms-Schritten getestet. Aus der 30V-Reihe wurden weitere Versuche mit 20 bzw. 30ms durchgeführt. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche wurden die 30V mit 30ms Bestomungszeit Einstellungen als „beste Einstellung“ gewählt und ab hier in weiteren Versuchen dementsprechend verwendet.

Versuche mit geringeren Ladespannungen kamen leider bei weitem nicht an diese Werte heran, so dass trotz des heutigen Bordspannungsnetzes von 12V in dieser Untersuchungsreihe die 30V / 30ms- Einstellung gewählt wurde. Dieser Entscheidung liegt zugrunde, dass in der Automobil-Entwicklung immer öfters darüber diskutiert wird, das heutzutage auf 12V arbeitende Bordspannungsnetz auf 24V, 36V oder gar 42V zu erhöhen.

### **Weitere Prüfstand-Umbauten**

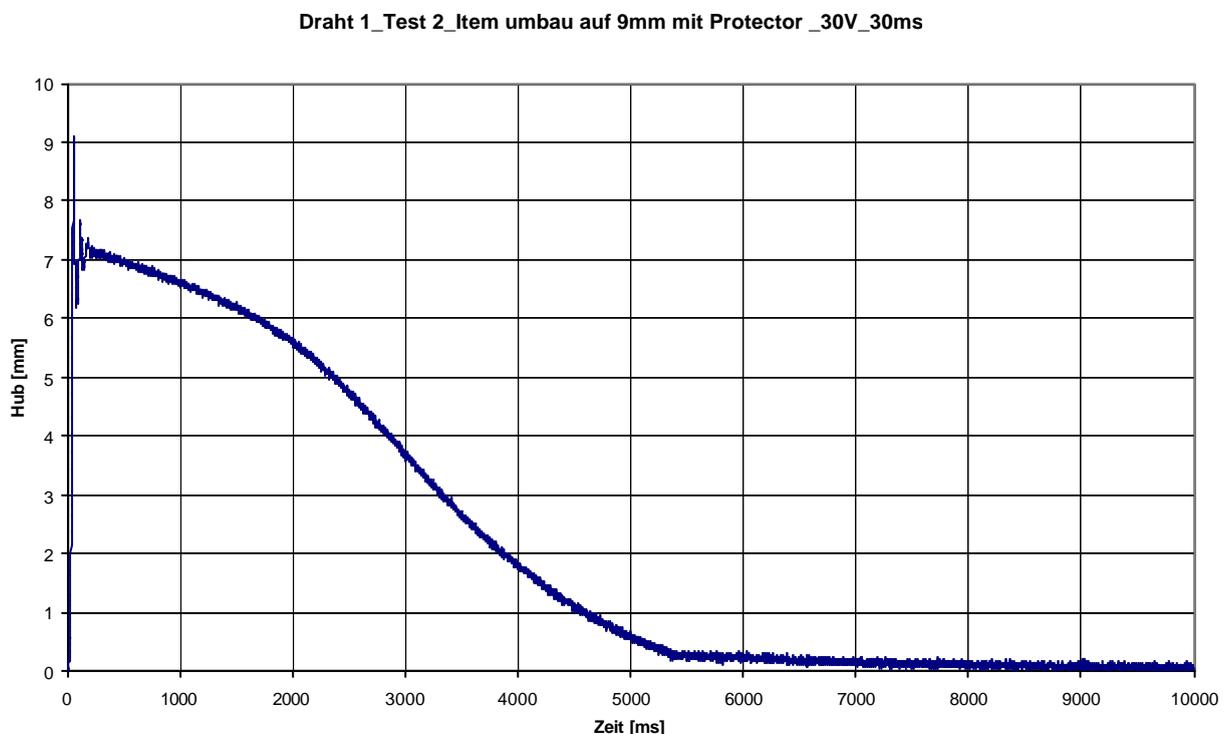
Durch eine weitere Umbaumaßnahme am Laser-Prüfstand wurde das Überspringen des Gewichtes verringert. Bei den bisherigen Versuchen fiel auf, dass durch die schnelle Verkürzung des FG-Aktordrähte die angehängte Masse derart beschleunigt wird, dass sowohl das Gewicht als auch der Schlitten sich nach maximaler Verkürzung des Drahtes weiterbewegen. Da das Lasermessgerät als Maß für die Drahtverkürzung die Position des Schlittens aufnimmt, werden auf diese Weise Verkürzungswege von über 15mm aufgezeichnet, obwohl sich eine Drahtprobe gar nicht so stark verkürzen kann (Vergleich mit den ermittelten Werten aus dem Ölbadversuch bzw. dem Wert, auf den sich der Draht nach einigen Hundert Millisekunden einschwingt, wenn das Gewicht wieder beim Zurückfallen den FG-Draht belastet). Der Umbau erfolgte oberhalb der Gewichtsaufhängung in Form eines Anschlages. Dadurch wird das Gewicht schlagartig abgebremst, wenn ein FG-Draht angesteuert wird und sich verkürzt. Gleichzeitig mit dieser Umbaumaßnahme wurde die Schlitten wieder zum ursprünglichen Schlitten zurückgebaut.

Der Anschlag wurde als Folge der Ergebnisse mit verschiedenen positionierten Anschlägen auf 9mm umgebaut. D.h. der FG-Draht kann sich maximal 9mm zusammenziehen und dementsprechend nur einen maximalen Hub von 9mm

erreichen. Weiterhin wurde der Anschlag unterschiedlich mit Gummi und Protectormaterial aus dem Motorradbekleidungsbereich gedämpft. Protector stellte sich als Material mit den besseren Dämpfungseigenschaften dar und wurde deshalb in den weiteren Versuchen benutzt.

### Kontrollversuch mit verlängerter Versuchsdauer

Um die Rückumwandlung (vom austenitischen zum martensitischen Zustand) nach Auslösung der FG-Drähte zu untersuchen wurde die Abtastrate (Scanzeit) auf 10000ms eingestellt. Dadurch kann die komplette Umwandlung zurück in den Ausgangszustand aufgezeichnet werden. Aus Abbildung 9-67 ist zu entnehmen, dass die Drahtproben innerhalb der ersten 500ms auf diesem Niveau bleiben, also sich im austenitischen Zustand maximaler Verkürzung befinden, und erst nach 5000ms bis 10000ms wieder vollständig in den martensitischen Ausgangszustand zurückgehen. Für die Referenzkurve bedeutet dies, dass sich die Proben um „maximal 7mm“ verkürzen, jedoch aufgrund der hohen Dynamik des Versuchsablaufes einen höheren Wert erreichen können, sofern dieser nicht durch den Versuchsaufbau auf 9mm begrenzt wurde.



**Abb. 9-67 Versuchsverlauf bis 10s**

### Definition der Prüfeinstellungen

Diese Einstellungen wurden nach Abschluss der Vorversuche als „endgültig“ definiert und genau so in den späteren Auslagerungsversuchen verwendet (Kapitel 10.2):

Ladestrom:	30V
Bestromungszeit:	30ms
Anschlag:	9mm, Protector
Schlitten:	ursprünglicher Schlitten ohne Fett

## 10. Versuchsergebnisse

Die verschiedenen Temperaturen und Zeiten für die einzelnen Versuche sind in der Testmatrix niedergeschrieben. In Tabelle 10-1 ist die Tabelle für den Ölbadversuch dargestellt. Für den Laserversuch gelten die gleichen Werten, bezüglich Auslagerungstemperatur und Auslagerungszeit. Wie man sieht gibt es fünf Auslagerungstemperaturen: 140, 120, 100, 80 und 60°C. Von jeder Temperaturreihe wurden nach 4, 6, 8, ... 180 Tagen jeweils 6 Drähte entnommen, gekennzeichnet und abgelegt. Die Abstände der Auslagerungszeiten wurden am Anfang relativ klein gehalten (zwei Tage), mit zunehmender Auslagerungszeit wurden diese Abstände vergrößert (am Ende 60 Tage). Dadurch konnten die zu erwartenden Veränderungen zu Beginn (bei hohen Auslagerungstemperaturen) und auch die Auswirkung von Langzeitauslagerungen erfasst werden, ohne unnötig Material und Zeit für die Versuchsdurchführungen zu verschwenden. Da allgemein Gefügeänderungen entweder bei hohen Temperaturen oder nach langer Auslagerungszeit auftreten, war ursprünglich geplant, dass die hohen Temperaturen nach kürzere Zeit abgebrochen werden sollten (140°C bis 16 Tage, 120°C bis 30 Tage und 100°C bis 60 Tage). Aus dem gleichen Grund wurde mit der Entnahme von Proben bei niedrigeren Auslagerungstemperaturen zeitversetzt gestartet. Da genügend Probenmaterial vorhanden war, wurden auch die Testreihen der hohen Auslagerungstemperaturen bis zu Ende fortgeführt (180 Tage).

Von den pro Temperatur und Auslagerungszeit entnommenen 6 Drähten wurde mit 3 Drähten der Ölbadversuch durchgeführt. Zwei davon wurden für den Laserversuch benutzt und ein Draht steht noch als Reserveprobe zur Verfügung.

Tage	140°C			120°C			100°C			80°C			60°C		
	1.Test	2.Test	3.Test												
07.Jan 4	07. Jan	07. Jan	09. Jan	08. Jan	08. Jan	08. Jan									
09.Jan 6	09. Jan	12. Jan	12. Jan	13. Jan	13. Jan	13. Jan	14. Jan	14. Jan	15. Jan						
11.Jan 8	15. Jan	16. Jan	16. Jan	19. Jan	19. Jan	20. Jan	20. Jan	21. Jan	21. Jan						
13.Jan 10	22. Jan	22. Jan	23. Jan	26. Jan	26. Jan	27. Jan	01. Mrz	01. Mrz	02. Mrz						
15.Jan 12	08. Mrz	08. Mrz	09. Mrz	03. Mrz	04. Mrz	05. Mrz	10. Mrz	15. Mrz	15. Mrz	16. Mrz	16. Mrz	17. Mrz			
19.Jan 16	17. Mrz	18. Mrz	18. Mrz	19. Mrz	19. Mrz	22. Mrz	22. Mrz	23. Mrz	23. Mrz	24. Mrz	24. Mrz	25. Mrz			
23.Jan 20	25. Mrz	26. Mrz	26. Mrz	29. Mrz	29. Mrz	30. Mrz	30. Mrz	31. Mrz	31. Mrz	01. Apr	01. Apr	02. Apr			
27.Jan 24	02. Apr	05. Apr	05. Apr	06. Apr	06. Apr	07. Apr	08. Apr	08. Apr	08. Apr	13. Apr	13. Apr	14. Apr	14. Apr	15. Apr	15. Apr
02.Feb 30	16. Mai	16. Mai	19. Mai	19. Mai	20. Mai	20. Mai	23. Mai	23. Mai	26. Mai	27. Mai	27. Mai	01. Jun	02. Jun	02. Jun	03. Jun
12.Feb 40	03. Jun	04. Jun	04. Jun	07. Jun	07. Jun	08. Jun	09. Jun	09. Jun	11. Jun	16. Jun	16. Jun	17. Jun	28. Jun	28. Jun	29. Jun
03.Mrz 60	29. Jun	30. Jun	30. Jun	01. Jul	01. Jul	02. Jul	06. Jul	06. Jul	06. Jul	07. Jul	07. Jul	07. Jul	08. Jul	08. Jul	08. Jul
02.Apr 90	09. Jul	09. Jul	09. Jul	10. Jul	10. Jul	12. Jul	12. Jul	12. Jul	13. Jul	14. Jul	15. Jul	15. Jul	16. Jul	16. Jul	16. Jul
02.Mai 120	19. Jul	19. Jul	19. Jul	20. Jul	27. Jul	27. Jul	27. Jul	28. Jul	28. Jul	28. Jul	29. Jul	29. Jul	30. Jul	30. Jul	30. Jul
01.Jul 180	02. Aug	02. Aug	03. Aug	04. Aug	04. Aug	04. Aug	06. Aug	06. Aug	06. Aug	09. Aug	09. Aug	09. Aug	10. Aug	10. Aug	10. Aug
30.Aug 240															

Tab. 10-1 Versuchsübersicht

## 10.1 Ölbadversuche

### 10.1.1 Allgemeine Ölbadversuche

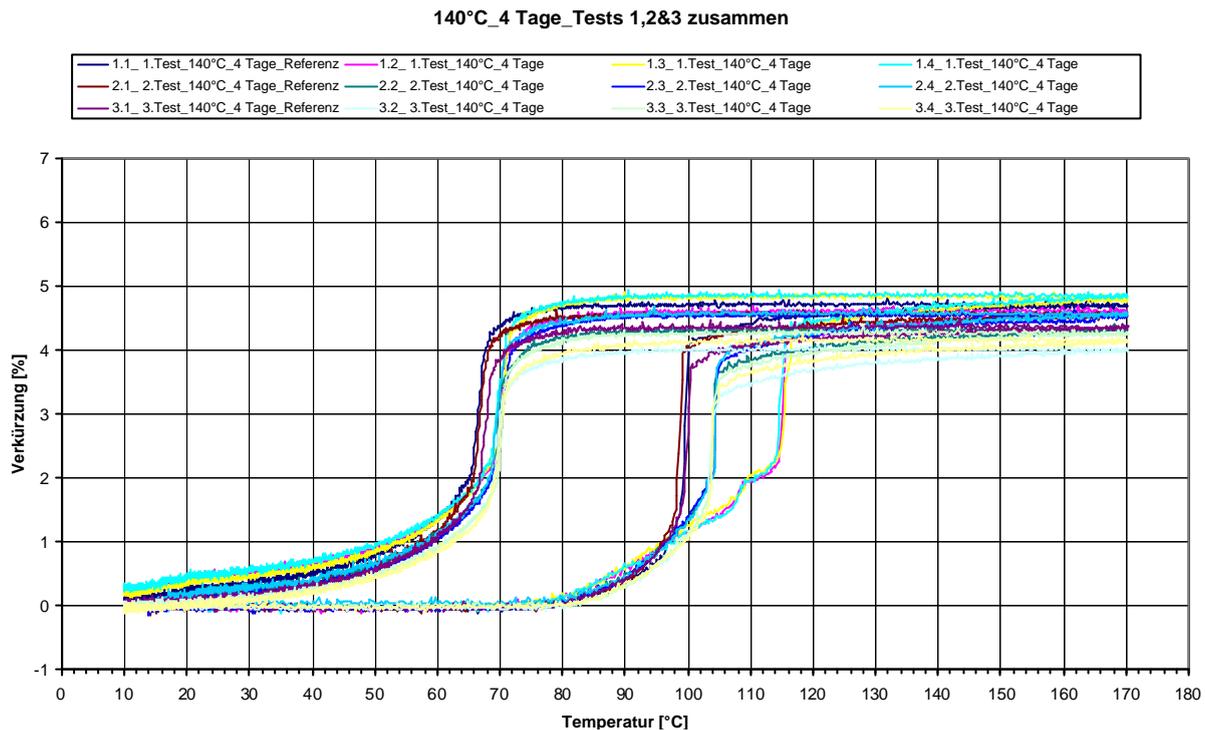
Die Ölbadversuche wurden in dem in Kapitel 9 beschriebenen Ölbadversuchstand durchgeführt. Zu den drei zu untersuchenden Auslagerungsproben wurde immer eine Referenzprobe mitgeprüft, die bei Raumtemperatur in der Einspannvorrichtung ausgelagert wurde. Aufgrund der Tatsache, dass bei dieser Einspannvorrichtung aus konstruktiven Gründen ebenfalls nur 6 Probendrähte ausgebaut werden können, ist die Referenzprobe nicht immer exakt gleich lange ausgelagert wie die Auslagerungsdrähte. In der Tabelle 10-1 ist jeweils das Prüfdatum eingetragen. Wegen der enormen Drahtmenge und der langen Versuchsdauer (ein Ölbadversuch dauert 4,5 Stunden), wurden anfänglich entnommene Proben teilweise erst nach mehreren Wochen untersucht. Bis zum Ende der Auslagerungszeit wurde wegen der

schrittweise längeren Entnahmezeiten das jeweilige Entnahmedatum fast wieder eingeholt.

Abbildung 10-1 zeigt die Ergebnisse der ersten drei Versuche mit dem Probenmaterial, das vier Tage bei 140°C ausgelagert wurde. Außerdem zeigt das Diagramm die Messkurve der drei Referenzproben. In dem Diagramm ist die Verkürzung über der Temperatur aufgetragen. Das Diagramm zeigt sowohl die Aufheizkurven (untere Kurven), als auch die Abkühlungskurven (obere Kurven) im Bereich von 10°C bis 170°C. Man sieht deutlich, dass die Referenzproben im Bereich von 100°C in den austenitischen Zustand umwandeln. Es fällt auf, dass die temperatúrausgelagerten Drähte im ersten Test bei deutlich höheren Temperaturen umwandeln (ca. 115°C). Beim zweiten Test geht diese Umwandlungstemperatur auf 105°C zurück, beim dritten Test liegen die Umwandlungstemperaturen auf dem gleichen Wert, wie die der Referenzproben. Die Abkühlkurven liegen jedoch bei allen Tests auf dem gleichen Niveau.

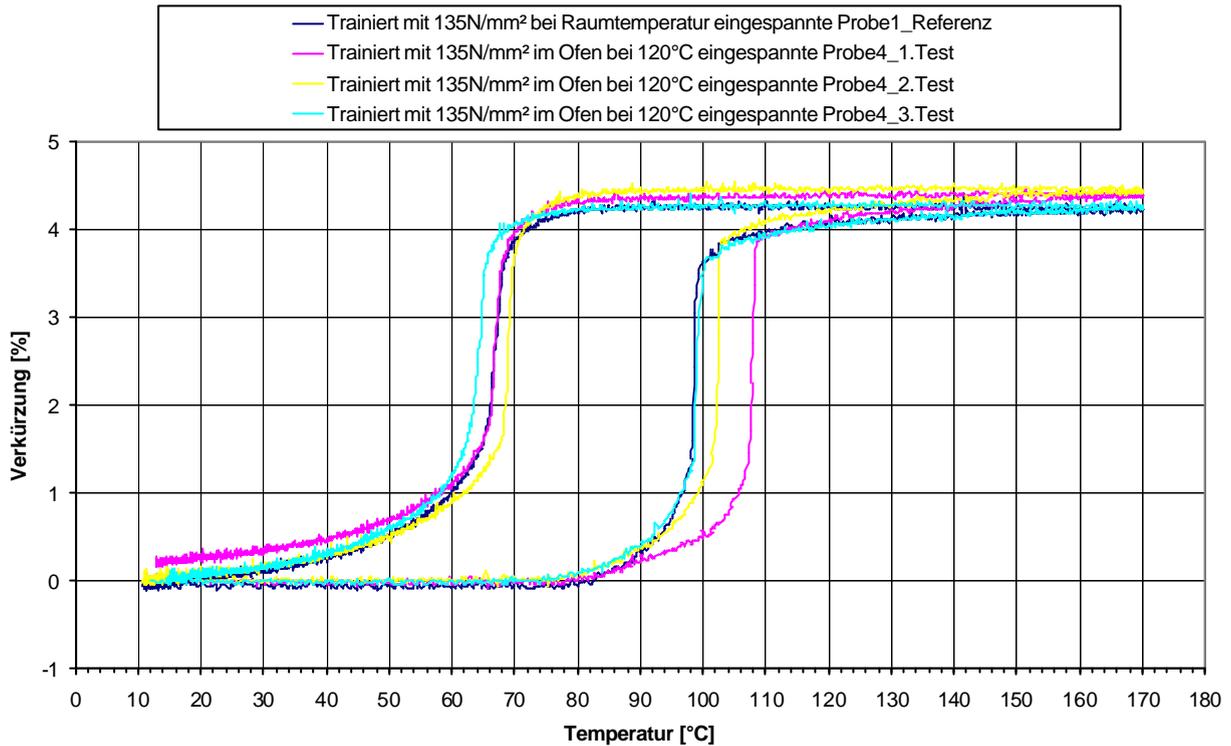
Dies ist unter dem Begriff "Effekt der ersten Umwandlung" bekannt und bedeutet, dass aufgrund von Auslagerungseffekten bei der erstmaligen Phasenumwandlung sowohl die Umwandlungstemperaturen, als auch die Effektgröße deutlich höhere Werte aufweisen, als bei den weiteren Umwandlungen. Je stärker diese Auslagerungseffekte sind (Temperatur, Zeit), desto stärker ist auch die entsprechende Verschiebung.

Weiterhin ist auffallend, dass die erreichten Verkürzungen zwischen 4% und 5% schwanken. Diese relativ große Schwankung trat vor allem bei den ersten Versuchen auf, nahm jedoch immer mehr ab. Deshalb wurde die hier gezeigte Schwankung nicht überbewertet.



**Abb. 10-1 140°C\_4 Tage\_Test 1,2 &3 mit Referenz (RT\_4 Tage)**

Abbildung 10-2 zeigt die Ergebnisse für die 24 Tage bei 120°C ausgelagerten Proben, wieder mit Referenz (24 Tage RT). In diesem Diagramm wurde aus den drei Messkurven für den ersten, zweiten und dritten Test sowie für die Referenz eine Mittelwertkurve gebildet. Die übersichtliche Darstellung zeigt beispielsweise die geringe Schwankung hinsichtlich der maximal erreichten Verkürzung. Auch die entsprechenden Umwandlungstemperaturen bei der Erwärmung sind deutlicher zu sehen als in einer Gesamtdarstellung (vergleiche Abbildung 10-1). Mit den roten Balken wird die Erhöhung der Umwandlungstemperatur beim ersten Test und die Annäherung auf das Niveau der Referenzprobe dargestellt.

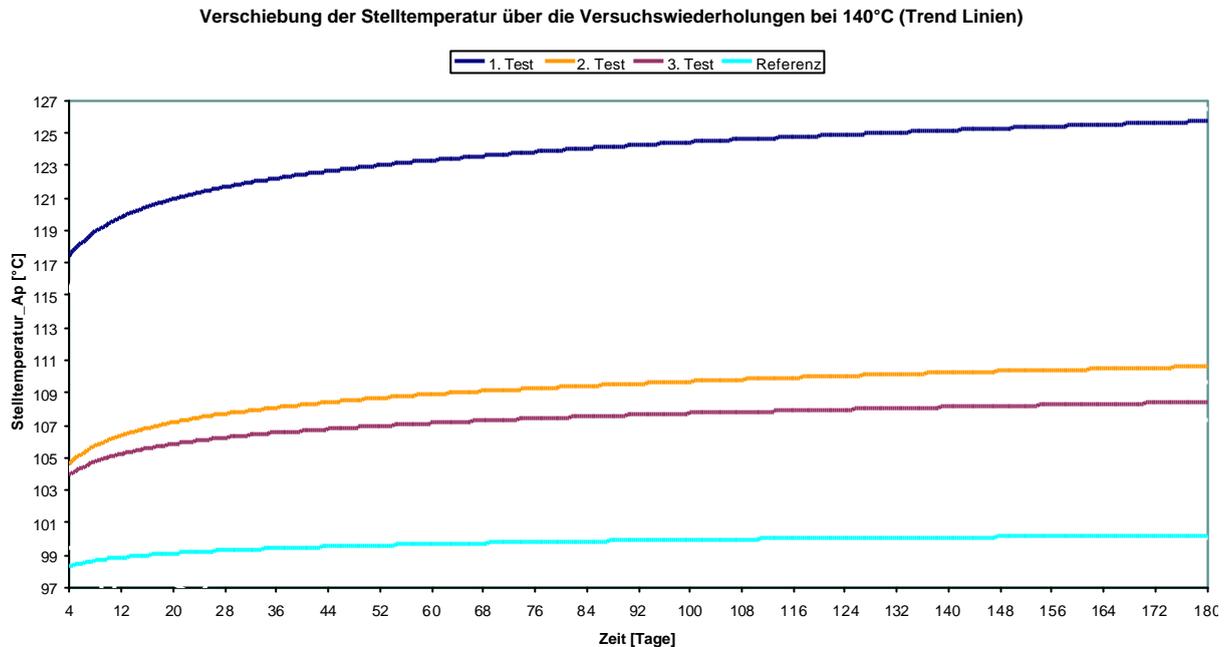


**Abb. 10-2 120°C\_24 Tage\_Test 1,2 &3 mit Referenz (RT\_24 Tage)**

Aus allen durchgeführten Versuchen wurden derartige Diagramme erstellt und die Umwandlungstemperaturen bei der Aufheizkurve (Stelltemperatur  $A_p$ ) aus den Excel Tabellen rechnerisch bestimmt. Alle Diagrammblätter sind im Werkstoffprüflabor in mehreren DIN A4 Ordnern archiviert, jedoch diesem Bericht in elektronischer Form auf CD beigelegt.

Die auf diese Weise ermittelten Stelltemperaturen wurden in den nachfolgenden Gesamtdiagrammen übersichtlich als Trendlinien dargestellt. Für jede Auslagerungstemperatur wurde ein solches Gesamtdiagramm erstellt. Abbildung 10-3 zeigt die Ergebnisse für die 140°C-Reihe. Es ist deutlich erkennbar, wie die Stelltemperatur beim ersten Test zu höheren Temperaturen verschoben ist. Im Vergleich zur Stelltemperatur der Referenzproben, die über die gesamten Auslagerungszeiten annähernd konstant bei ca. 99°C bis 101°C liegt, beträgt die Verschiebung beim ersten Test anfänglich ca. 20°C, gegen Ende der Auslagerungsdauer sogar 26°C. Die Trendlinien für den zweiten und dritten Test verlaufen sehr ähnlich. Die anfängliche Erhöhung der Stelltemperatur gegenüber den Referenzproben beträgt hier allerdings nur 6°C bzw. 5°C, gegen Ende der Auslagerungszeit 10°C bzw. 7°C. Allen Kurven ist gemein, dass die Stelltemperatur mit zunehmender Auslagerungszeit

leicht nach oben steigt. Hieraus ist zu folgern, dass die hohe Auslagerungstemperatur sofort einen großen Einfluss auf die Verschiebung der Stelltemperatur hat. Darüber hinaus steigen alle Trendlinien mit zunehmender Auslagerungsdauer leicht an.



**Abb. 10-3 Stelltemperaturen der 140°C-Reihe bis 180 Tage**

Abbildung 10-4 zeigt die Gesamtergebnisse der Stelltemperaturen der 120°C-Reihe. Auch hier ist festzustellen, dass alle Trendlinien bei zunehmender Auslagerungszeit leicht zunehmen. Im Gegensatz zur 140°C-Reihe liegen die Trendlinien der ersten, zweiten und dritten Umwandlung jedoch auf niedrigerem Niveau. Im Vergleich zur Stelltemperatur der Referenzproben, die auch hier über die gesamten Auslagerungszeiten annähernd konstant bei ca. 97°C bis 100°C liegt, beträgt die Verschiebung beim ersten Test anfänglich ca. 11°C, gegen Ende der Auslagerungsdauer 14°C. Die Trendlinien für den zweiten und dritten Test verlaufen hier noch enger beieinander. Die anfängliche Erhöhung der Stelltemperatur gegenüber den Referenzproben beträgt hier für beide Kurven ca. 5°C bis 6°C, gegen Ende der Auslagerungszeit 6°C bis 7°C. Der Versuch zeigt somit eine geringere Erhöhung der Trendlinien gegenüber der 140°C-Reihe.

Verschiebung der Stelltemperatur über die Versuchswiederholungen bei 120°C (Trend Linien)

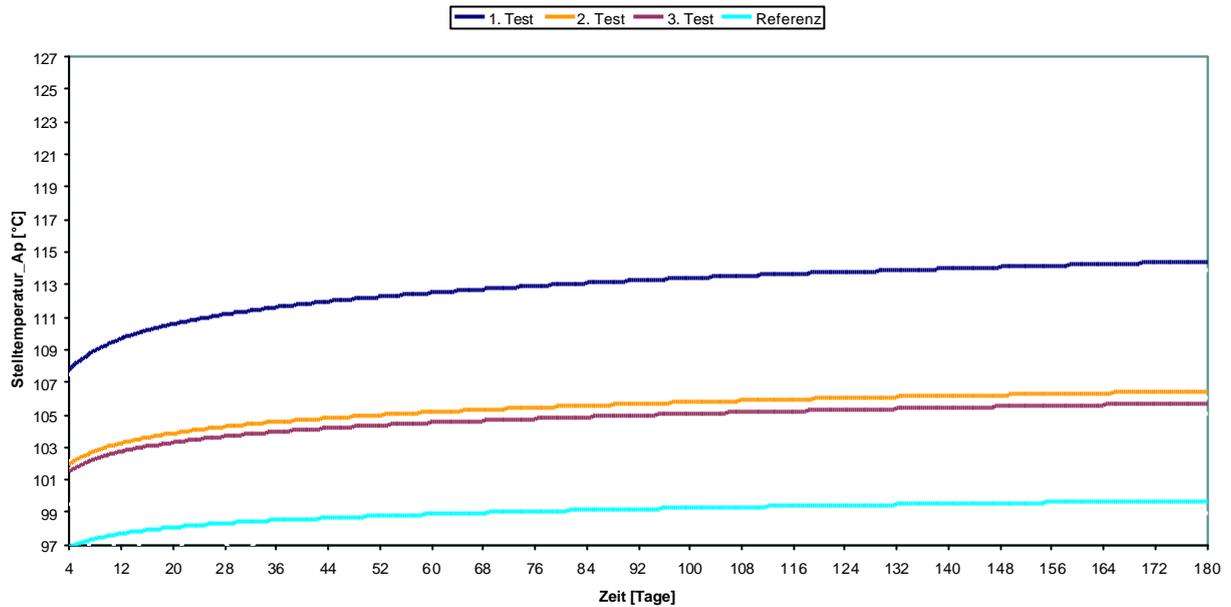


Abb. 10-4 Stelltemperaturen der 120°C-Reihe bis 180 Tage

Die folgenden Abbildungen 10-5, 10-6 und 10-7 zeigen die entsprechenden Trendlinien für die Temperaturreihen 100°C, 80°C und 60°C. Bei allen drei Temperaturreihen lässt sich die leichte Erhöhung der Stelltemperatur bei zunehmender Auslagerungsdauer feststellen. Die anfängliche Verschiebung ist ebenfalls deutlich geringer als bei den höheren Auslagerungstemperaturreihen.

Verschiebung der Stelltemperatur über die Versuchswiederholungen bei 100°C (Trend Linien)

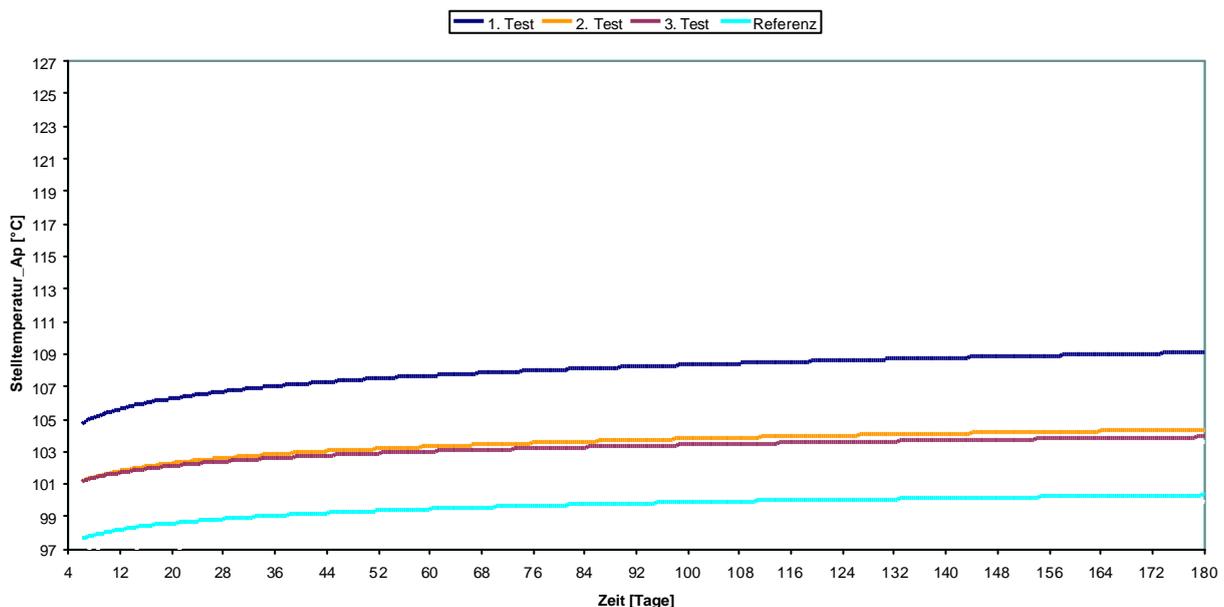


Abb. 10-5 Stelltemperaturen der 100°C-Reihe bis 180 Tage

Verschiebung der Stelltemperatur über die Versuchswiederholungen bei 80°C (Trend Linien)

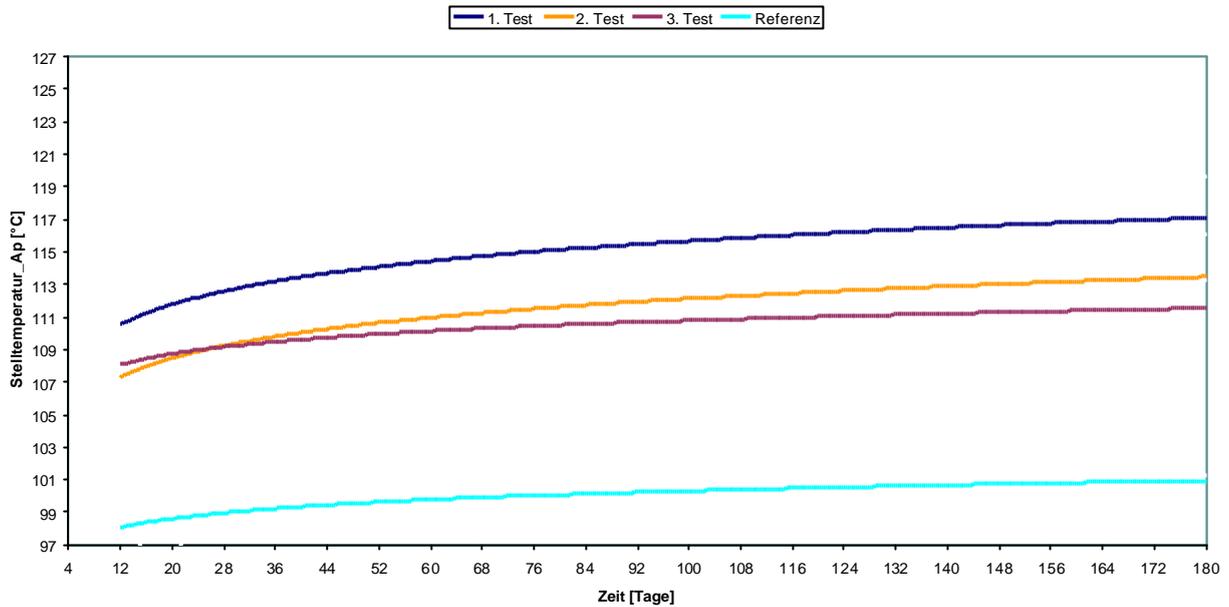


Abb. 10-6 Stelltemperaturen der 80°C-Reihe bis 180 Tage

Verschiebung der Stelltemperatur über die Versuchswiederholungen bei 60°C (Trend Linien)

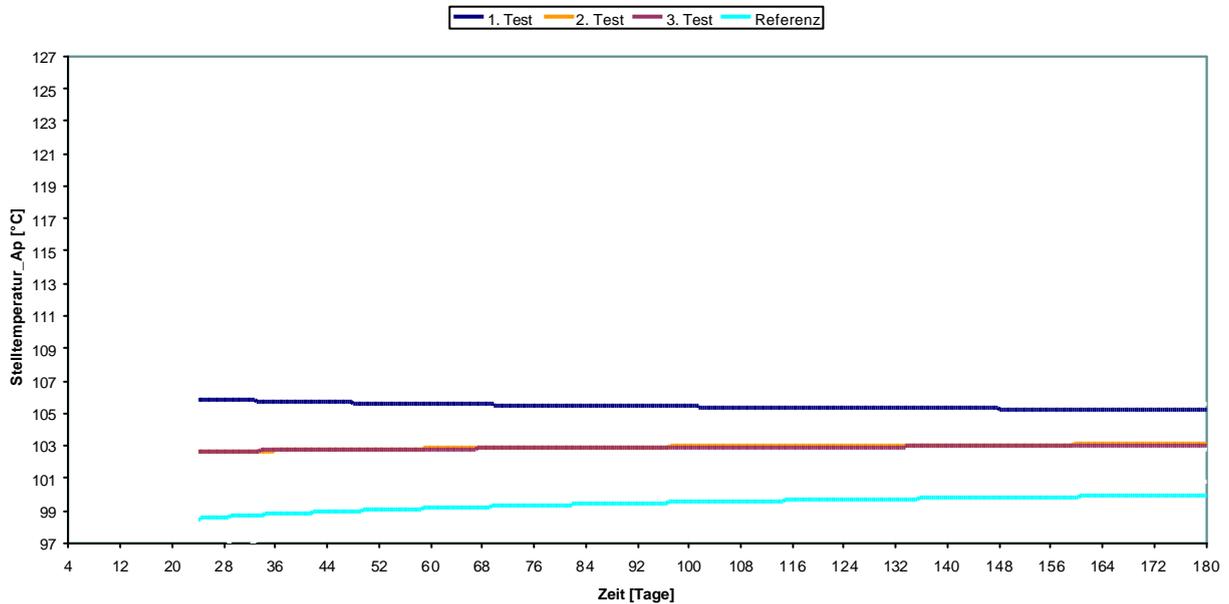
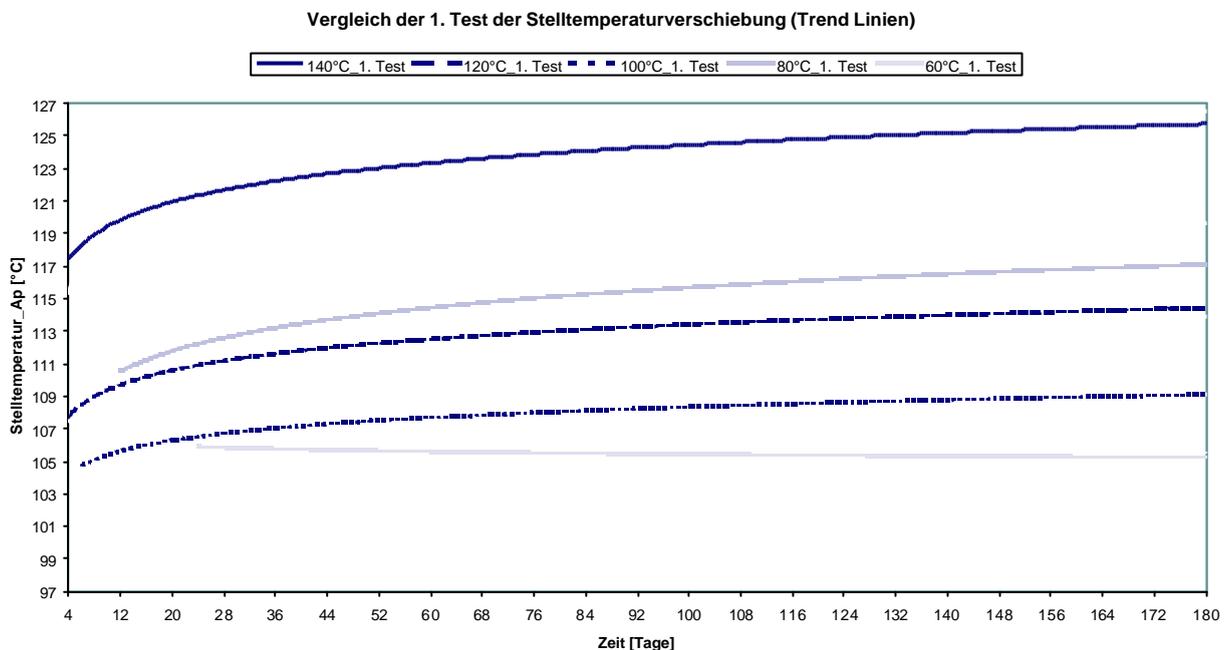


Abb. 10-7 Stelltemperaturen der 60°C-Reihe bis 180 Tage

In Abbildung 10-8 sind alle Trendlinien des ersten Tests der unterschiedlichen Auslagerungstemperaturreihen im Vergleich zu Referenz dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die große Verschiebung der Stelltemperatur bei der 140°C-Reihe mit

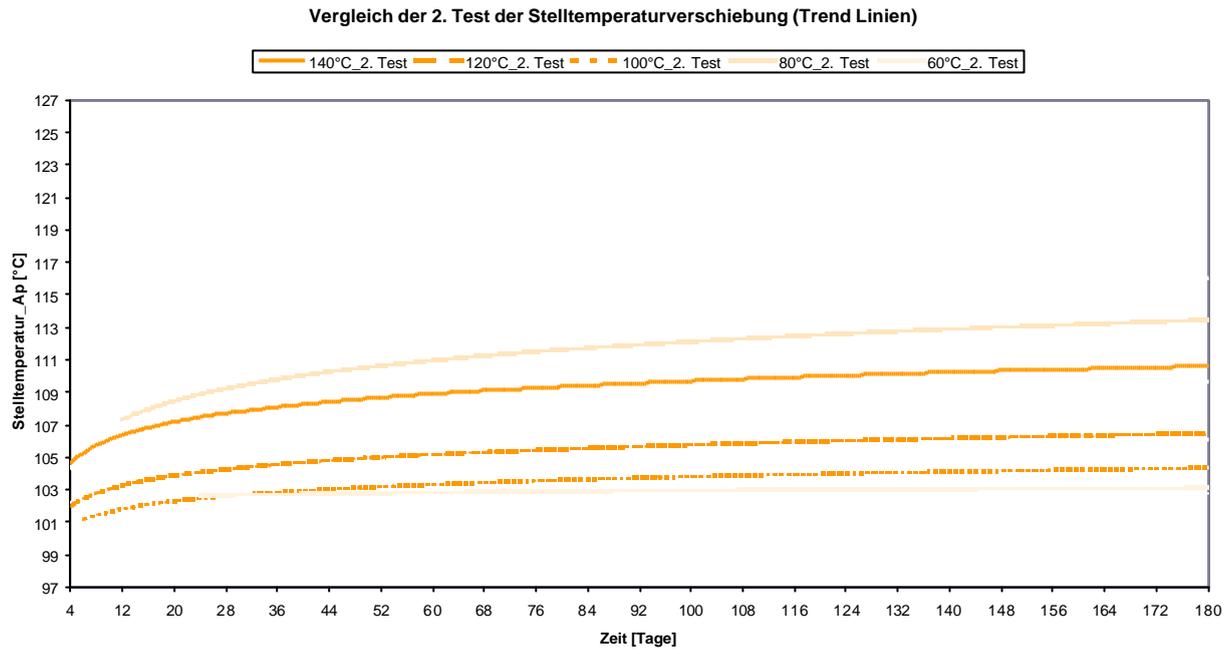
sinkenden Auslagerungstemperaturen schrittweise abnimmt. Einzige Ausnahme ist die Trendlinie für die 80°C-Reihe, die sogar etwas oberhalb der 120°C-Reihe liegt.

Der wahrscheinliche Grund dafür, dass die 80°C-Reihe „nicht in die Reihenfolge passt“, liegt unserer Meinung nach an der Umwandlungstemperatur der Ausgangsdrahte. Diese liegt beim unbehandelten und nicht ausgelagerten Material zwischen ca. 75°C und 90°C, unter Zugbeanspruchung wie in der Spannvorrichtung etwas höher. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass bei allen ermittelten Versuchen die Werte bei der 80°C-Reihe nicht ins Gesamtbild passen. Bei dieser Auslagerungstemperatur ist der Auslagerungszustand nicht genau definiert.

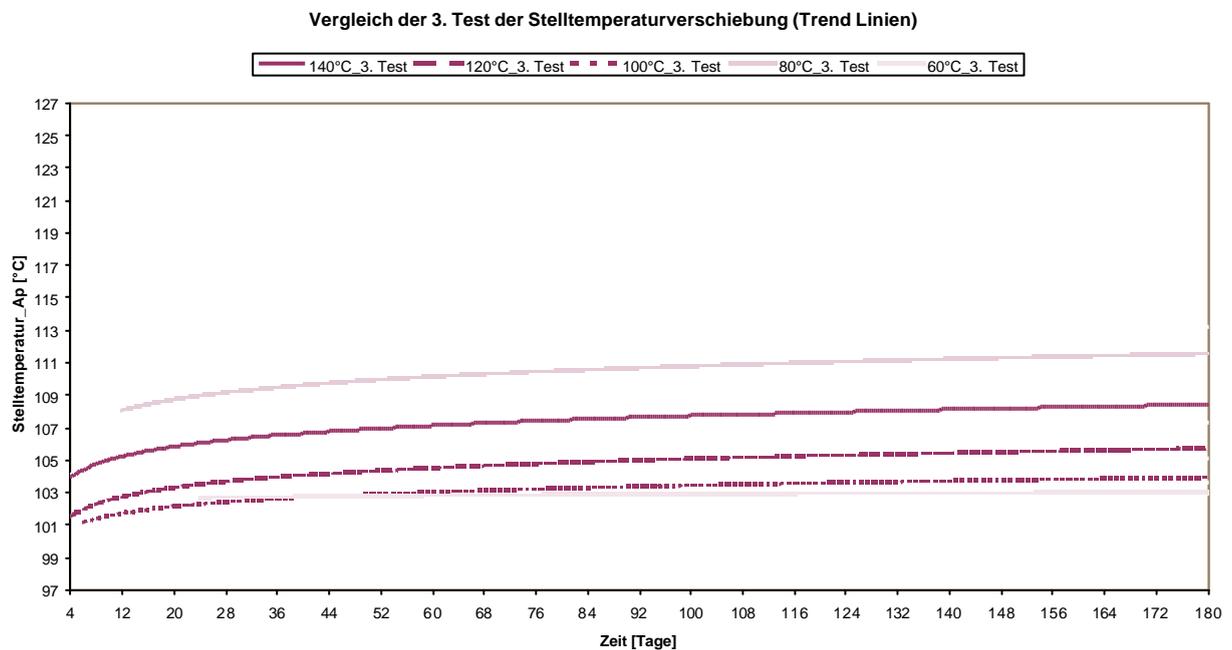


**Abb. 10-8 Vergleich des 1. Tests der Stelltemperaturverschiebung**

Die beiden Abbildungen 10-9 und 10-10 zeigen den Vergleich der Stelltemperaturverschiebungen des zweiten und dritten Tests. Auch hier wird ersichtlich, dass die Trendlinien für die 80°C-Reihe nicht in die Abfolge der anderen Auslagerungstemperaturreihen eingereiht sind. Bei beiden Tests sind die Trendlinien der 80°C-Reihen sogar höher, als bei der 140°C-Reihe. Für die anderen Auslagerungstemperaturreihen gilt wie beim ersten Versuch, dass mit abnehmender Auslagerungstemperatur die Verschiebung kleiner wird.

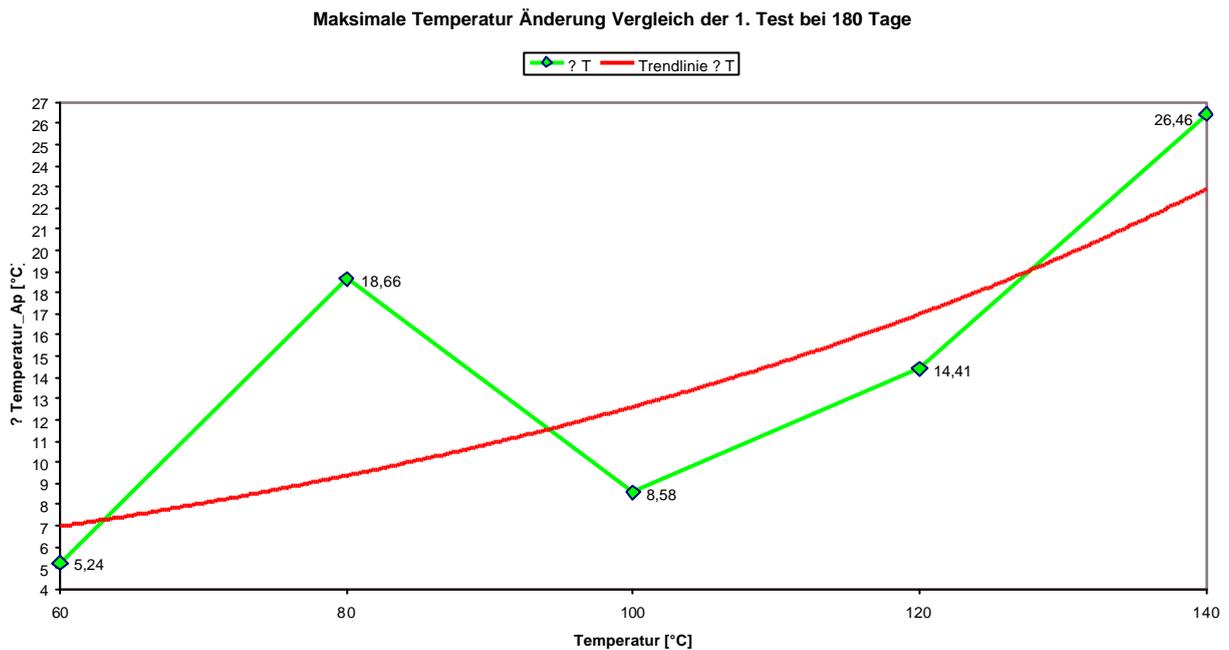


**Abb. 10-9 Vergleich des 2. Tests der Stelltemperaturverschiebung**



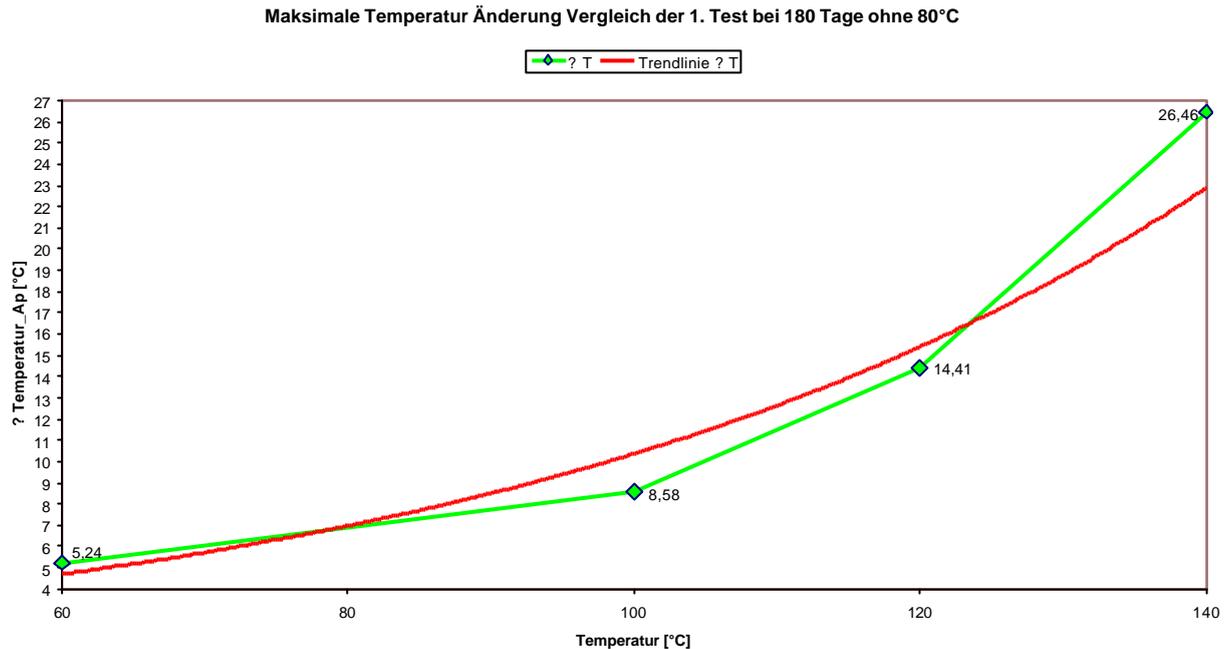
**Abb. 10-10 Vergleich des 3. Tests der Stelltemperaturverschiebung**

Abbildung 10-11 zeigt die Verschiebung der Stelltemperaturen der ersten Tests der Reihen 60°C bis 140°C im Vergleich zur Stelltemperatur der Referenz. Der Betrag der Verschiebungen gegenüber der Referenz wurde als  $\Delta T_{\text{Temperatur\_Ap}}$  über den verschiedenen Auslagerungstemperaturreihen aufgetragen. Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Erhöhung der Stelltemperatur mit zunehmender Auslagerungstemperatur kontinuierlich steigt. Einzige Ausnahme ist wieder der Wert für die 80°C-Reihe.



**Abb. 10-11 Maximale Temperatur Änderung der 1.Tests**

Deshalb wurde in Abbildung 10-12 diese Verschiebung ohne den Wert für die 80°C-Reihe dargestellt. Aus bereits geschilderten Gründen sollte die Betrachtung der Verschiebung der Stelltemperatur im Verlauf der Auslagerungsdauer ohne diese „Ausreißer Reihe“ erfolgen.



**Abb. 10-12 Maximale Temperatur Änderung der 1.Tests ohne 80°C**

### Schlussfolgerung der Ölbadversuche

An dieser Stelle kann zwar gefolgert werden, dass sowohl Auslagerungstemperatur als auch Auslagerungsdauer einen messbaren Effekt im FG-Material bewirken. Allerdings ist kein Rückschluss auf die Funktion in der ausgewählten Anwendung der Motorhaubenanhebung möglich. Dies kann nur im Laser Test überprüft werden. Anhand der im Ölbad durchgeführten Versuche kann lediglich festgestellt werden, dass es eine messbare Verschiebung der Stelltemperatur durch die Auslagerung gibt, die im ersten Stellvorgang höher ist, als bei den nachfolgenden Stellvorgängen. Diese Verschiebung fällt umso stärker aus, je höher die Auslagerungstemperatur ist. Insgesamt ist diese Verschiebung jedoch als relativ gering einzuschätzen. Darüber hinaus erfolgt diese Verschiebung stets zu höheren Temperaturen, was im Falle der Motorhaubenanhebung sogar gewünscht wäre – sofern die Funktion gewährleistet ist.

Gleichzeitig bedeutet diese Verschiebung zu höheren Stelltemperaturen aber auch, dass der Aktordraht für seine Aktivierung auf eine höhere Temperatur gebracht werden muss, also eine höhere Energie eingebracht werden muss. Ob bei gleichbleibender Aktivierungsenergie dennoch der Aktordraht in der gleichen Zeit zur Verkürzung gebracht werden kann, zeigen ebenfalls erst die Laserversuche.

### 10.1.2 Zusatzversuch mit kurze Auslagerungsdauer bei 140°C

Gegen Ende dieses Forschungsprojektes kam in den Diskussionen über die Versuchsergebnisse immer wieder die Frage auf, wie diese Verschiebung der Stelltemperatur zu Beginn der Auslagerung erfolgt. Da die am kürzesten ausgelagerten Probendrähte 4 Tage ausgelagert wurden, beginnen die Gesamtdiagramme 10-3 bis 10-10 folglich nicht bei einer Auslagerungsdauer von vier Tagen. Da bei den meisten Kurven zu diesem Zeitpunkt schon eine deutliche Anhebung der Stelltemperatur erfolgte (besonders bei den Versuchsreihen bei höheren Auslagerungstemperaturen), beginnt die Trendlinie auch in diesem Bereich.

Um nun zu untersuchen, ob diese Verschiebung der Stelltemperatur ausschließlich die Folge der erhöhten Auslagerungstemperatur, oder schon ein erster Effekt der Auslagerungsdauer ist, wurde beschlossen zur Klärung dieser Frage einen zusätzlichen Versuch zu fahren. Dieser soll zeigen, ob schon nach einer sehr kurzen Erwärmung eine Verschiebung der Stelltemperatur erfolgt.

Hierfür wurde die höchste Auslagerungstemperatur gewählt, da die Verschiebung der Stelltemperatur dort ihren größten Betrag hat. Dazu wurden von den verbliebenen 12 Reservedrähten in der bei RT ausgelagerten Einspannvorrichtung sechs Drähte ausgebaut und die restlichen 6 in dem Auslagerungssofen auf 140°C erwärmt. Die Auslagerungszeit bei RT lag am Tag der Versuchsdurchführung bei 359 Tagen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wären trainierte und nichtausgelagerte Drähte besser gewesen, jedoch gab es keine derartigen Reservedrähte. Um eine sichere Durchwärmung der Versuchsdrähte trotz der mit eingebrachten Masse der Einspannvorrichtung zu gewährleisten, wurde die Auslagerungszeit auf 1 Stunde festgelegt.

Die Ölbadversuche mit diesen kurz ausgelagerten Proben bei 140°C ergaben eine Verschiebung der Stelltemperatur im ersten Test auf einen Wert von 106°C. Der entsprechende Wert nach einer Auslagerungszeit von 4 Tagen lag bei 115°C (jeweils Mittelwerte aus den drei untersuchten Probendrähten). Bezogen auf den Referenzwert von 99°C (4 Tage bei RT ausgelagerte Proben), erfolgt daher knapp 44% der Stelltemperaturverschiebung zwischen 0 und 4 Tagen schon in der ersten

Stunde. Auch bei dem zweiten und dritten Test fiel die Verschiebung der Stelltemperatur nach dieser kurzen Auslagerung von 1 Stunde (entspricht ca. 0,04 Tagen) in dieser Größenordnung aus. Dies lässt folgern, dass die anfängliche Verschiebung der Stelltemperatur eine direkte Folge der erhöhten Auslagerungstemperatur ist und noch keine Auswirkung der Auslagerungsdauer auf den Draht eintrat. Wie bereits erwähnt, standen für diesen Versuch jedoch nur Probendrähte zur Verfügung, die bereits 359 Tage bei RT in der Einspannvorrichtung ausgelagert wurden. Deshalb ist diese Folgerung nur unter Vorbehalt gültig.

In Abbildung 10-13 sind die Trendlinien der Verschiebung der Stelltemperaturen für die Auslagerungsreihe bei 140°C für den ersten, zweiten und dritten Test über die gesamte Auslagerungsdauer unter Berücksichtigung der Werte dieses Zusatzversuches aufgezeichnet. Es ist somit das einzige Gesamtdiagramm, das die Auslagerungszeit bei 0 Tagen beginnend auf der x-Achse zeigt.

Im Vergleich zur Abbildung 10-3 zeigen die Trendlinien nun im Anfangsbereich einen stärkeren Anstieg, da der niedrigere Wert bei 0,04 Tagen berücksichtigt wird. Der weitere Verlauf der Trendlinien ist entsprechend stärker zunehmend. Aber auch dieses Diagramm führt zu den gleichen Folgerungen, die am Ende des Kapitels 10.1.1 beschrieben wurden.

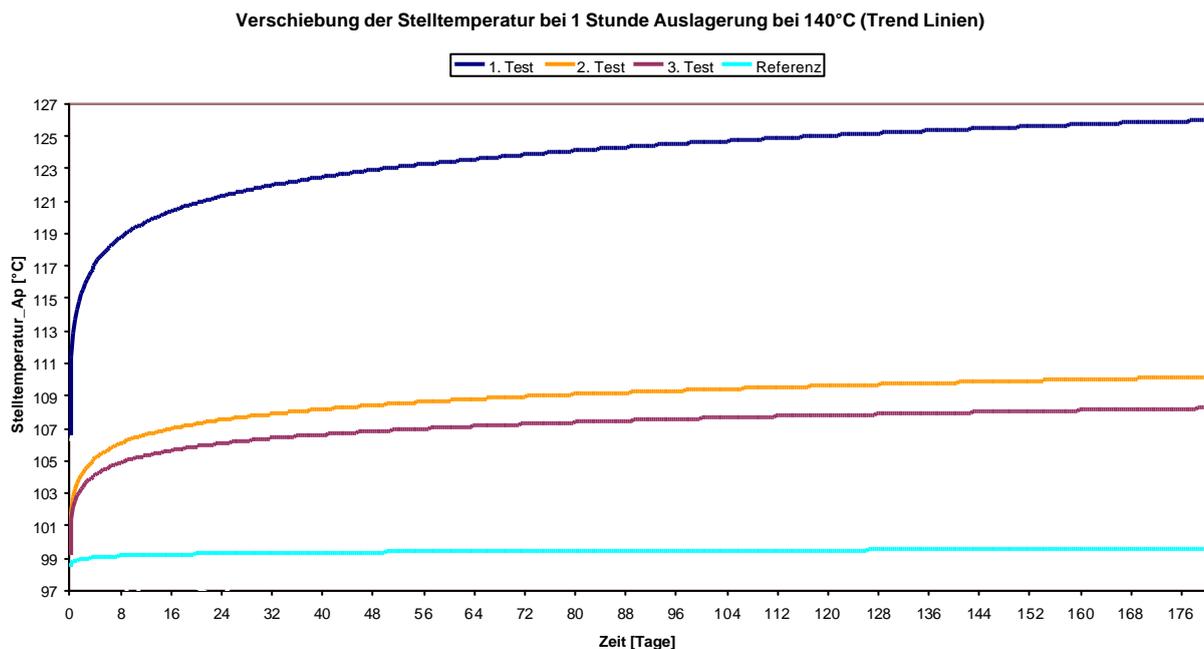


Abb. 10-13 Verschiebung der Stelltemperatur bei einer Stunde Auslagerung bei 140°C

## 10.2 Laser

Im Gegensatz zur Versuchsdurchführung bei dem Ölbadprüfstand nimmt die Untersuchung eines Drahtes hier eine sehr viel geringere Zeit in Anspruch. Inklusive der Rüstzeiten für Draht-Ein- und Ausbau dauerte ein Versuch ca. 30 Minuten. Darüber hinaus konnten, wie an anderer Stelle bereits erwähnt, der Laserprüfstand und der Ölbadprüfstand nicht gleichzeitig bedient werden. Aus diesen beiden Gründen wurden die Versuche am Laserprüfstand erst am Ende der Projektlaufzeit durchgeführt, nachdem die Ölbadversuche abgeschlossen waren. Ein sich daraus ergebender Vorteil ist sicherlich, dass die Prüfbedingungen bei all den Laserversuchen annähernd gleich waren. Zwar gab es sicherlich Schwankungen bezüglich der Umgebungstemperatur (morgens/abends, Sonneinstrahlung, Zugluft), jedoch gab es ansonsten keinerlei Umbauten am Prüfstand, auch die Messkabel und LabView-Einstellungen waren stets dieselben.

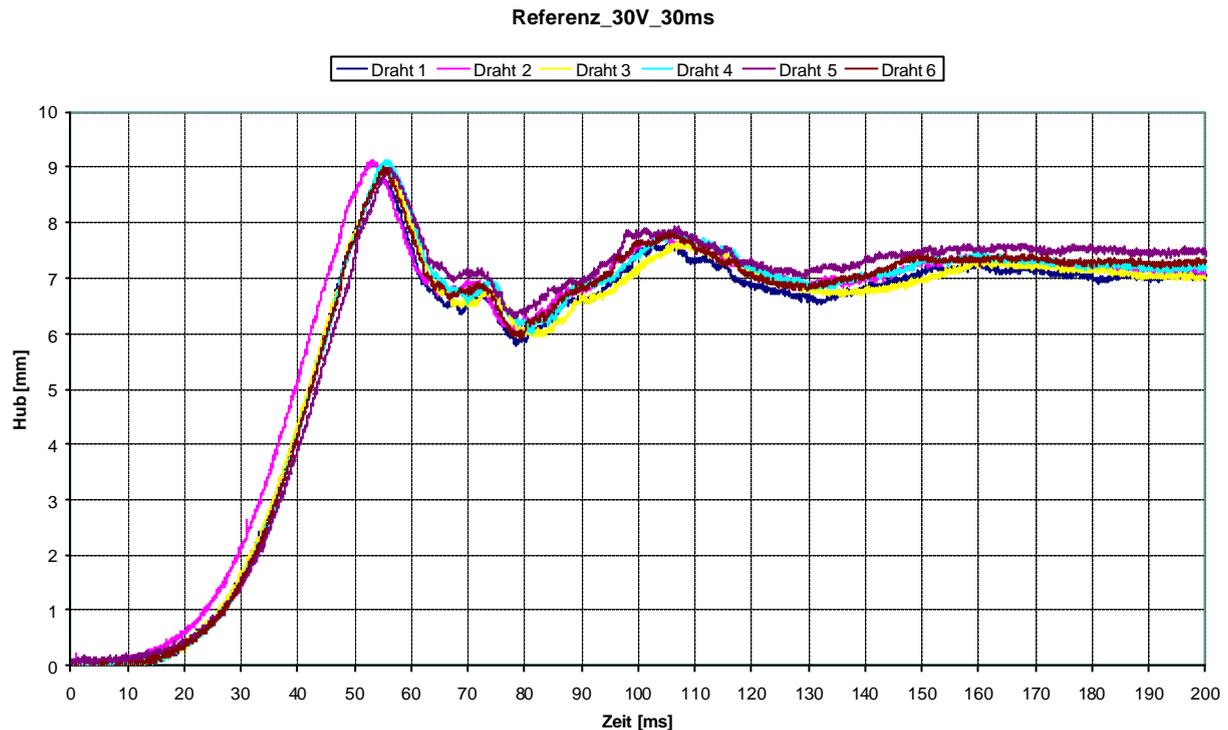
Zunächst wurden mit einem Satz Proben aus der bei RT ausgelagerten Einspannvorrichtung die Versuche entsprechend den Parametern aus Kapitel 9.3.2 durchgeführt, d.h. der 47000 $\mu$ F-/100V-Kondensator wurde bis zu einer Spannung von 30V aufgeladen und aktivierte bei Auslösung den eingespannten Probendraht mit einer Pulsdauer von 30ms. Abbildung 10-14 zeigt die über LabView ermittelten Daten in einem Excel-Diagramm, in dem der Hub über der Zeit aufgetragen ist. Der Hub entspricht dabei der Verkürzung der Drahtprobe.

Alle sechs Kurvenverläufe sind sehr ähnlich. Nach einer Anfangszeit von ca. 12ms steigt die Kurve auf ein Maximum von 9mm steil an. Diese Verkürzung erfolgt innerhalb von 55ms. Dann schlägt das an der Probe befestigte Gewicht an den vorgesehenen Anschlag, der aus einem Kunststoffprotector besteht. Da dieser Protector nicht die gesamte Energie dieses Impulses aufnehmen und absorbieren kann, schlägt das Gewicht etwas zurück. Dies zeigt sich in dem Abfall der Kurven von 9mm bis auf ca. 6mm bei 80ms. Danach steigt die Kurve wieder auf einen Wert zwischen 7,5 und 8mm an (100-110ms) und schwingt sich bis zum gezeigten Ende der Kurve auf einen Wert zwischen 7 und 7,5mm ein (200ms).

Aus den Vorversuchen ist bekannt (Kapitel 9.3), dass die Drahtproben innerhalb der ersten 500ms auf diesem Niveau bleiben, also sich im austenitischen Zustand maximaler Verkürzung befinden, und erst nach 5000ms bis 10000ms wieder vollständig in den martensitischen Ausgangszustand zurückgehen. Für die Referenzkurve bedeutet dies, dass sich die Proben um „maximal 7mm“ verkürzen, jedoch aufgrund der hohen Dynamik des Versuchsablaufes einen höheren Wert erreichen können, der aber durch den Versuchsaufbau auf 9mm begrenzt wurde.

Im dargestellten Diagramm zeigt sich eine leichte Abweichung des Drahtes 2 gegenüber den anderen fünf Drähten. Bei diesem Draht erfolgt die Verkürzung minimal früher, was dazu führt, dass die 9mm-Spitze ca. 3ms früher erreicht wird. Da aber die Kurven der anderen fünf Drähte annähernd gleich verlaufen und der Unterschied zur Kurve des Drahtes 2 sehr gering ist, wurde dennoch aus allen Ergebnissen eine Mittelwertskurve gebildet, die im Weiteren als Referenzkurve verwendet wird.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass diese Referenzkurve ebenfalls erst zum Ende der Projektlaufzeit durchgeführt wurde und daher die trainierten Proben verwendet wurden, die 310 Tage bei RT unter Zugspannung in der Einspannvorrichtung ausgelagert wurden. Besser geeignete Referenzproben standen nicht zur Verfügung.

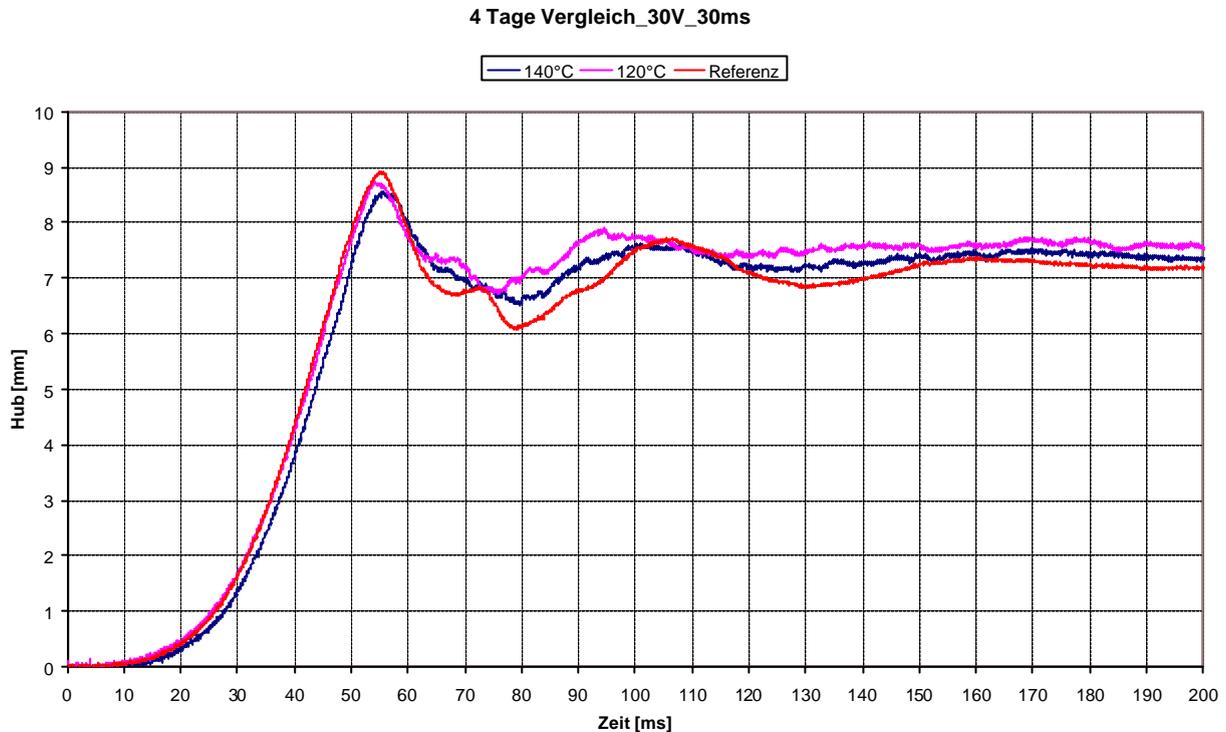


**Abb. 10-14 Ergebnisse der sechs Referenzproben**

Bei allen weiteren Versuchen am Laserprüfstand wurden stets zwei Drahtproben von einer entsprechenden Auslagerungszeit und Auslagerungsdauer getestet. Daraus wurde ein Mittelwert gebildet und dargestellt. Während der Versuche zur 120°C-Reihe trat an zwei Proben ein Bruch auf. Diese Brüche traten beides Mal am Drahtanfang auf, und zwar genau an der Einspannstelle der Drähte in der Einspannvorrichtung (Übergang auf die Messingklemmplatten). Da die Schwankungen der beiden Parallelproben in allen Fällen sehr gering waren und diese beiden Brüche bei zwei unterschiedlichen Parallelproben auftraten (120°C\_40 Tage bzw. 120°C\_120 Tage), wurde die Kurve der einen Probe als Mittelwert verwendet.

In Abbildung 10-15 sind die Ergebnisse nach einer Auslagerungszeit von 4 Tagen dargestellt. Zu diesem Auslagerungszeitpunkt wurden von den niedrigeren Temperaturreihen noch keine Drahtproben entnommen, weshalb hier nur die Kurven für die 140°C-Reihe und 120°C-Reihe aufgezeichnet sind. Im Vergleich zur Referenzkurve können keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden, lediglich bei der Maximalhöhe des Hubes lässt sich eine kleine Abweichung erkennen. Die bei hoher Temperatur ausgelagerten Proben erreichen einen

Maximalhub von 8,5 bzw. 8,7mm, die Referenzprobe 9mm. Allerdings erfolgt das Erreichen dieses Maximalhubes der drei verglichenen Kurven innerhalb eines kleinen Millisekundenbereichs.

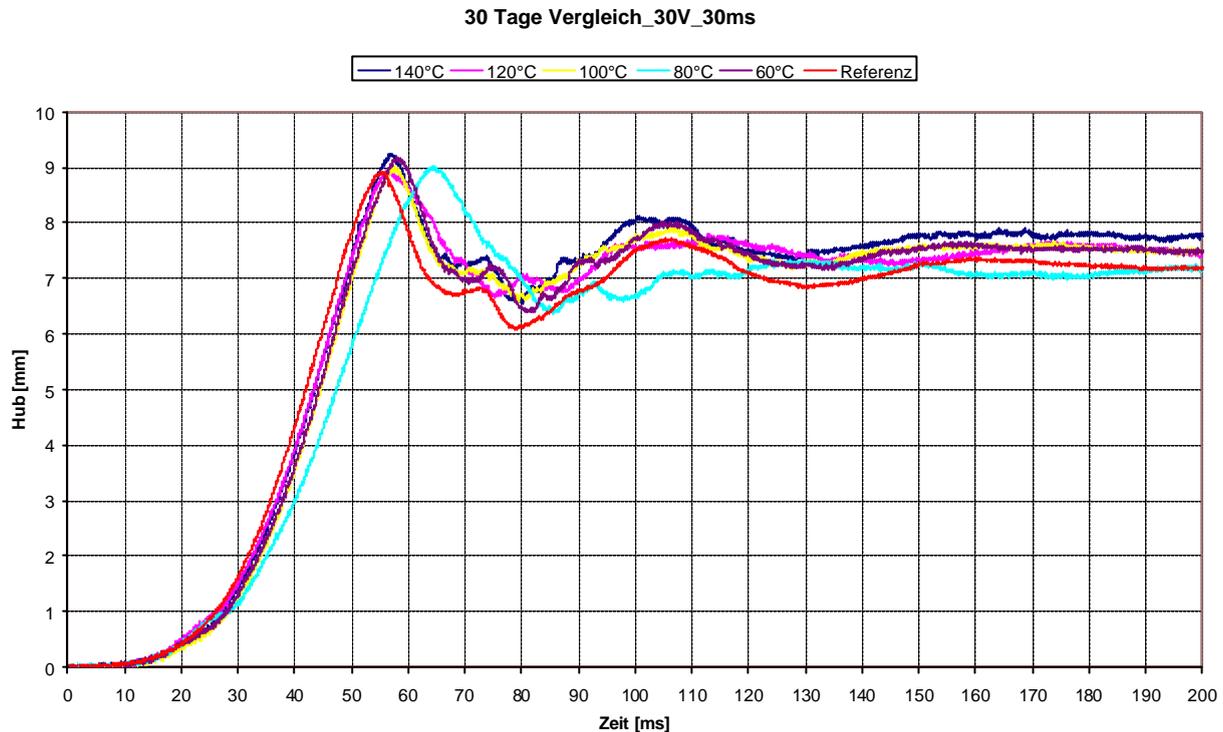


**Abb. 10-15 Ergebnisse nach 4 Auslagerungstagen**

Bei ansteigender Auslagerungszeit wurden auch von den niedrigeren Auslagerungstemperaturreihen Proben entnommen. Abbildung 10-16 zeigt alle fünf Temperaturreihen bei 30 Tagen Auslagerungszeit im Vergleich zur Referenzkurve (RT\_310 Tage). Auf den ersten Blick ist zu sehen, dass alle Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf haben – mit Ausnahme der 80°C-Reihe. Diese Kurve beginnt ihren Anstieg später und hat eine geringere Steigung. Sie erreicht ebenfalls den Maximalhub von 9 mm, allerdings ca. 8ms später als alle anderen Kurven.

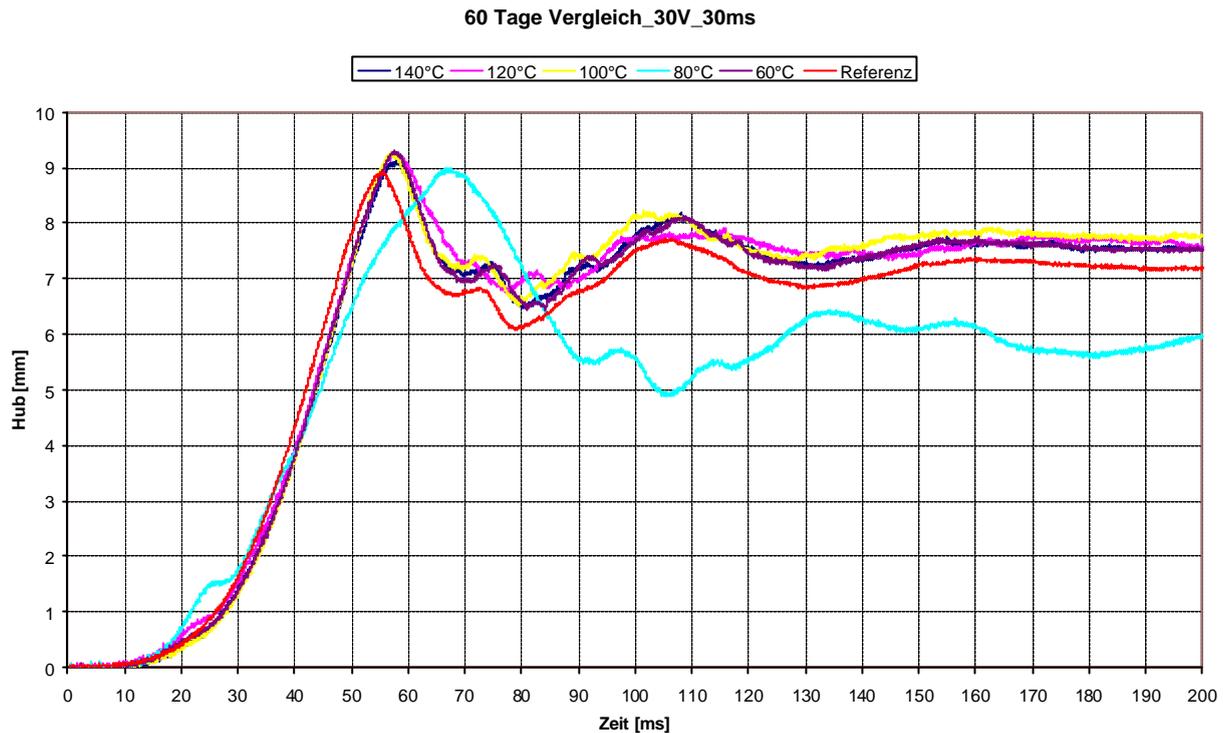
Wie auch die Ergebnisse beim Ölbadtest zeigten, ist es nicht verwunderlich, dass die Abweichung bei der 80°C-Reihe auftritt. Diese Abweichung hat ihren Grund in der Umwandlungstemperatur der Ausgangsmaterials. Diese liegt beim unbehandelten und nicht ausgelagerten Material zwischen ca. 75°C und 90°C, unter Zugbeanspruchung wie in der Spannvorrichtung etwas höher. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass bei allen ermittelten Versuchen die Werte bei der 80°C-Reihe

nicht ins Gesamtbild passen. Bei dieser Auslagerungstemperatur ist der Auslagerungszustand nicht genau definiert.



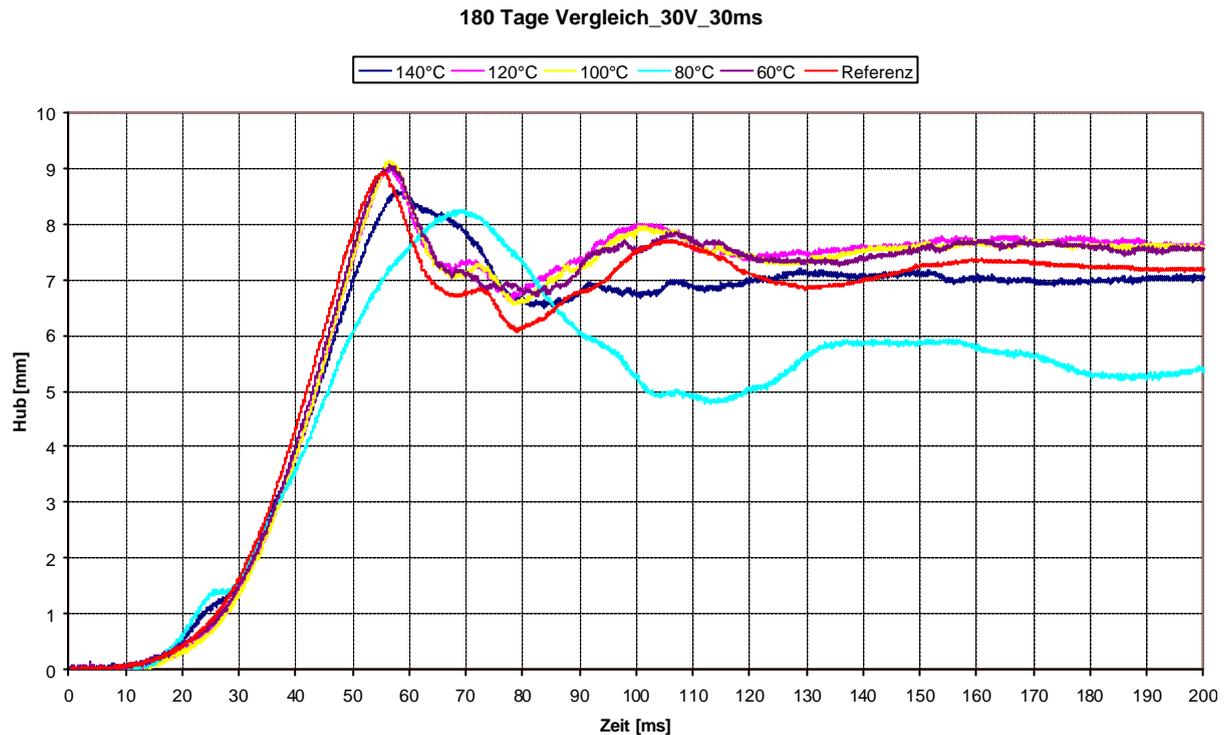
**Abb. 10-16 Ergebnisse nach 30 Auslagerungstagen**

Auch nach 60 Auslagerungstagen zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 10-17): Die Kurve der 80°C-Reihe unterscheidet sich als einzige vom Rest der Kurvenschar, die hier besonders gleichmäßig auftritt. Die Kurve 80°C-Reihe hingegen erreicht den maximalen Hub erst ca. 10 ms später und schwingt auf ein deutlich tieferes Niveau, das gut 1,6mm unter dem Niveau der Kurvenschar liegt. Zusätzlich zeigt sich im Anstiegsbereich der Kurve zwischen 20ms und 30ms eine deutliche Abweichung im Vergleich zu den anderen Kurven. Diese Abweichung trat bei allen durchgeführten Versuchen nur sehr selten auf, jedoch fast immer bei der 80°C-Reihe.



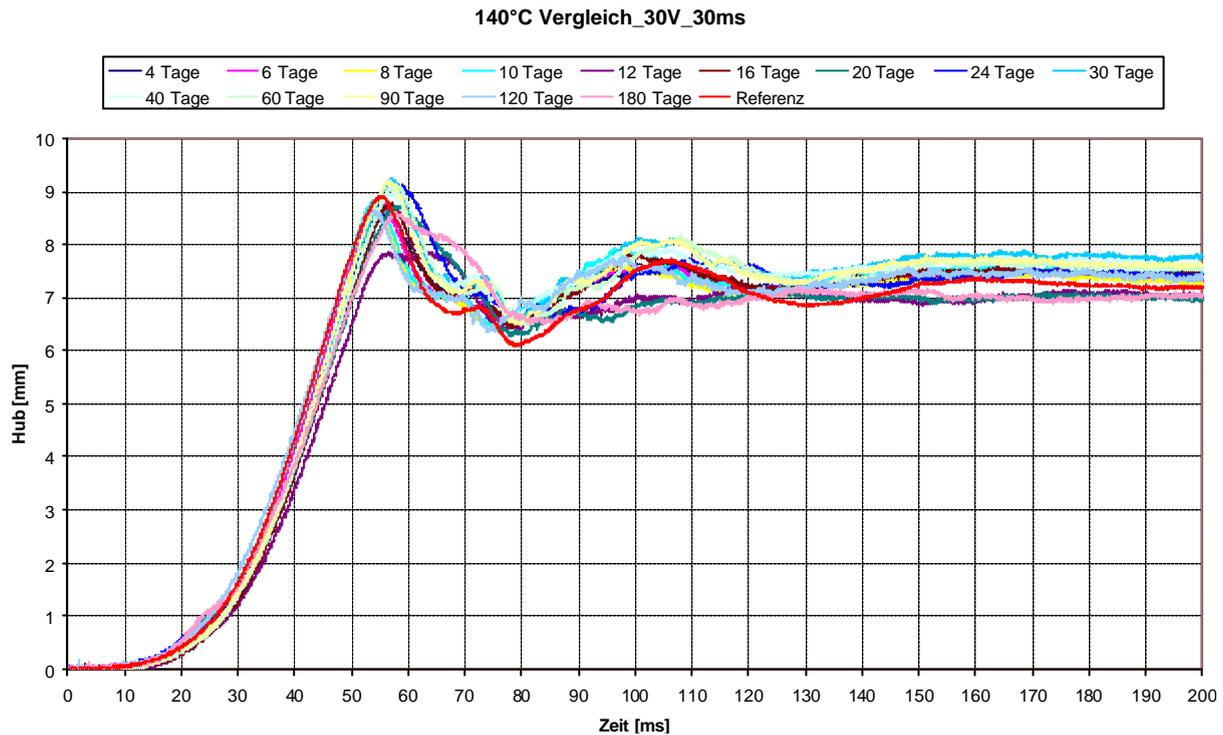
**Abb. 10-17 Ergebnisse nach 60 Auslagerungstagen**

Bei der höchsten Auslagerungsdauer von 180 Tagen ist erkennbar, dass es neben der Kurve für die 80°C-Reihe auch bei der 140°C-Reihe eine Abweichung gibt. Die Abweichung der 80°C-Kurve liegt wieder in einem flacheren Kurvenanstieg, was zu einer um ca. 15ms späteren Erreichung des Maximalhubs führt. Dieses Maximum beträgt darüber hinaus nur ca. 8,2mm. Die Abweichung bei der 140°C-Reihe ist nicht so stark und betrifft lediglich den maximalen Hub. Diese wird fast an der gleichen Stelle wie bei den anderen Kurven erreicht und liegt mit ca. 8,6mm leicht unter dem Maximalhub der anderen Reihen. Dies führt im weiteren Kurvenverlauf dazu, dass auch ein Endwert erreicht wird, der geringfügig unter dem der anderen liegt. Abbildung 10-18 zeigt außerdem, dass hier neben der Kurve für die 80°C-Reihe auch die Kurve der 140°C-Reihe im Anfangsbereich zwischen 20ms und 30ms eine leichte Abweichung auftritt. Ob bei der 140°C-Reihe ab 180 Tagen Auslagerungszeit schon materialschädigende Effekte auftreten, lässt sich mit diesen Ergebnissen jedoch nicht beantworten. Hierüber könnten Untersuchungen an den immer noch sich in den Auslagerungsöfen befindlichen Proben Auskunft geben.



**Abb. 10-18 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen**

In der folgenden Abbildung 10-19 wurden alle Versuchsergebnisse der 140°C-Reihe in einem Diagramm dargestellt, um den möglichen Effekt der Auslagerungsdauer zu untersuchen. Auch hier ist der Hub über der Zeit aufgetragen. Die Kurven verlaufen im Anfangsbereich sehr ähnlich und erreichen das Hubmaximum zwischen ca. 53ms und 57ms. Bei fast alle Kurven liegt dieses Hubmaximum im Bereich von ca. 8,5mm bis 9mm, lediglich die Kurve mit 12 Tagen Auslagerungsdauer erreicht nur ca. 7,8mm. Alle Kurven schwingen sich im weiteren Verlauf auf einen Endwert von ca. 7mm bis 7,8mm ein.



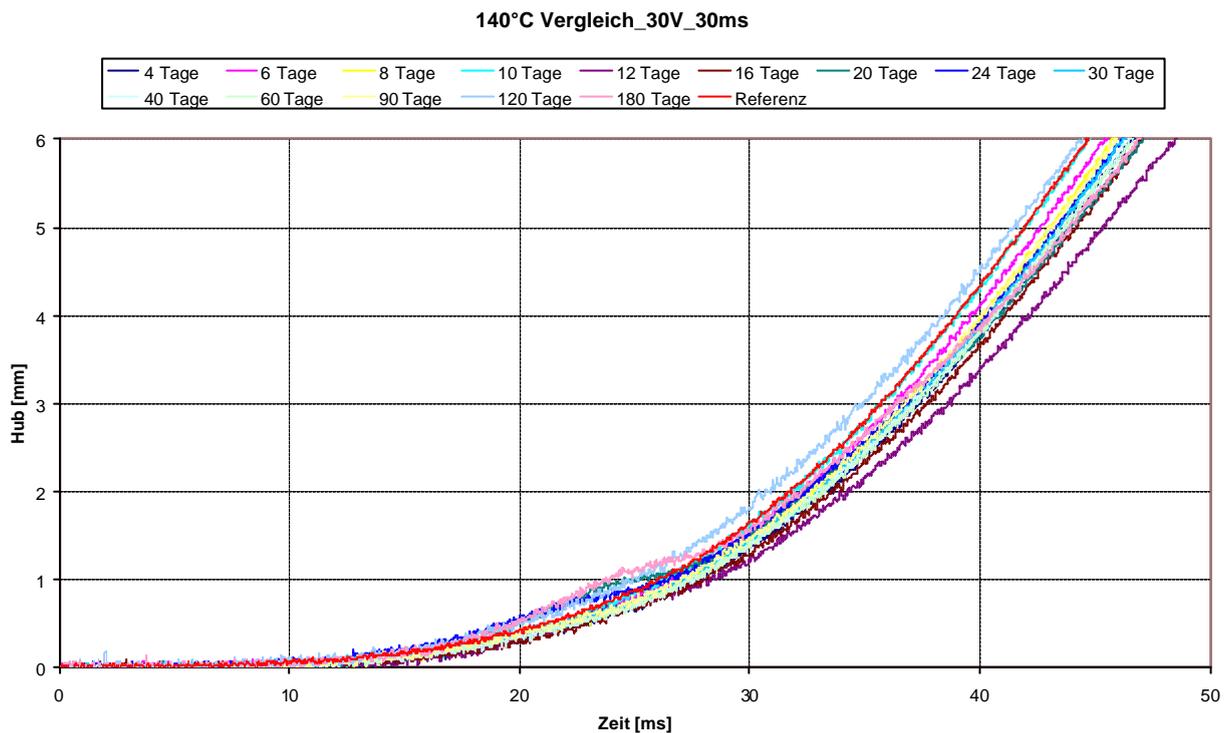
**Abb. 10-19 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen**

Um in Erfahrung zu bringen, ob diese geringen Abweichungen einer bestimmten Systematik unterliegen, wurden die Ergebnisse aus Abbildung 10-19 vergrößert dargestellt. In Abbildung 10-20 wurde hierzu der Anfangsbereich in einem Ausschnittdiagramm herausgelöst und vergrößert. Die Ausschnittsauswahl fiel deshalb auf den Anfangsbereich, weil in einer möglichen Anwendung ein Aktor-Draht nie bis zum Maximalhub belastet wird, sondern nur bis zu einem geringeren Wert. Für eine mögliche Anwendung im Beispiel Motorhaubenanhebung würde dieser Wert beispielsweise bei 5mm oder 6mm liegen (der erforderliche Arbeitshub wird dann über die Drahtlänge und ggf. eine Übersetzung erreicht).

Die Vermutung, dass höhere Auslagerungszeiten zu einem immer flacher werdenden Anstieg führen könnten, lässt sich nicht feststellen. Überhaupt konnte keinerlei Systematik in der Abfolge der Kurven herausgelesen werden. Eine wahrscheinliche Begründung der geringen Abweichungen der Kurven untereinander könnte in der Messgenauigkeit des gesamten Prüfstandes liegen. An dieser Stelle sei wiederholt, dass die hier erfolgten Messungen nicht mit herkömmlichen Messaufgaben vergleichbar sind, da sie sich aufgrund der sehr hohen Dynamik in einer ganz neuen Dimension befinden und sich alles im Millisekundenbereich ereignet. Trotz dieser

sehr hohen Anforderungen sind die aufgezeichneten Abweichungen nur minimal erkennbar. Eine weitere mögliche Begründung könnte auch in den geringen Unterschieden des Ausgangsmaterials liegen.

Unabhängig davon, welcher der möglichen Gründe zutreffen mag bleibt festzustellen, dass sich die aufgezeichneten Unterschiede der Anfangskurve in einem sehr geringen Bereich von weniger als ca. 3ms befinden.



**Abb. 10-20 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen**

Erwartungsgemäß verlaufen auch die Kurven der 120°C-Reihe, die in Abbildung 10-21 gezeigt werden. Auch hier sind die Abweichungen sehr gering und nur bei der Kurve für 12 Tage Auslagerungszeit ist eine etwas größer ausfallende Abweichung erkennbar. Diese betrifft, wie auch bei der 140°C-Reihe, die leicht geringere Höhe des Maximalhubes.

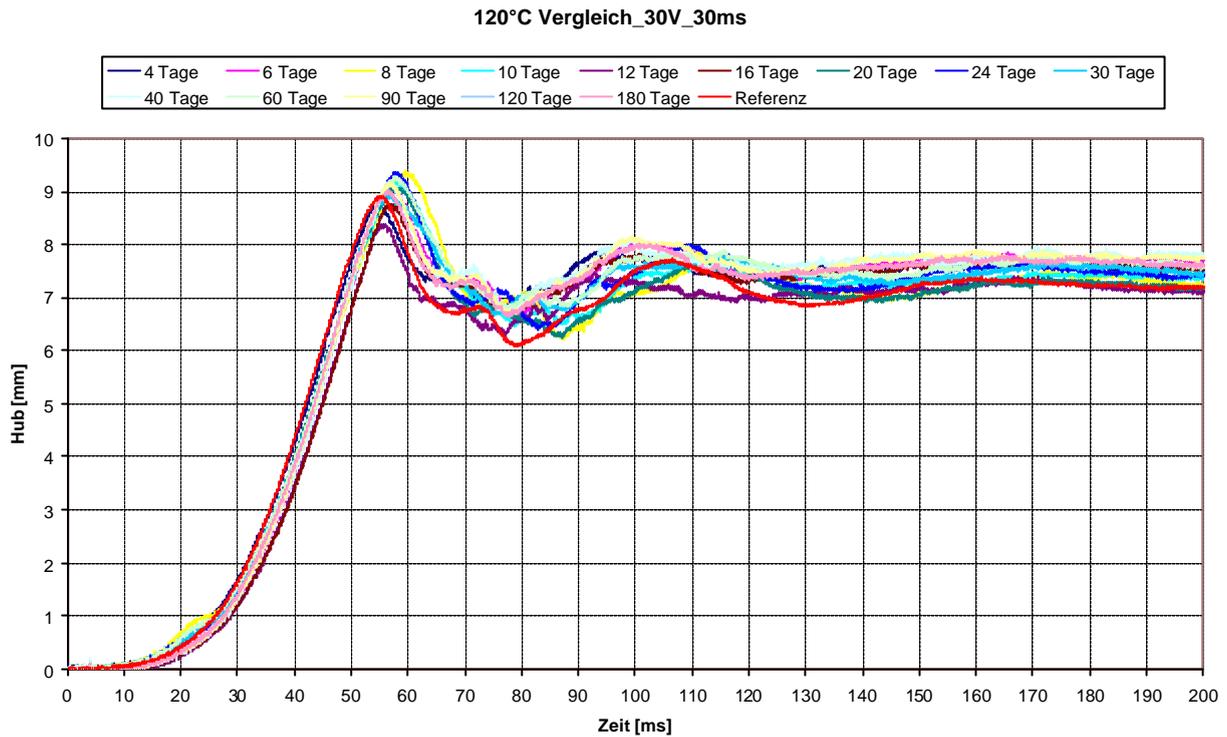
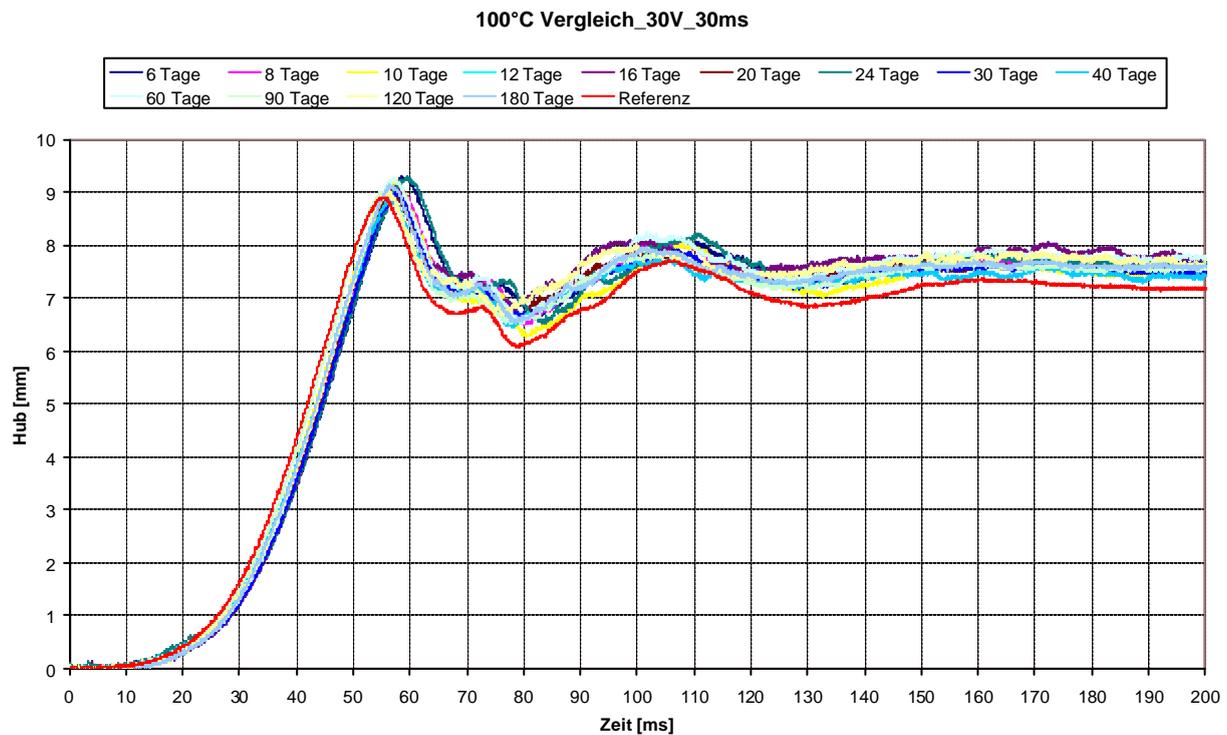
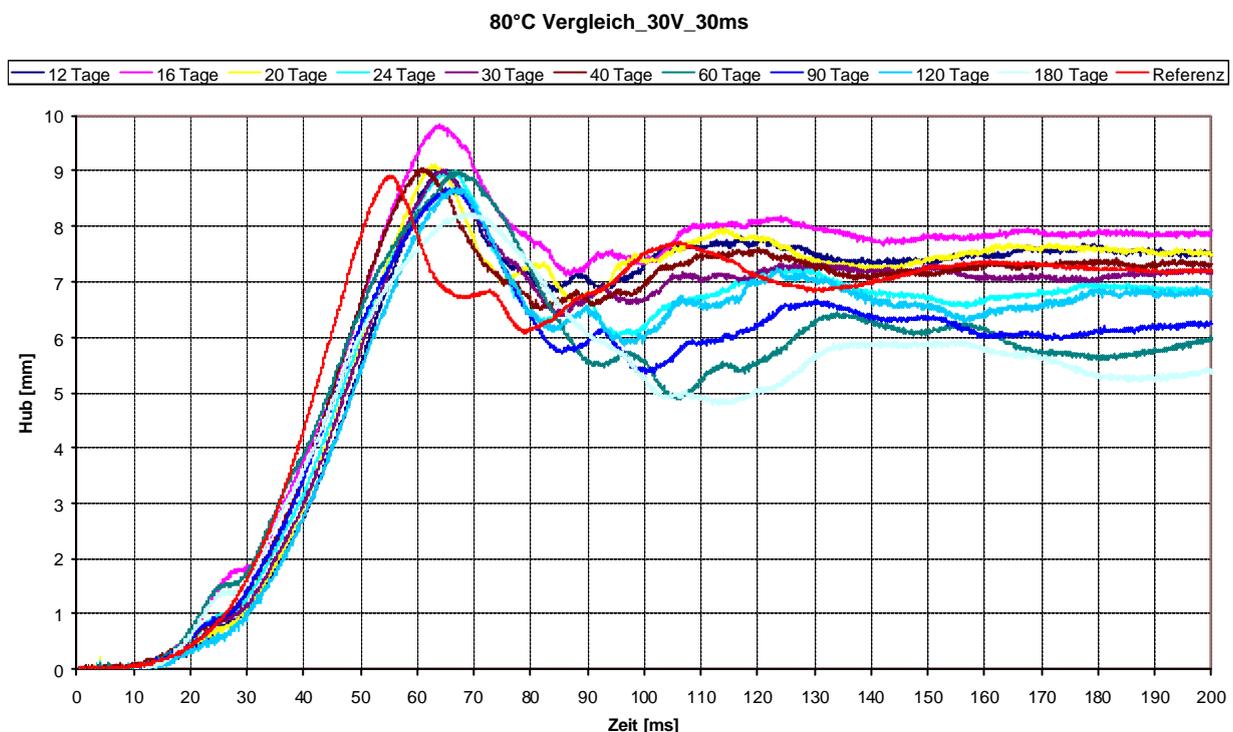


Abbildung 10-22 zeigt die Ergebnisse für die 100°C-Reihe, bei der die Abweichungen minimal sind. Man kann sagen, dass hier die Auslagerungszeit keinen erkennbaren Einfluss auf die Verkürzungsdauer und den Verkürzungshub hat.

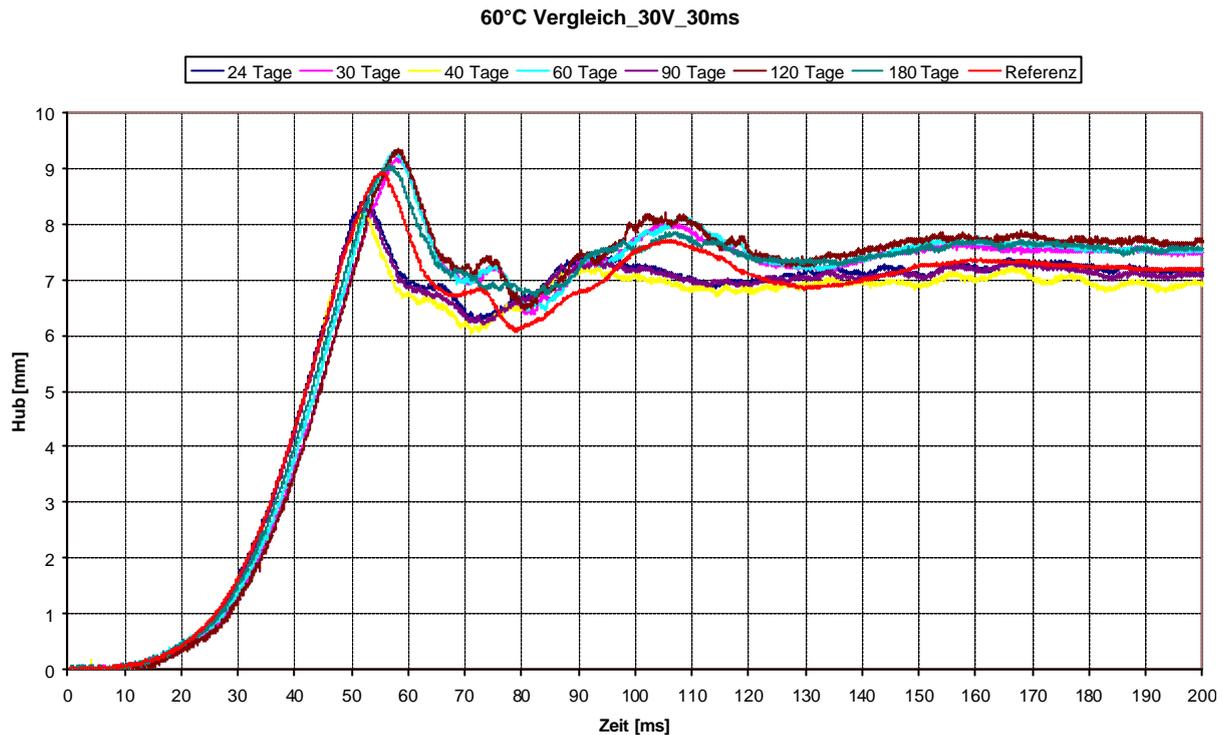


Die Kurvenschar der 80°C-Reihe dagegen zeigt deutliche Unterschiede untereinander, aber auch im Vergleich zur Referenzkurve (Abbildung 10-23). Sowohl in dem Anfangsbereich von 20ms bis 30ms, als auch bezüglich der Zeit und Höhe beim Erreichen des jeweiligen Kurvenmaximalhubes und nicht zuletzt bei der Höhe des eingeschwungenen Endwertes sind starke Streuungen ersichtlich. Aber auch hier lässt sich keine Systematik hinsichtlich möglicher Kurvenverschiebungen feststellen. Die großen Abweichungen liegen sehr wahrscheinlich in der bereits mehrfach beschriebenen Überschneidung dieser Auslagerungstemperatur und der Stelltemperaturen des Ausgangsmaterialies.



**Abb. 10-23 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen**

In Abbildung 10-24 sind die Ergebnisse der 60°C-Reihe dargestellt. Die Tage 24, 40 und 90 zeigt eine ähnliche Verlauf gegenüber die restlichen Kurven. Die restlichen Kurven, d.h. die Kurven nach 30, 60, 120 und 180 Tagen zeigen wiederum einen ähnlichen Verlauf und auch einen höheren Maximalhub, allerdings etwa 5ms später.



**Abb. 10-24 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen**

Nach Abschluss der Laserversuche kann gefolgert werden, dass sowohl die Auslagerungstemperatur als auch die Auslagerungsdauer keinen messbaren Effekt im FG-Material bewirken. Hinsichtlich einer Funktion in der ausgewählten Anwendung der Motorhaubenanhebung zeigen sich diesbezüglich keine Bedenken.

Das bedeutet auch, dass die am Ende der Ölbadversuche aufgekommenen Bedenken hinsichtlich einer Verlangsamung des Stellvorgangs bei gleichbleibender Energiezufuhr nicht zutreffen. Die bei den Ölbadversuchen festgestellte Verschiebung zu höheren Stelltemperaturen mit der Folge, dass der Aktordraht für seine Aktivierung auf eine höhere Temperatur gebracht werden muss, führt bei gleichbleibender Aktivierungsenergie im Laserprüfstand nicht zu einer feststellbaren Verlangsamung der Verkürzungszeit. Es ist vielmehr festzustellen, dass über die Schnellentladung der Kondensatoren in der nur Millisekunden dauernden Bestromungszeit eine so hohe Energie eingebracht wird, dass auch eine Erhöhung der Stelltemperatur von 26,5°C (für den Fall der 140°C-Reihe) keinen messbaren Einfluss auf die Funktion der Aktordrähte hat.

### 11. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Diesem Projekt liegt die werkstoffkundliche Entwicklung eines adaptiven Sicherheitssystems mit Formgedächtnislegierungen zum Einsatz in Kraftfahrzeugen zugrunde. Die Hauptzielrichtung dieser Arbeit ist die Untersuchung der Langzeitstabilität des Formgedächtniseffektes zur Gewährleistung der Funktionssicherheit der ausgewählten Aktordrähte. Dies wurde in diesem Forschungsvorhaben anhand des Beispiels der Motorhaubenanhebung betrachtet.

Es wurden NiTi-Drähte mit einem Durchmesser von 0,254mm trainiert und unter einer definierten Vorspannung bei fünf unterschiedlichen Temperaturen ausgelagert. Die Auslagerungstemperaturen variierten dabei zwischen 60 und 140°C, die Auslagerungszeiten zwischen 4 und 180 Tagen (ein Satz Drähte befindet sich weiterhin in den Auslagerungsöfen).

Zur Untersuchung dieser Drähte wurden zwei Prüfstände konzipiert, konstruiert und gebaut. Mit dem Ölbad-Prüfstand konnten selbst kleine Änderungen im Drahtverhalten festgestellt werden, während mit dem Laser-Prüfstand vor allem die Funktion der Aktordrähte untersucht wurde. Neben der Recherchearbeit bestand ein wesentlicher Teil dieser Arbeit in der Optimierung dieser Prüfstände, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Beim Ölbad-Prüfstand wurden neben der Untersuchung der Temperaturverhältnisse im Ölbad auch Versuche durchgeführt, die das Ziel hatten, die Stelltemperatur des Aktordrahtes zu erhöhen. Es stellte sich heraus, dass weder das Verfahren der Vorspannungserhöhung, noch eine Drahtvordehnung für diese Anwendung geeignet sind. Darüber hinaus konnte bewiesen werden, dass auch bei 140°C im Auslagerungssofen aufgrund der Einspannvorrichtung martensitisches Material ausgelagert wird. Die Hauptschwierigkeit beim Laser-Prüfstand lag in den sehr kurzen Zeiten, die sowohl in der Ansteuerung, als auch bei der Verkürzung im Millisekundenbereich liegen, was vor allem für die Messwernerfassung eine große Herausforderung darstellte. Beide Prüfstände konnten innerhalb dieses Forschungsprojektes dahingehend optimiert werden.

## Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Aus den Ergebnissen der Ölbadversuche kann gefolgert werden, dass sowohl die Auslagerungstemperatur als auch die Auslagerungsdauer einen messbaren Effekt im FG-Material bewirken. Die Auslagerung der Aktordrähte führte zu einer Erhöhung der Stelltemperatur, während jedoch der Wert der maximal erreichbaren Verkürzung in allen Fällen auf gleichem Niveau blieb. Die Verschiebung der Stelltemperaturen ist in den ersten Stellvorgängen höher, als bei den nachfolgenden Stellvorgängen. Außerdem ist die Verschiebung umso stärker, je höher die jeweilige Auslagerungstemperatur war. Insgesamt ist diese Verschiebung jedoch als relativ gering einzuschätzen. Darüber hinaus erfolgt diese Verschiebung stets zu höheren Temperaturen, was im Falle der Motorhaubenanhebung sogar erwünscht wäre.

Aus den Ergebnissen der Laserversuche kann gefolgert werden, dass sowohl Auslagerungstemperatur als auch Auslagerungsdauer keinen messbaren Effekt im FG-Material bezüglich der Verkürzungszeit bewirken. Auch Bedenken hinsichtlich einer Verlangsamung des Stellvorgangs bei gleichbleibender Energiezufuhr treffen nicht zu bzw. lassen sich nicht mit den Ergebnissen der Laserprüfversuche nachweisen. Die bei den Ölbadversuchen festgestellte Verschiebung zu höheren Stelltemperaturen mit der Folge, dass der Aktordraht für seine Aktivierung auf eine höhere Temperatur gebracht werden muss, führt bei gleichbleibender Aktivierungsenergie im Laserprüfstand nicht zu einer feststellbaren Verlangsamung der Verkürzungszeit. Es ist vielmehr festzustellen, dass über die Schnellentladung der Kondensatoren in der nur Millisekunden dauernden Bestromungszeit eine so hohe Energie eingebracht wird, dass auch eine Erhöhung der Stelltemperatur von 26,5°C (für den Fall der 140°C-Reihe) keinen messbaren Einfluss auf die Funktion der Aktordrähte hat. Dies bedeutet, dass hinsichtlich einer Funktion von FG-Drähten in der ausgewählten Anwendung der Motorhaubenanhebung keine Bedenken vorliegen sollten. Ein Einsatz von schnellschaltenden Aktoren mit FGL im Kfz-Bereich sollte daher möglich sein.

Zur Entwicklung und Erprobung von Schnellerwärmungssystemen, die es erlauben, mit dem vorhandenen Bordstromnetz eine schnellstmögliche und sichere Erwärmung der FG-Elemente zu gewährleisten, blieb in diesem Forschungsprojekt leider keine Zeit mehr und muss in einer zukünftigen Arbeit untersucht werden.

## 12. Zukünftige Systeme und Resümees

Über dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt hinaus ergeben sich bei Gewährleistung der Sicherheit und Funktion von schnellschaltenden Aktoren aus FGL neben den im Stand der Technik aufgezeigten Anwendungen eine große Anzahl weiterer Einsatzmöglichkeiten. Dieses sehr hohe Potenzial soll in einer kurzen Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von FGL und zukünftigen Systemen im Automobilbau kurz als Ausblick betrachtet werden.

### **Wirtschaftlichkeit von Formgedächtnislegierungen [5]**

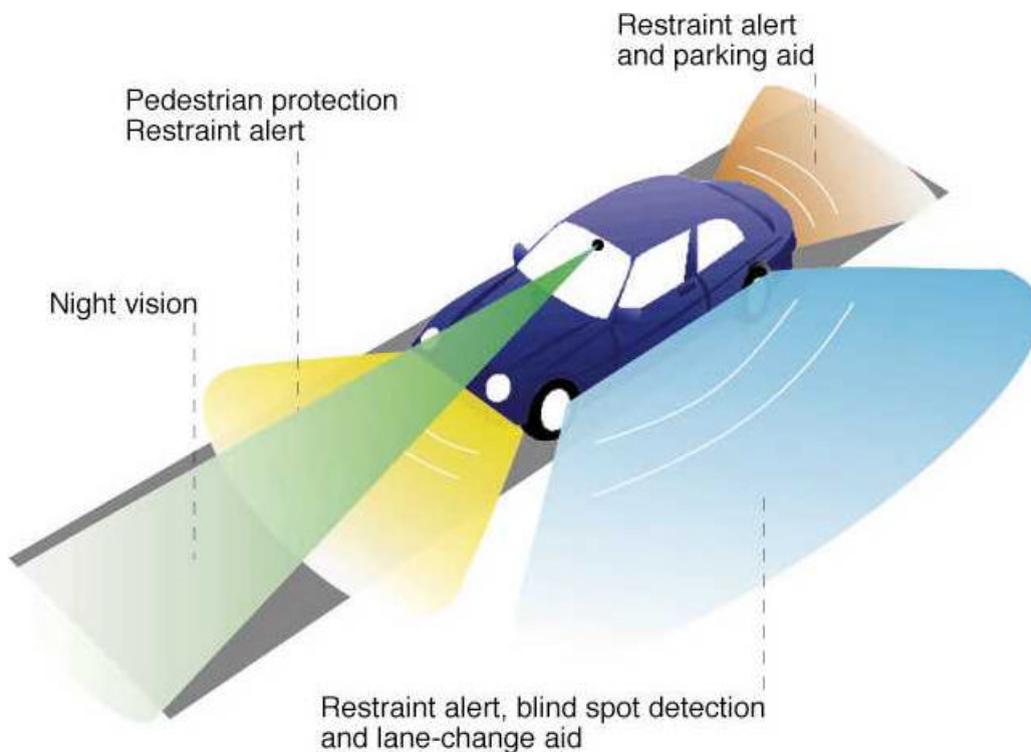
Wirtschaftliche Fragen entscheiden nur selten über den Einsatz von Formgedächtnislegierungen, da es in vielen Anwendungsbereichen keine Stoffe mit vergleichbaren Eigenschaften gibt, und man auf den spektakulären Effekt nicht verzichten kann und will. Auch bei der Auswahl des FG-Materials steht man vor keiner großen Wahl. Von den im Moment erhältlichen Legierungen hat NiTi in den meisten Kriterien wesentlich bessere Eigenschaften, die auch einen evtl. höheren Preis rechtfertigen. Das größte Problem beim Einsatz von Formgedächtnislegierungen sind häufig die hohen Entwicklungskosten. Bisher ist man noch nicht in der Lage, bei der Konstruktion von FG-Elementen im Vorfeld berechnete Voraussagen über die späteren Eigenschaften treffen zu können. Welche Eigenschaften (Formänderung, Temperatur, Hysterese etc.) letztendlich vorliegen und welche Voraussetzungen man schaffen muss, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, muss zuerst in langen und aufwendigen Testphasen erprobt werden.

### **FG-Aktor in der Sicherheitstechnik [36]**

Wegen der langen Abkühlzeit des FG-Elements im Aktor ist die Dynamik von FG-Aktoren im allgemeinen schlecht. Das bedeutet, FG-Aktoren sind für schnelle zyklische Bewegungen nicht geeignet. Eine aktive Kühlung wäre eine Lösung. Aus Sicht der Sicherheitstechnik sind FG-Aktoren allerdings äußerst interessant. In der Sicherheitstechnik ist die erste Bewegung eines Aktors wichtig. Diese erste Bewegung wird bei FG-Aktoren durch die Schnellerwärmung erzeugt. Wie sich gezeigt hat liegen die Zeiten für eine Schnellerwärmung mittels Kondensator im Millisekundenbereich.

### Zukünftige Systeme

- Einpark-Hilfe: Ultraschallsensoren messen die Parklücke um die Ecken des Wagens aus. Der Computer berechnet anschließend ihre Größe. Dann rangiert er das Fahrzeug millimetergenau – bis in die kleinste Lücke. Das System regelt das komplexe Zusammenspiel zwischen Gas, Bremse, Kupplung und Lenkung wie ein menschlicher Fahrer. Damit das Auto kein Hindernis berührt, geben die Ultraschallsensoren ständig Rückmeldung über den Abstand zu anderen Fahrzeugen und zum Bordstein.
- Brake by wire
- Steer by wire
- Frontscheiben-Display
- Pre Crash Systeme (PreSafe)
- Umfeldsensor: Messung der Fahrzeug-Umgebung
- Fahrer-Erkennung: Fahrer Identifikation durch z.B. Fingerabdrücke
- Insassen-Erkennung
- Hybridssysteme



**Abb. 12-1 Fahrzeugumfeldererkennung künftiger Sicherheitssysteme**

## 13. Anhang

### A Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1 Trend der Fußgängerunfälle in Europa [1].....	9
Abb. 3-2 Verteilung der Fahrzeugtypen bei Fußgängerunfällen [1] .....	9
Abb. 3-3 Aufprallbereiche bei Fußgängerunfällen [1] .....	10
Abb. 3-4 Verletzungen und Kontaktbereiche bei Fußgängerunfällen [1] .....	10
Abb. 4-1 Energiedichte verschiedener in Mikroventilen verwendeter Aktoren [3] .....	12
Abb. 4-2 An der martensitischen Transformation beteiligte Gefügestrukturen [6] .....	14
Abb. 4-3 FGL Effekt [7].....	15
Abb. 4-4 Änderungen der Gefügestruktur beim Verformen und Erwärmung.....	15
Abb. 4-5 Längenänderung der FGL bei Aufwärmung und Abkühlung.....	16
Abb. 4-6 Längenänderung der FGL durch Erwärmung.....	17
Abb. 4-7 Hystereseverlauf und Umwandlungstemperaturen [5] .....	18
Abb. 4-8 Gefügeänderungen während des Einweg-Effekts [6] .....	20
Abb. 4-9 Superelastizität [6] .....	22
Abb. 4-10 Martensit-start-Temperatur $M_s$ in Abhängigkeit vom Ni-Gehalt [10].....	23
Abb. 4-11 Charakteristische Widerstands- und Auslenkungs-Kennlinien einer NiTi-Legierung in Abhängigkeit der Temperatur unter anliegender Last [15] .....	25
Abb. 5-1 Überblick der Automobil Sicherheitssysteme .....	27
Abb. 5-2 Sichtverhältnisse beim VW Golf [18].....	29
Abb. 5-3 Komponenten eines Navigationssystems [19].....	31
Abb. 5-4 ABS mit Rückförderung im geschlossenen Kreis (Schemadarstellung) [19] .....	32
Abb. 5-5 Beschleunigte Kurvenfahrt mit und ohne ESP [20] .....	34
Abb. 5-6 Das Pre-Crash-Konzept: Vorsorglich schützen [17] .....	35
Abb. 5-7 Knautschverhalten eines vorderen Längsträgers [19] .....	37
Abb. 5-8 Trägerstruktur mit Kraftverlauf bei Seitenaufprall [19] .....	37
Abb. 5-9 Gitterrahmen „Space frame“ einer PKW-Karosserie aus Aluminium [19].....	38
Abb. 5-10 Sicherheitskarosserie [19] .....	38
Abb. 5-11 Perforierter Metallwinkel (Quelle Renault) und Gurtkraftbegrenzer [16] .....	39

Abb. 5-12 Gürtelschnalle Gurtstraffer [22] .....	40
Abb. 5-13 Bauteile eines pyrotechnischen Gurtstraffers und der Aufbau [16] .....	40
Abb. 5-14 Kugelgurtstraffer [16] .....	41
Abb. 5-15 Gurtstraffer in Wankelbauweise [16] .....	41
Abb. 5-16 Adaptive load limiter der Firma Autoliv [21] .....	42
Abb. 5-17 Zeitlicher Ablauf und Schutzwirkung eines Rückhaltesystems aus Dreipunktgurt und Airbag im Frontalaufprall (Fahrer und Beifahrerseite) [18] .....	43
Abb. 5-18 Auslösung des Airbags (Fahrer und Beifahrer) [21] .....	44
Abb. 5-19 Fahrerairbagsystem im Teilschnitt [21] .....	44
Abb. 5-20 Anordnung des Seitenairbags [21] .....	45
Abb. 5-21 Kopfairbag in Dachrahmen integriert [21] .....	45
Abb. 5-22 Autoliv's knee Airbag [21] .....	46
Abb. 5-23 Lower leg Airbag [21] .....	46
Abb. 5-24 Airbagsysteme mit Sitzpositionserkennung und Gewicht System [21] .....	47
Abb. 5-25 Volvo's Schleudertraumasitz [23] .....	48
Abb. 5-26 Anti-Whiplash Sitz (Autoliv) [21] .....	48
Abb. 5-27 WipGaurd mit Kippwinkel und Einbau dargestellt [24] .....	49
Abb. 5-28 Das Deformationselement vergrößert [24] .....	49
Abb. 6-1 Außenrückansicht-Spiegel [25] .....	53
Abb. 6-2 FG Torsionale Aktuator [25] .....	54
Abb. 6-3 Adaptive Scheinwerfer Leistung in Kurven [25] .....	54
Abb. 6-4 FG Element als Gurtkraftbegrenzer [26] .....	55
Abb. 6-5 Mechanischer Gurtstraffer (BMW 3er) [18] .....	56
Abb. 6-6 Roto Gurtstraffer (Autoliv) [21] .....	57
Abb. 6-7 Motorhauben-Anhebung für Fußgänger Schutz [21] .....	58
Abb. 7-1 Kontaktsensor (1) und Beschleunigungsaufnehmer (2) [30] .....	59
Abb. 7-2 Motorhaube mit Schutzsystem in angehobene Position [30] .....	60
Abb. 7-3 Motorhaube Anhebung mit pneumatischem Muskel .....	61
Abb. 7-4 Zeitlicher Verlauf der Motorhauben-Anhebung .....	62
Abb. 7-5 System Aufbau [28] .....	62

Abb. 7-6 System Aufbau für den erweiterten Kopfschutz [32] .....	63
Abb. 7-7 Airbagdesign für den erweiterten Kopfschutz [32].....	64
Abb. 8-1 Laser Prüfstand Umbau für Einzel Draht Training .....	67
Abb. 8-2 Darstellung des Trainings des ersten FG Drahts.....	69
Abb. 8-3 Spannvorrichtung für Training und Auslagerung .....	70
Abb. 8-4 Einspannung der FG-Drähte .....	71
Abb. 8-5 Übersicht des Trainings mit parallel geschalteten Netzgeräten .....	71
Abb. 9-1 Schematischer Aufbau des Ölbadversuchs.....	76
Abb. 9-2 Klapprahmen mit den einzelnen Bauteilen .....	77
Abb. 9-3 Probenhalter inklusive Proben und der Kühlschlange.....	77
Abb. 9-4 Schematischer Aufbau des Laser-Versuchs.....	78
Abb. 9-5 Die einzelnen Bauteile des Laserprüfstandes .....	79
Abb. 9-6 Grafik mit allen Vordehnversuchen zusammen.....	81
Abb. 9-7 Ergebnis des DSC-Versuchs.....	82
Abb. 9-8 Ölbadversuchsaufbau.....	83
Abb. 9-9 0%, 6% und 8% Vordehnung .....	84
Abb. 9-10 Unbehandelte Proben aus einem Ölbadversuch.....	85
Abb. 9-11 Probe 4 bis 6 mit 6% Vordehnung .....	85
Abb. 9-12 Probe 1 bis 3 mit 8% Vordehnung .....	86
Abb. 9-13 7.Versuch mit 8% Dehnung (links) und 8.Versuch mit 8% Dehnung (rechts) .....	86
Abb. 9-14 Hysteresebreite der 3. Probe 1. Versuch mit 8% Vordehnung.....	87
Abb. 9-15 Abweichung der 3. Probe 2. Versuch mit 8% Vordehnung .....	88
Abb. 9-16 PUT Ermittlung der 3. Probe 2. Versuch mit 8% Vordehnung .....	88
Abb. 9-17 Stufe der 3. Probe 3. Versuch mit 8% Vordehnung.....	89
Abb. 9-18 Stufenabbau der 3. Probe 4. Versuch.....	90
Abb. 9-19 Stufenabbau aber mit Abweichung der 3. Probe 5. Versuch .....	90
Abb. 9-20 Vertauschen der 1. und 3. Probe 6. Versuch.....	92
Abb. 9-21 Rolle der 3. Probe geschliffen 7. Versuch.....	93
Abb. 9-22 3. und 4. Probe auf Messkarte vertauscht 8. Versuch.....	93
Abb. 9-23 Kabel der 3. Probe vertauscht 9. Versuch.....	94

Abb. 9-24 Wegaufnehmer der 3. und 4. Probe vertauscht 10. Versuch.....	95
Abb. 9-25 1.Test mit dem neuen Wegaufnehmer.....	96
Abb. 9-26 2.Test mit unbehandelten neuen Drähten.....	96
Abb. 9-27 3.Test mit unbehandelten neuen Drähten.....	97
Abb. 9-28 1.Test mit neuer Pin-Belegung.....	97
Abb. 9-29 Darstellung der $A_{peak}$ Temperaturen über der Dehnung .....	98
Abb. 9-30 FG-Draht bei 0% Vordehnung.....	99
Abb. 9-31 FG-Draht bei 8% Vordehnung.....	99
Abb. 9-32 Gewicht-Anfertigung für Vorspannungs-Untersuchung .....	102
Abb. 9-33 1.Test mit Gewichtserhöhung .....	102
Abb. 9-34 2.Test mit Gewichtserhöhung .....	103
Abb. 9-35 oben 10°C, Mitte 20°C, unten 30°C .....	105
Abb. 9-36 links: 40°C, 50°C, 60°C; rechts: 70°C, 80°C, 90°C .....	106
Abb. 9-37 links: 100°C, 110°C, 120°C; rechts: 130°C, 140°C, 150°C .....	106
Abb. 9-38 oben: 160°C, unten: 170°C .....	107
Abb. 9-39 Ölbad-Prüfstand mit den Temperatur-Messstellen.....	108
Abb. 9-40 Gemessene Temperatur über der angezeigten Thermostat-Temperatur.....	109
Abb. 9-41 Temperatur Messung auf verschiedenen Höhen.....	109
Abb. 9-42 Ölbad mit Thermometern farbig dargestellt .....	110
Abb. 9-43 Thermometer-Höhe .....	110
Abb. 9-44 Temperatur Messungen an 25 Stellen .....	111
Abb. 9-45 Messungen der Temperatur auf FG-Draht-Höhe.....	111
Abb. 9-46 Intensivierung der Ölbad-Bewegung.....	112
Abb. 9-47 2.Test mit 6 neuen trainierten Drähten .....	113
Abb. 9-48 3.Test mit 6 neu trainierten Drähten ohne aktive Kühlung.....	114
Abb. 9-49 Referenzversuch mit zusätzlichen Gewichten.....	114
Abb. 9-50 Verschiebung der $A_s$ -Temperatur.....	115
Abb. 9-51 Elektrischer Schaltschrank.....	117
Abb. 9-52 Digitales Oszilloskop .....	119
Abb. 9-53 Vom Oszilloskop gemessener Doppelimpuls .....	120

Abb. 9-54 Weitere Messungen am Prüfstand.....	121
Abb. 9-55 LabView Single-Impuls Version 1.4 .....	123
Abb. 9-56 Laserprüfstand-Kontrollversuche bzgl. Impuls, Zeit und Hub.....	124
Abb. 9-57 Bestimmung des Verkürzungspunkts der FG-Drähte.....	124
Abb. 9-58 Versuch mit 1 ms Schritten .....	126
Abb. 9-59 Wiederholungsversuche.....	127
Abb. 9-60 Spannungsabfall am Kondensator .....	128
Abb. 9-61 Vergrößerte Darstellung des Spannungsabfalls am Kondensator .....	129
Abb. 9-62 WaveStar Verbindungsprogramm.....	129
Abb. 9-63 Vergleich der Zwischen Versuchsergebnisse bei 120 Tagen .....	130
Abb. 9-64 Zeiten erreicht bei 120 Tagen .....	131
Abb. 9-65 Einrasten des Schlittens .....	132
Abb. 9-66 Neuer lagergeführter Schlitten .....	133
Abb. 9-67 Versuchsverlauf bis 10s .....	135
Abb. 10-1 140°C_4 Tage_Test 1,2 &3 mit Referenz (RT_4 Tage) .....	140
Abb. 10-2 120°C_24 Tage_Test 1,2 &3 mit Referenz (RT_24 Tage) .....	141
Abb. 10-3 Stelltemperaturen der 140°C-Reihe bis 180 Tage.....	142
Abb. 10-4 Stelltemperaturen der 120°C-Reihe bis 180 Tage.....	143
Abb. 10-5 Stelltemperaturen der 100°C-Reihe bis 180 Tage.....	143
Abb. 10-6 Stelltemperaturen der 80°C-Reihe bis 180 Tage.....	144
Abb. 10-7 Stelltemperaturen der 60°C-Reihe bis 180 Tage.....	144
Abb. 10-8 Vergleich des 1. Tests der Stelltemperaturverschiebung .....	145
Abb. 10-9 Vergleich des 2. Tests der Stelltemperaturverschiebung .....	146
Abb. 10-10 Vergleich des 3. Tests der Stelltemperaturverschiebung .....	146
Abb. 10-11 Maximale Temperatur Änderung der 1.Tests .....	147
Abb. 10-12 Maximale Temperatur Änderung der 1.Tests ohne 80°C.....	148
Abb. 10-13 Verschiebung der Stelltemperatur bei einer Stunde Auslagerung bei 140°C ....	150
Abb. 10-14 Ergebnisse der sechs Referenzproben.....	153
Abb. 10-15 Ergebnisse nach 4 Auslagerungstagen .....	154
Abb. 10-16 Ergebnisse nach 30 Auslagerungstagen .....	155

Abb. 10-17 Ergebnisse nach 60 Auslagerungstagen .....	156
Abb. 10-18 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	157
Abb. 10-19 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	158
Abb. 10-20 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	159
Abb. 10-21 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	160
Abb. 10-22 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	160
Abb. 10-23 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	161
Abb. 10-24 Ergebnisse nach 180 Auslagerungstagen .....	162
Abb. 12-1 Fahrzeugumfeldererkennung künftiger Sicherheitssysteme.....	166

***B Tabellenverzeichnis***

Tab. 4-1 Die Eigenschaften der wichtigsten Formgedächtnislegierungen [5].....	13
Tab. 6-1 Matrix Teil 1v3.....	50
Tab. 6-2 Matrix Teil 2v3.....	51
Tab. 6-3 Matrix Teil 3v3.....	52
Tab. 8-1 Ein Ausschnitt der normierten allgemeinen Prüfbedingungen aus der Automobilindustrie [38].....	74
Tab. 9-1 $A_{\text{peak}}$ Temperaturen der verschiedenen Drähte in °C.....	98
Tab. 10-1 Versuchsübersicht.....	138

## C Quellen

- [1] F.A Berg, M. Egelhaaf, DEKRA Automobil GmbH, Unfallforschung, Stuttgart, J. Bakker, H. Bürkle, R. Hermann, J. Scheerer, DaimlerChrysler AG, Unfallforschung, Sindelfingen, Pedestrian Protection In Europe, The Potential of Car Design and Impact Testing
- [2] D.E. Hodgson, M.H. Wu, R.J. Biermann, SHAPE MEMORY ALLOYS, [http://www.jmmedical.com/html/\\_shape\\_memory\\_alloys\\_.html](http://www.jmmedical.com/html/_shape_memory_alloys_.html), Stand: 14.11.2003
- [3] P. Krulevitch, A.P. Lee, P.B. Ramsey, J.C. Trevino, J. Hamilton and M.A. Northrup, Thin Film Shape Memory Alloy Microactuators, J. Microelectromech. Syst., Vol.5, No.4, (1996), p.270
- [4] M. Kohl, I. Hürst, B. Krevet, Time response of shape memory microvalves, Proc Actuator 2000, Bremen, Germany, (2000), pp.212-215
- [5] Dieter Stöckel und 3 Mitautoren (Peter Tautzenberger, Friedhelm Ritter, Erhard Hornbogen): Legierungen mit Formgedächtnis (Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen), Band 259, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen 1988
- [6] Lechnitz et.al., Umformen 2, Zug-, Biege-, Schubumformen, Gedächtnislegierungen, Skript SS2002, Fachhochschule Karlsruhe, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Technologie der Fertigungsverfahren
- [7] Leester-Schädel Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig <http://imt73.imt.ing.tu-bs.de/imt/institut/mitarb/leester/projekte>
- [8] [http://www.memory-metalle.de/html/03\\_knowhow/PDF/MM\\_05\\_introduction\\_e.pdf](http://www.memory-metalle.de/html/03_knowhow/PDF/MM_05_introduction_e.pdf)
- [9] G.R. Purdy, J.G. Parr, A study of the titanium-nickel system between  $Ti_2Ni$  and  $TiNi$ , Trans. Metall. Soc. AIME, Vol.221, (1961), pp.636-639

- [10] W. Tang, Thermodynamic study of the low-temperature phase B19' and the martensitic transformation in near-equiatomic Ti-Ni shape memory alloys, Metallurgical and Materials Transactions, Vol.28A, (1997), pp.537-544
- [11] T. Saburi, M. Yoshida, S. Nenno, Scr. Metall, Vol.18, (1984), p.363
- [12] S. Miyazaki, Y. Ohmi, K. Otsuka, Y. Suzuki, Characteristics of deformation and transformation pseudoelasticity in Ti-Ni alloy, Journal de Physique IV, Colloque 4, (1982), pp.255-260
- [13] S.Miyazaki, K.Otsuka, Deformation and Transition Behavior Associated with the R-Phase in Ti-Ni Alloys, Metall. Trans. A, Vol.17A, (1986), pp.53-63
- [14] G.D. Sandrock, A.J. Perkins and R.F. Hehemann, Metall.Trans. A, Vol.2, (1971), p.2769
- [15] K.D. Skrobaneck, O.F. Hagena, M. Kohl, Entwicklung von Mikromembranaktoren mit NiTi-Formgedächtnislegierungen, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6052, (1998)
- [16] U. Rokosch, Airbag und Gurtstraffer, Vogel Buchverlag, Würzburg, (2002), p. 13
- [17] <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7145-49-62939-1-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0,00.html>
- [18] U. Seiffert, Fahrzeugsicherheit, VDI-Verlag, Düsseldorf, (1992)
- [19] R. Gscheidle, Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, (1999)
- [20] H. Bauer, Fahrsicherheitssysteme 2. Auflage, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, (1998)
- [21] <http://www.autoliv.com/>
- [22] F. Kramer, Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Vieweg, Wiesbaden, (1998)
- [23] [http://www.volvocars.de/\\_Tier2/WhyVolvo/Safety/Safety+WHIPS.htm](http://www.volvocars.de/_Tier2/WhyVolvo/Safety/Safety+WHIPS.htm)

- [24] [http://www.winterthur-insurance.ch/home/abu/abu\\_engagement/abu\\_praev\\_forschung.htm](http://www.winterthur-insurance.ch/home/abu/abu_engagement/abu_praev_forschung.htm)
- [25] F. Butera, Shape Memory Actuators for Automotive Applications, in Shape Memory Alloys. Advances in Modelling and Applications, ed. by Auricchio, F. et al., CIMNE, Barcelona, (2001), pp. 405-425
- [26] B. Schroeder, Dämpfungseigenschaften von Formgedächtnislegierungen, Dissertation 2001/3234, Universität Stuttgart (2001), p. 202
- [27] EEVC, 1998 and ETSC, 1999, [www.eevc.org](http://www.eevc.org)
- [28] O. Scherf, R. Bardini: A Fibre Optical Sensor System for Control of Active Pedestrian Protection Systems, VDI Berichte Nr. 1794 (2003), p. 199-223
- [29] F. Friesen, Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes, in Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 38
- [30] R. Fredricksson, et al.: Evaluation of a new pedestrian head injury protection system with a sensor in the bumper and lifting of the bonnet's rear edge, paper number 131, p. 1-11, [www.autoliv.com](http://www.autoliv.com)
- [31] N.N.: IPPS-Konsortium: Fünf für Fußgängerschutz, in Automobil-Entwicklung, p.34, Mai 2004
- [32] Kalliske I. et al: Fahrzeugseitige Massnahmen zum Schutz des Kopfes eines Fussgängers – eine ganzheitliche Betrachtung, in VDI Berichte, Nr. 1794 (2003), p. 235-260
- [33] D.J. Leo, S.J. Buckley: Vehicular Applications of Smart Material Systems, Smart structures and materials 1998, SPIE proceedings series; 3326 (1998), p. 113
- [34] S. Gläser, P. Gümpel: Schnellschaltende Aktoren aus Formgedächtnislegierungen, fhkforum 2003/2004, p.65-68, 2003
- [35] M. Piening: Formgedächtnisaktor in kompakter Bauweise. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik, Braunschweig 1998
- [36] J. Franke: Schnellschaltender Aktor aus Formgedächtnislegierung, Diplomarbeit, Konstanz 2002

- [37] [www.dynalloy.com](http://www.dynalloy.com)
- [38] Volkswagen AG: Normierte allgemeine Prüfbedingungen (Elektrische und elektronische Baugruppen in Kraftfahrzeugen). VW 80101, Dezember 2002
- [39] J. Manger: Versuche zu schnellschaltenden Aktoren mittels Formgedächtnislegierungen, Diplomarbeit, Konstanz 2003

## D Daten CD

