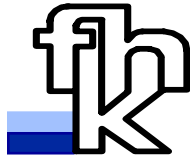


**Fachhochschule Konstanz
Institut für Angewandte Forschung**



**Entwicklung einer neuartigen Prüfanlage zur Prüfung von
Bauelementen aus Formgedächtnismetallen**

Förderkennziffer: 17 092 02

S C H L U S S B E R I C H T

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel
Wiss. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Ioan-Serban Radu
Dipl.-Ing.(FH) André Bruns
Dipl.-Ing.(FH) Joachim Strittmatter

Förderzeitraum: 01.02.2003 bis 30.11.2004

Inhaltsverzeichnis

1. AUFGABENSTELLUNG	4
2. GRUNDLAGEN DER FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN	5
2.1 EINLEITUNG	5
2.2 DER SHAPE-MEMORY-EFFEKT	7
2.2.1 Der Einwegeffekt	9
2.2.2 Das Zweiwegeverhalten	9
2.2.3 Der Zweiwegeffekt	10
2.2.4 Der All-Round-Effekt	10
3. THERMOMECHANISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL	11
3.1 MECHANISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL	12
3.2 THERMISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL	14
4. ALLGEMEINE DARSTELLUNG DER PROJEKTAUFGABEN	17
4.1 STRUKTUR DER FG-PRÜFANLAGE	17
4.2 DAS MECHANISCHE BELASTUNGSAGGREGAT	18
4.3 DIE TEMPERIERANLAGE	20
4.4 DIE EINRICHTUNG FÜR DAS FGL-TRAINING	21
5. KONSTRUKTIONEN	22
5.1 KONSTRUKTION DER KIPPEINRICHTUNG	22
5.2 KONSTRUKTION DES ARBEITSTISCHES	28
5.3 KONSTRUKTION DES OFENHALTERS	31



5.4 KONSTRUKTION DER PROBENHALTER	35
5.7 KONSTRUKTION DER TEMPERIERANLAGE	42
6. DIE FG-TESTEINRICHTUNG	47
6.1 GRUNDEINSTELLUNGEN AN DER ZWICK-ZUGMASCHINE	47
6.2 ERSTELLUNG VERSCHIEDENER SOFTWARE-BAUSTEINE	49
6.3 DIE DURCHFÜHRUNG EINER FG- PRÜFUNG (TESTING)	58
7. DIE FG-TRAININGSEINRICHTUNG	59
7.1 KONSTRUKTION DER TRAININGSEINRICHTUNG	59
7.2 DIE DURCHFÜHRUNG EINER FGL- PRÜFUNG (TRAINING)	63
8. REDESIGN DER FG-PRÜFMASCHINE	65
8.1 VORTEILE DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS	67
8.2 TECHNISCHE DATEN DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS	67
8.3 ANLEITUNG ZUR DURCHFÜHRUNG VON VERSUCHEN AN FG-PROBEN	
AN DER W+B-FG-PRÜFMASCHINEN	67
8.4 VORSTELLUNG DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS	
AUF DER SMST2004 IN BADEN-BADEN	75
9. ZUSAMMENFASSUNG	76
10. LITERATURVERZEICHNIS	79
11. ANHANG	80

1. AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen des Forschungsvorhabens, unterstützt durch das Förderprogramm des BMBF „Anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung an Fachhochschulen“ (aFuE), soll eine voll automatisierte, universale Prüfanlage gebaut werden mit deren Hilfe es möglich ist, das Verhalten von Formgedächtnislegierungen (FGL) bei der Variation verschiedener Parameter zu ermitteln.

Die Prüfanlage soll in erster Linie sehr genau die Phasenumwandlungstemperaturen der Formgedächtnislegierungen ermitteln, um damit einen tieferen Einblick in die metallkundlichen Hintergründe zu gewinnen. Aber es gibt auch weitere Anwendungen wie zum Beispiel das so genannte „Training“, indem man durch gezielte thermische und mechanische Belastungen den FGL verschiedene Formgedächtniseffekte trainiert.

Ein weiteres Ziel des Forschungsvorhabens ist das Erstellen einer Prüfnorm für FGL die den gesamten Prüfablauf dokumentieren und ergänzen wird.

Letztendlich soll die Prüfeinrichtung eine Plattform für die Weiterentwicklung der existierenden FG-Anwendungen sein, sowie die Einsatzmöglichkeiten dieser Werkstoffe zu erweitern.

Da es derzeit keine Normung für Bauteile aus FGL gibt, soll in den erfolgten Tests ein Vorschlag für eine FG-Normung gemacht werden.

2. GRUNDLAGEN DER FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN

3. EINLEITUNG

Die Voraussetzung für den Formgedächtniseffekt (engl. Shape Memory Effect) ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung, bei der die beteiligten thermischen Phasen Hochtemperaturphase (Austenit) und Niedertemperaturphase (Martensit) geordnete Gitterstrukturen aufweisen [1].

Zunächst werden die unterschiedlichen Gefügestände beim Stahl betrachtet, der bekanntlich keinen FG-Effekt aufweist.

Das Gefüge von Stählen besteht im normalisierten Zustand aus Ferrit und Perlit (bei C Gehalt unter 0,8%) bzw. aus Perlit und Zementit (bei C Gehalt über 0,8%). Bei Raumtemperatur ist das Eisengitter dieser Stähle kubisch-raumzentriert (s.**Abb. 2.1**). Wird der Stahl auf Temperaturen über 723°C erwärmt ändert sich sein Gefügestand (bei untereutktoidem Stahl beginnend im Perlit). Die Eisencarbide zerfallen und das kubisch-raumzentrierte Gitter des Ferrits wird kubisch-flächenzentriert [1]. So entsteht der Gefügebestandteil **Austenit**.

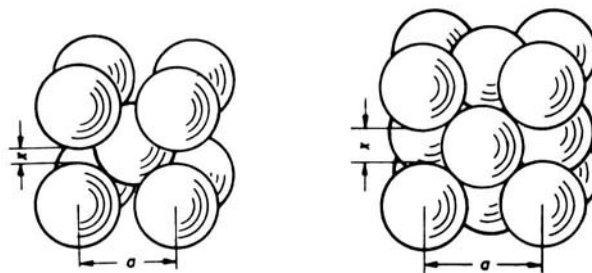


Abb.2.1 Das kubisch-raumzentrierte (links) und das kubisch-flächenzentrierte Eisengitter (rechts)

Die flächenzentrierte Anordnung der Eisenatome, erlaubt mehr Kohlenstoffatome auf Zwischengitterplätzen einzulagern. Durch den Zerfall des Zementits wird Kohlenstoff freigesetzt der vom Austenit in Lösung genommen werden kann. Bei der Fortsetzung

der Erwärmung wird auch der restliche Ferrit in Austenit umgewandelt. Bei übereutektoidem Stahl beginnt die Umwandlung ebenfalls mit der Auflösung des Perlits und wird mit dem Zerfall des Zementits abgeschlossen. Die erforderliche Dauer für das Austenitisieren wird von der Art und der Geschwindigkeit des Erwärmens bestimmt.

Während eines Abkühlprozesses mit geringer Geschwindigkeit, beginnt bei untereutektoiden Stählen die Umwandlung von Austenit in Ferrit (ca. 900°C). Da Ferrit nur ein sehr geringes Lösungsvermögen für Kohlenstoff besitzt, wird der übrige Austenit weiter mit Kohlenstoff angereichert. Bei weiterer Abkühlung (ca. 723°C) wandelt Austenit dann in Perlit um. Die übereutektoiden Stähle wandeln in der ersten Phase Austenit in Zementit um und danach den restlichen Austenit in Perlit.

Die beschriebenen Vorgänge setzen voraus, daß der Kohlenstoff im Austenitgitter beweglich ist und diffundieren kann. Bei sehr langsamer Abkühlung steht ausreichend Zeit für Verfügung, und der erreichte Gefügestand entspricht einem Gleichgewichtszustand. Bei einer höheren Abkühlgeschwindigkeit (über 1°C/s) wird

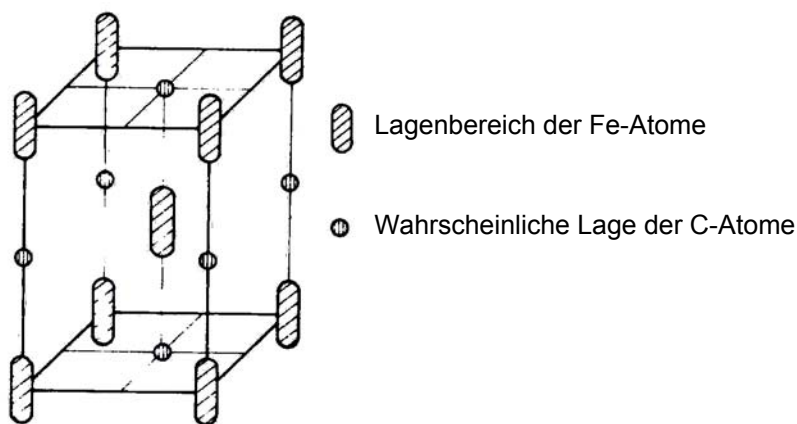


Abb.2.2 Das tetragonal-raumzentrierte Martensitgitter

die Bewegung der Kohlenstoffatome eingeschränkt und die Diffusion behindert. Bei einer Abkühlgeschwindigkeit von über 15°C/s entsteht statt Perlit der Gefügebestandteil Bainit und bei noch schnellerer Abkühlung findet die Austenit Umwandlung erst bei 400°C statt [1]. Aufgrund der starken Unterkühlung erfolgt dann innerhalb von Sekundenbruchteilen eine Gitteränderung, bei der ein tetragonal-raumzentriertes System entsteht (s.**Abb.2.2**). Die Verzerrung des Eisengitters

gegenüber der kubischen Form wird von den Kohlenstoffatomen verursacht, die sich von ihren Plätzen im Austenitgitter nicht entfernen konnten und dort „eingefroren“ wurden. Der neue Gefügestand wird als **Martensit** bezeichnet, die diffusionslose Gitterumwandlung als martensitische Umwandlung [1].

Aufgrund des großen Volumunterschiedes zwischen dem Martensit (Niedertemperaturphase) und Austenit (Hochtemperaturphase) kommt es bei Stählen im Bereich von hohen Spannungen zu irreversiblen Verformungen. Die reversible Umwandlung wird unterdrückt und es entsteht kein Formgedächtniseffekt.

Stähle mit einer normalen martensitischen Umwandlung weisen keinen Shape-Memory-Effekt auf.

2.2 DER SHAPE-MEMORY-EFFEKT

Die Voraussetzung für den Formgedächtniseffekt ist das Auftreten einer *thermoelastischen martensitischen Umwandlung*. Diese unterscheidet sich von der

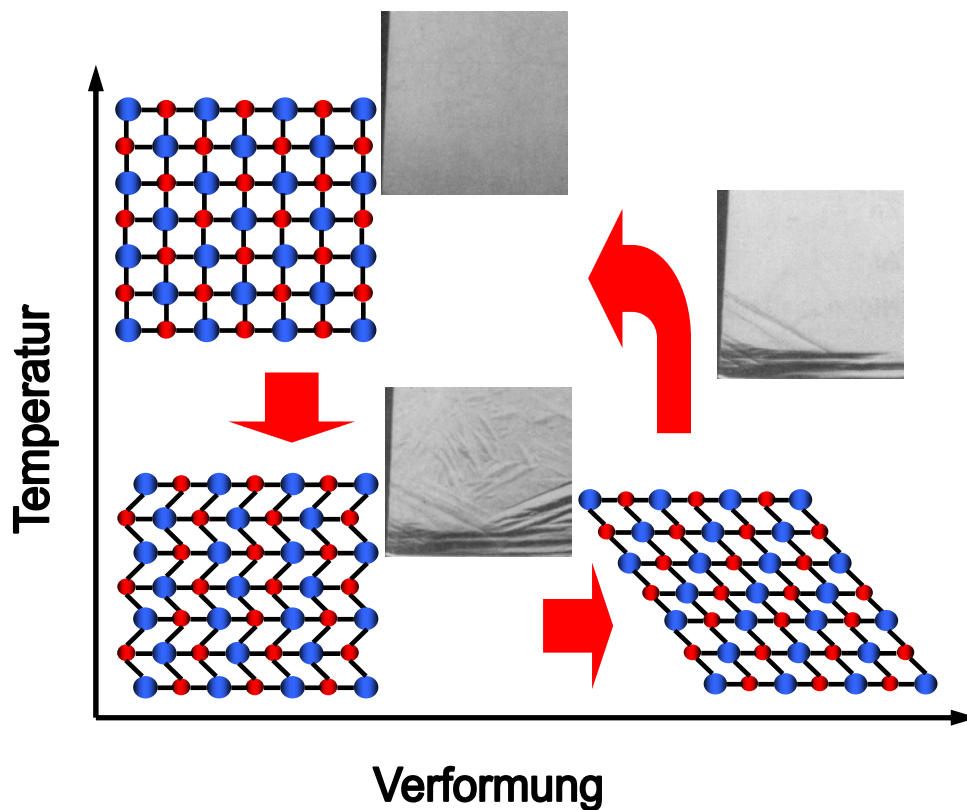


Abb.2.3 Die thermoelastische Umwandlung bei FGL mit der Oberflächenansicht (Gefüge) eines CuZnAl Einkristalles

normalen martensitischen Umwandlung durch die Bildung unterschiedlich orientierter Platten die sich meist zu Gruppen zusammenschließen. Die Martensitplatten entstehen und wachsen kontinuierlich mit sinkender Temperatur unterhalb der Gleichgewichtstemperatur (s. **Abb. 2.3**) [2].

Der Grund für die Reversibilität der thermoelastischen Martensitphase ist das Auftreten von nur sehr geringen elastischen Spannungen während der Umwandlung. Die Verzerrungen, die bei dem Wachsen der Martensitplatten entstehen, werden durch Akkomodation der Platten innerhalb einer Gruppe weitgehend abgebaut. Der Verzerrungsabbau wird auch durch Zwillingsbildung und Stapelfehler in den einzelnen Martensitplatten unterstützt.

Das Kristall mit kubisch raumzentrierter Austenitstruktur wandelt sich bei Abkühlung in eine „verzwillingte“ Martensitstruktur um. Die Umwandlung erfolgt diffusionslos durch Scherbewegungen und ist nicht mit einer Gestaltsänderung verbunden. Martensit weist hochbewegliche Gittergrenzflächen auf, die bis zu 8% (NiTi Legierung) verformbar sind. Bei einer konstanten niedrigen Temperatur bleibt diese Verformung stabil. Bei der Erwärmung des verformtes Martensitgitters findet die Rückumwandlung in Austenit statt und die ursprüngliche Gestalt stellt sich wieder ein.

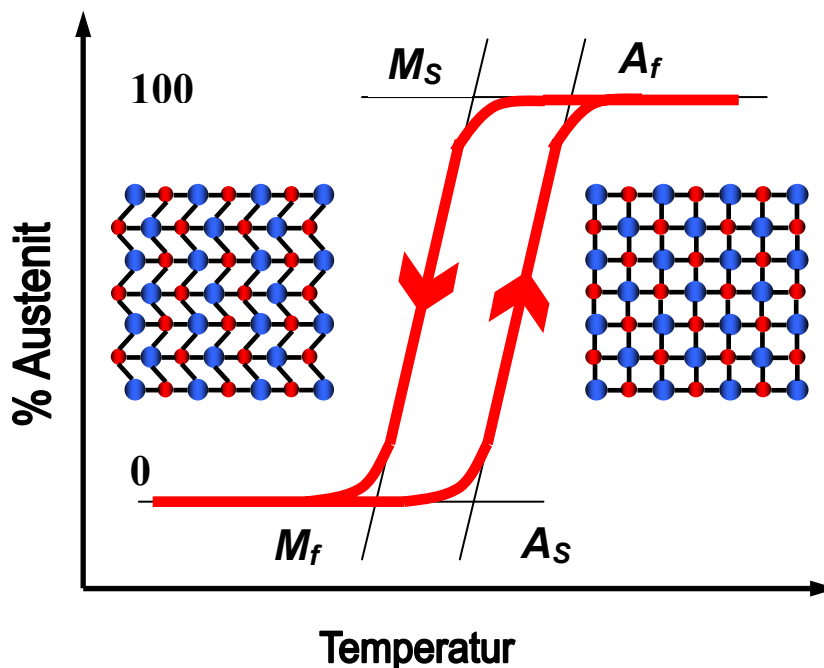


Abb.2.4 Die Temperaturabhängigkeit des Austenitanteils in FGL

Die Umwandlung Austenit/Martensit und die Rückumwandlung Martensit/Austenit finden bei unterschiedlichen Temperaturen statt. Es entsteht deshalb eine so genannte Hysterese (s. **Abb.2.4**). Die in **Abb.2.4** gekennzeichneten Temperaturen sind: A_s (Austenit Start), A_f (Austenit Finish), M_s (Martensit Start) und M_f (Martensit Finish).

2.2.1 Der Einwegeffekt

Wenn eine Probe aus einer Formgedächtnislegierung im martensitisches Zustand soweit gedehnt wird, dass der Dehnungsbereich des Martensitplateaus nicht überschritten wird, bleibt sie bei Wegnahme der Kraft im gedehnten Zustand. Wird die Feder erwärmt und überschreitet sie die A_s -Temperatur so kehrt sie in die ursprüngliche Form zurück. Bei Kühlung unter die M_s -Temperatur erfolgt keine Formveränderung, sofern keine Kraft mehr auf die Feder einwirkt. Das ist der *Einwegeffekt* (s. **Abb.2.5**).

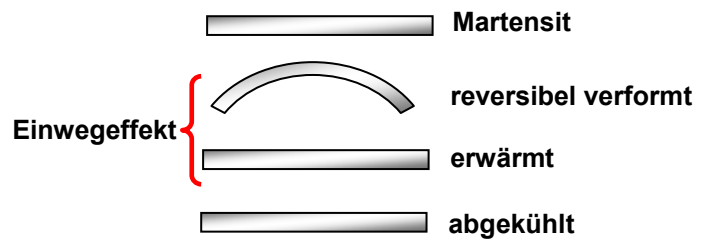


Abb.2.5 Der Einwegeffekt

Formgedächtnismetalle mit Einwegeffekt werden für Verbindungs-, Befestigungs-, und

Dichtungselemente verwendet. Wird nur mit kleinen Verformungen gearbeitet, dann kann man den Einwegeffekt beliebig wiederholen. Bei höheren Kräften wächst die Zahl irreversibler Verformungen und die Formrückkehr wird unvollständig [2].

2.2.2 Das Zweivegeverhalten

Wie bereits erwähnt, erfolgt der Einwegeffekt nach dem Auftreten einer nicht permanenten externen Kraft. Wirkt diese Kraft in Form einer konstanten mechanischen Belastung, kann ein Zweivegeverhalten erreicht werden. Die Kraft die auf die Probe einwirkt muss stark genug sein, um eine Dehnung im martensitischen Zustand zu erzeugen aber zu schwach um den austenitischen Zustand zu beeinflussen.

2.2.3 Der Zweiwegeeffekt

Formgedächtnislegierungen können auch einen Zweiwegeeffekt aufweisen indem sich die FG-Probe an zwei Formen „erinnern“ kann. Die Voraussetzung für den Zweiwegeeffekt ist die Dehnung der Probe über das Martensitplateau hinaus. Bei Erwärmung wird nur der reversible Anteil der

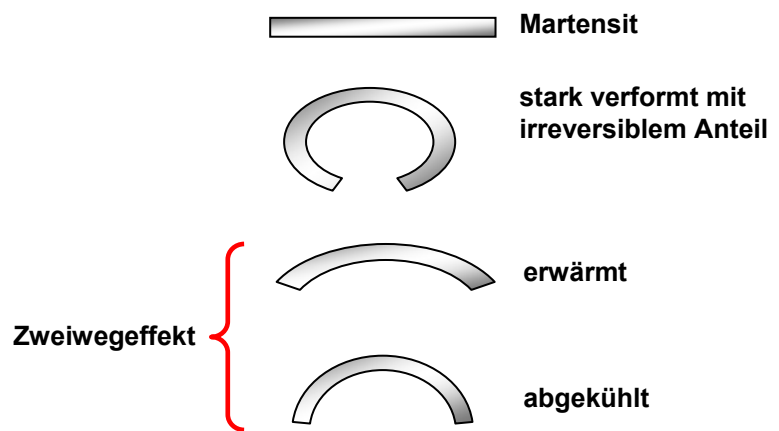


Abb.2.6 Der Zweiwegeeffekt

Martensitverformung rückgängig gemacht. Im Gegenteil zum Einwegeeffekt wird die ursprüngliche Form der Probe nicht vollständig wiederhergestellt (s. **Abb.2.6**). Beim Abkühlen entsteht auch eine völlig neue Niedertemperaturform. Bei weiteren Heiz- und Kühlprozessen „erinnert“ sich die Probe an die Hoch- und Niedertemperaturphase ohne dass eine externe mechanische Kraft erforderlich ist. Der Zweiwegeeffekt ist aber kleiner als das Zweiwegeverhalten.

2.2.4 Der All-Round-Effekt

Einige Nickel-Titan Legierungen weisen den All-Round-Effekt auf (s. **Abb. 2.7**), ein besonders ausgeprägter Formgedächtniseffekt der mit dem normalen Zweiwegeeffekt vergleichbar ist.

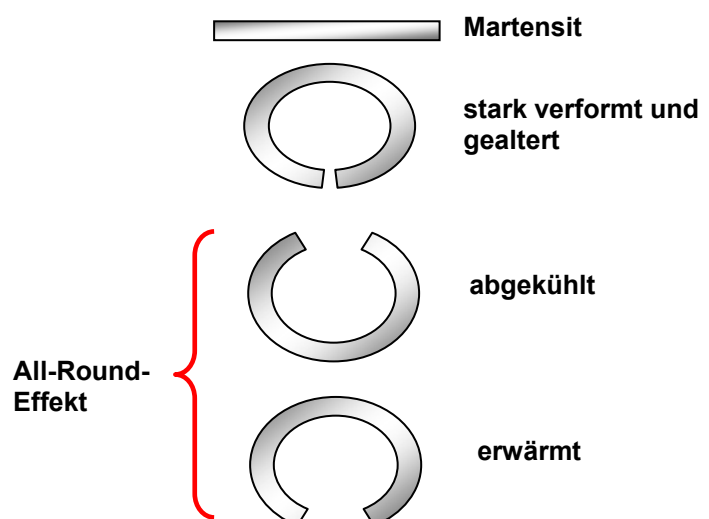


Abb. 2.7 Der All-Round-Effekt

3. THERMOMECHANISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL

Mechanische Eigenschaften oder Gefügetransformationen der Formgedächtnismetalle hängen von meist thermischen (aber auch mechanischen) Einflussfaktoren ab. Im nachfolgenden Diagramm wird die Variation von Spannung und Dehnung einer NiTi Legierung bei verschiedenen Temperaturen dargestellt.

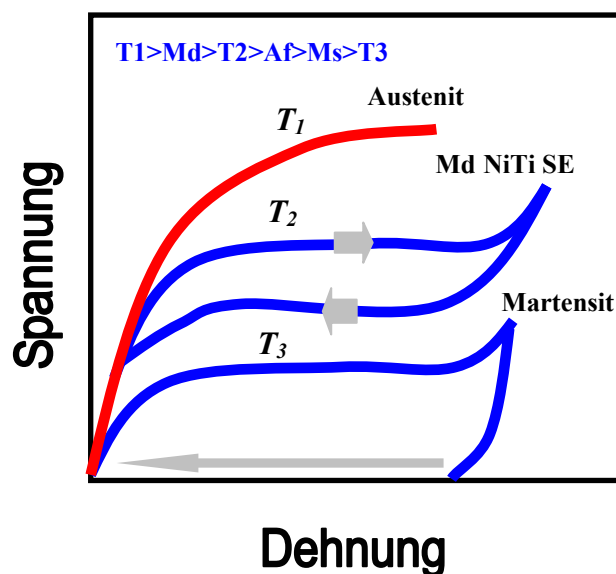


Abb.3.1 Variation von Spannung und Dehnung einer NiTi Legierung bei verschiedenen Temperaturen

Im Bereich der niedrigen T_3 Temperatur, erinnert sich die Probe bei Temperaturerhöhung, nach der Entfernung externer Belastungen, an die ursprüngliche Form. Das wird als normaler FG Effekt betrachtet.

Bei der höheren Temperatur, T_2 , tritt ein ungewöhnliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf, wegen der Verformung des Austenitgefüges im Temperaturbereich zwischen A_f und der kritischen Temperatur M_d . Es ist der so genannte Pseudoelastizitäts- (oder Superelastizitäts-) Effekt, der auf die Bildung von spannungsinduziertem Martensit zurückzuführen ist. Wird eine Formgedächtnislegierung die sich in einem hohen Temperaturbereich befindet (unter M_d , aber über A_f) mit einer Spannung beaufschlagt, können bevorzugte

Martensitvarianten entstehen, die zum Beispiel im Falle einer Zugspannung zu einer Probenverlängerung führen [2]. Mit zunehmender Spannung entstehen und wachsen die Martensitvarianten, während sie bei Spannungsabbau in umgekehrter Weise verschwinden. Veränderungen der Temperatur haben keinen Einfluss auf diese Prozesse.

Wird der Temperaturbereich $T_2 - M_d$ überschritten, ist die Formveränderung der Probe irreversibel. Das Verfestigungsverhalten ist konventionell, daher entsteht keine Phasenumwandlung und kein Martensit wird induziert.

3.1 MECHANISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL

Das mechanische Verhalten der Formgedächtnislegierungen ist vom Gefügestand abhängig. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve der Martensit-Phase weist drei unterschiedliche Bereiche auf. Im ersten Bereich (I) verhält sich das FG-Material wie eine konventionelle Legierung. Dann entsteht das untere Martensit-Plateau, aufgrund des Verschiebens von Martensit-Zwillingsgrenzen (das sog. Entzwillingen) (II).

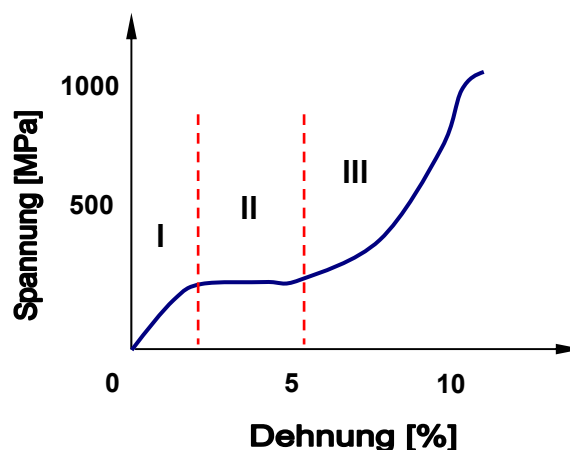


Abb.3.2 Spannung-Dehnungs Diagramm einer NiTi Legierung im martensitischen Zustand

Die Voraussetzung für diesen Prozess ist eine elastische Deformation des entzwilligten Martensits kombiniert mit der Bildung von neuen Martensit-Varianten. Das Formrückkehrpotenzial wird hiermit erhöht.

Der dritte und letzte Bereich entsteht wie bei den meisten Metallen aufgrund plastischer Deformation (III). Deshalb wird das maximale Formrückkehrpotenzial zum Ende des zweiten Bereiches erreicht. In der Regel nimmt der Memory-Effekt mit der Größe der Dehnung ab.

Die Länge des Martensit-Plateaus bestimmt die Größe der Dehnung bei dem Übergang zwischen dem zweiten und dem dritten Bereich, und damit auch die Größe des Formgedächtniseffekts.

Die Gefügeumwandlung der aktuellen FGL Anwendungen erfolgt in einem Temperaturbereich zwischen -100 bis 100°C , mit einer Hysterese von 30 bis 50K. Eine Methode für die Ermittlung der Umwandlungstemperaturen ist die zyklische Temperierung der Probe unter einer gewissen mechanischen Belastung. Meistens steigt die Umwandlungstemperatur linear, mit der Erhöhung der Belastung (s. **Abb.3.3**).

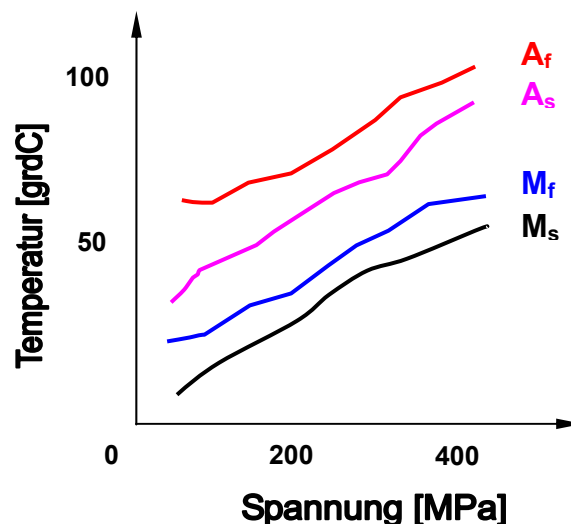


Abb.3.3 Temperatur-Spannungsdiagramm einer NiTiCu Legierung

Die Steigung der Kurven beinhalten wichtige Informationen über die Qualität der Legierung, was sehr wichtig ist wenn die Leistung der Probe für eine bestimmte FGL Anwendung überprüft wird. Zum Beispiel bestimmen A_s und M_s die Steuerung von FG-Aktoren. Bei Anwendungen von einer FG-Probe die statisch belastet wird (Befestigung und Verbindungselemente), nimmt die interne Spannung der Probe mit der Kühlung unterhalb der M_d Temperatur ab. Die Spannungsrate einer

Formgedächtnislegierung ist gefügeabhängig, und deckt einen Bereich zwischen 2.5 bis 15 MPa/°C ab.

3.2 THERMISCHE EINFLUSSFAKTOREN AUF FGL

Die einfache mechanische Belastung verändert das Martensit-Plateau eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Eine 20% kaltverformte FG-Legierung hat eine sehr hohe Streckgrenze. Eine thermische Behandlung des Werkstoffs wird den Memory Effekt wiederherstellen aber die Streckgrenze reduzieren. Der Zusammenhang zwischen Kaltverformung und Thermischer Behandlung ergibt die Effizienz des Shape-Memory Effekts. Die Kaltverformung bestimmt die Dichte der Zufallsversetzungen im Gefüge und beschränkt damit die Mobilität der Zwillingsgrenzen. Die Versetzungen werden dann während des Anlassprozesses beseitigt [3].

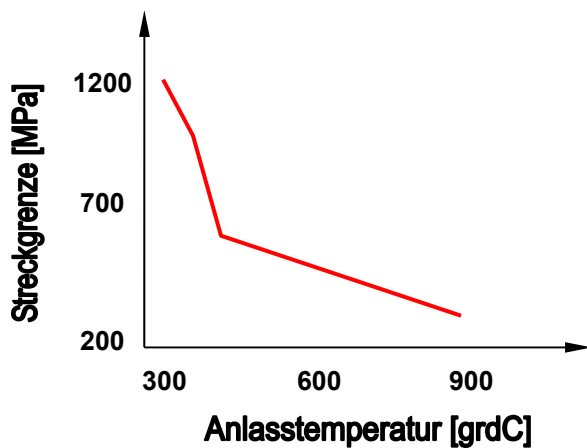


Abb.3.4 Austenitische Streckgrenze einer 40% kaltverformten NiTi Legierung

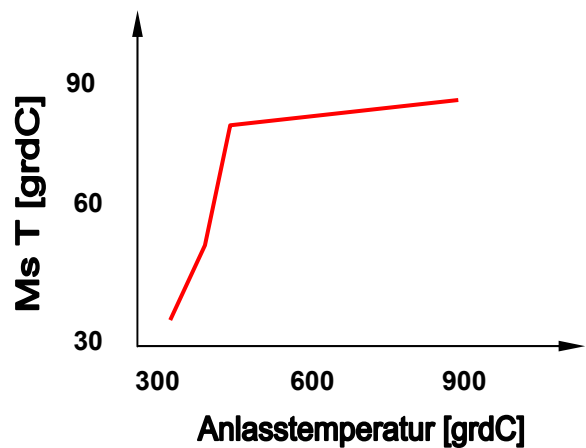


Abb.3.5 Ms Umwandlungstemperatur bei 150 MPa der gleichen Legierung

Abb.3.4 zeigt den Effekt der Anlasstemperatur auf die Streckgrenze einer 40% kaltverformten Formgedächtnislegierung. Ein schneller Abfall der Kurve ist im 350 bis 450°C Temperaturbereich zu erkennen. Für die gleiche Legierung wird der Effekt der Anlasstemperatur auf die Ms-Umwandlungstemperatur in **Abb.3.5** gezeigt. Im

gleichen Temperaturbereich, 350-450°C, ist ein schneller Anstieg der Ms-Temperatur zu erkennen.

Bei dem Vergleich der zwei Diagramme ist festzustellen, dass obwohl die Streckgrenze einer Formgedächtnislegierung beim Anlassprozess mit steigender Anlassstemperatur abgesenkt wird, erhöht sich gleichzeitig die Ms Temperatur.

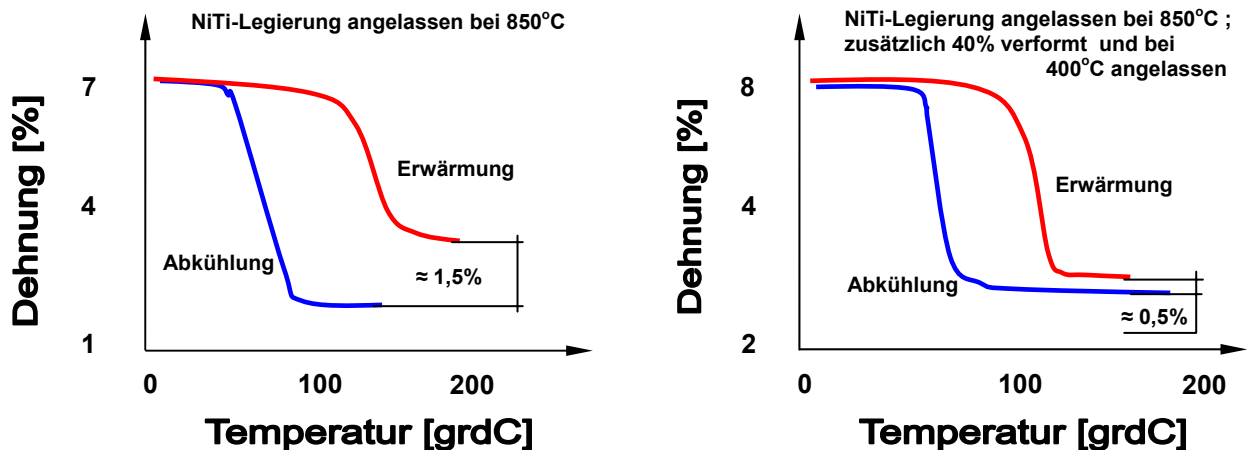


Abb.3.6 Temperatur-Dehnungsdiagramm einer NiTi Legierung

Abb.3.6 zeigt das Temperatur-Dehnungsdiagramm einer NiTi Legierung, angelassen bei 850°C. Nach dem Dehnungsversuch (ein Zyklus) liegt der Anteil irreversibler Verformung bei ca. 1,5%. Wenn die gleiche NiTi Legierung zusätzlich 40% kaltverformt und bei 400°C angelassen wird, dann sinkt der Anteil irreversibler Verformungen (A.i.V) bis auf ca. 0,5%. Das zusätzliche Anlassen der FGL im Temperaturbereich 350 – 450 °C kombiniert mit einer Kaltverformung bewirkt einen niedrigen A.i.V der auch nach mehreren Arbeitszyklen erhalten bleibt [3].

Für Aktor - Anwendungen ist meistens eine hohe Ms-Temperatur erforderlich. Durch Anlassen, das frühere Kaltverformungen ausgleicht, wird die hohe Ms-Temperatur erreicht, die zyklische Stabilität nimmt aber ab. Eine starke Kaltverformung bewirkt eine Erhöhung der Bruchfestigkeit und der R-Phase.

Die R-Phase ist eine premartensitische Umwandlung die eine Formrückkehr aufweist aber ohne Hysterese abläuft. Im Vergleich mit dem normalen Memory-Effekt ist der Effekt der R-Phase wesentlich kleiner, Verformungen bis ca. 1% werden rückgängig gemacht. Das Erhöhen der Anlassstemperatur bewirkt eine Minderung des

Übergangsbereiches der R-Phase. Die Stabilität der R-Phase und des Memory-Effekts nehmen ab. Bei einer Anlasstemperatur von 600°C tritt der Rekristallisationsprozess ein und die R-Phase verschwindet [3].

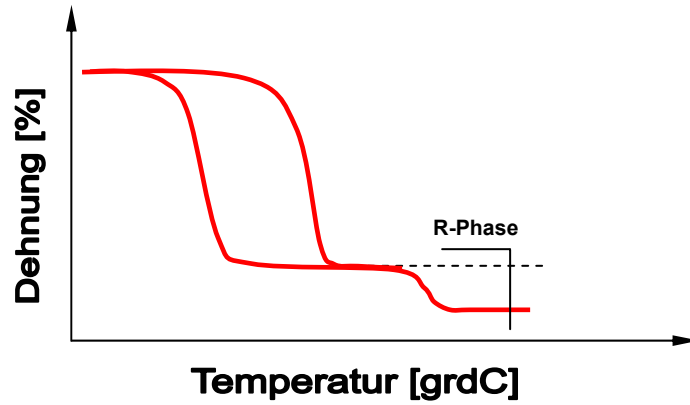


Abb.3.7 Die martensitische R-Phasen Umwandlung

4. ALLGEMEINE DARSTELLUNG DER PROJEKTAUFGABEN

4.1 STRUKTUR DER FG-PRÜFANLAGE

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Prüfanlage soll zwei wichtige Funktionen erfüllen: Ermittlung der Drahteigenschaften (Testing) und Vorbereitung der Drähte für die verschiedenen FGL Applikationen (Training).

Als Analyse der Drahteigenschaften wird hierbei die genaue Ermittlung der Phasenumwandlungstemperaturen (A_s , A_f , M_s und M_f) betrachtet, die bei Variation verschiedener mechanischer und thermischer Parameter erfolgt.

Durch das Trainieren der Drähte wird im Material ein bestimmtes

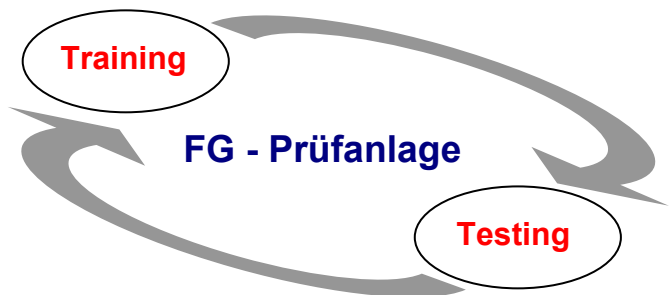


Abb.4.1 Funktionen der Prüfanlage

Formgedächtnisverhalten induziert, das vom Einsatzbereich der FG-Materialien abhängig ist. Der Trainingseffekt wird durch zyklische mechanische und thermische Belastungen erreicht. Die trainierten Drähte können dann für verschiedene FG-Anwendungsbereiche eingesetzt werden. Durch den Einsatz der oben genannten Funktionen wird auch ein wichtiger Schritt in Richtung Qualitätssicherung gemacht. Die Benutzung von fehlerhaften oder ungeeigneten Formgedächtnismaterialien wird damit vermieden.

Im Mittelpunkt der Prüfeinrichtung befindet sich das mechanische Belastungsaggregat. Dieses soll eine genaue Kraft auf die Proben aufbringen und die Dynamik des Prüfvorlaufs bestimmen. Die Größe der einwirkenden Kraft und die Dauer der Arbeitszyklen sollen durch einen PC kontrollierbar sein. Bei Formgedächtnislegierungen ist die Ermittlung der Phasenumwandlungstemperaturen erforderlich. Deshalb wird eine Temperieranlage benötigt die ähnlich dem Belastungsaggregat die Probe thermisch belasten soll. Die Temperieranlage soll auch durch einen PC steuerbar sein. Ein Anschluss zwischen dem

Belastungsaggregat und der Temperieranlage ist erforderlich; Beispiel: bei Erreichen einer bestimmten Temperatur wird die Probe entlastet.

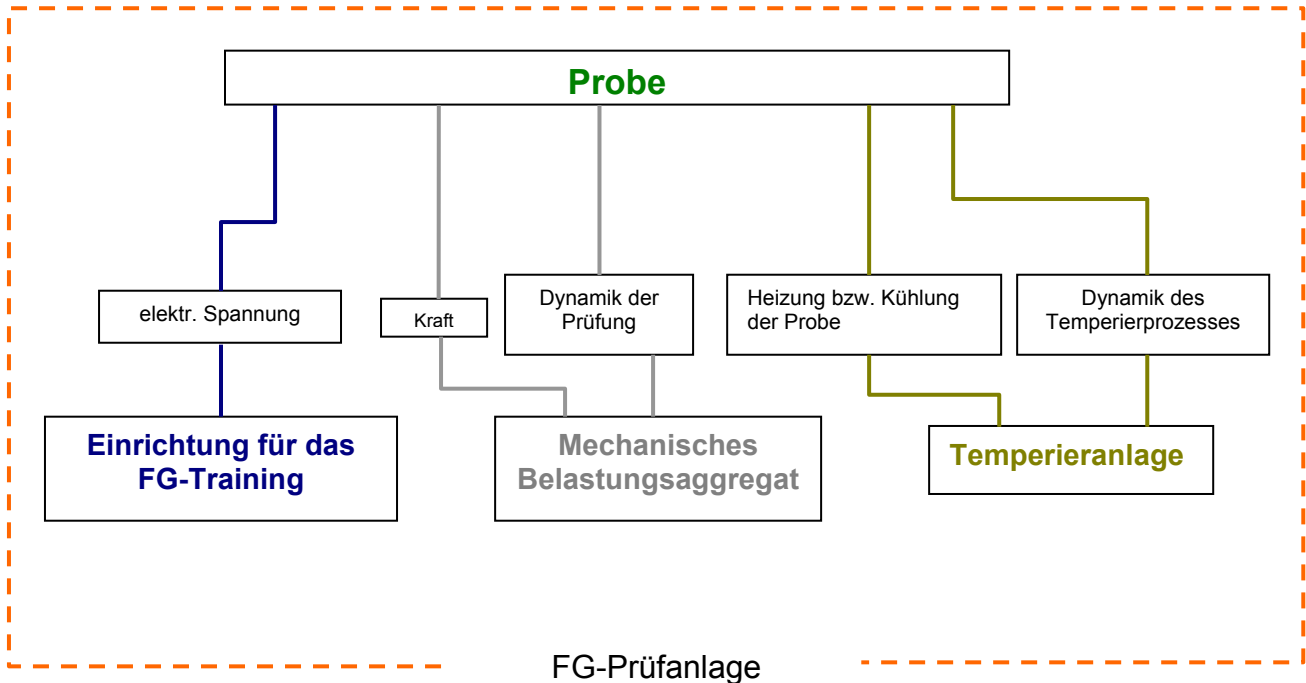


Abb.4.2 Struktur der Prüfanlage

Ein weiteres Element der Prüfanlage ist die Einrichtung für die Widerstandsmessung an der Probe. Die Widerstandsänderung bei Variation der Last und Temperatur erweitert den Einblick in das Verhalten von Formgedächtnislegierungen.

4.2 DAS MECHANISCHE BELASTUNGSAGGREGAT

Viele Elemente aus Formgedächtnislegierungen arbeiten unter ständigen mechanischen Belastungen. Wie im vorigen Kapitel beschrieben ist eine der Voraussetzungen für den Shape-Memory Effekt eine gewisse Dehnung der Probe, vor oder über das Martensitplateau hinaus: die „verzwillingte“ Martensitstruktur wird in eine „verzerrte“ Martensitstruktur umgewandelt. Das Aggregat muss in der Lage sein die FG-Proben mit einer vom Benutzer bestimmte Geschwindigkeit zu dehnen. Das Martensitplateau befindet sich bei den meisten Legierungen bei einem Wert von ca. 4% Dehnung.

Gerät	Funktion	Konstruktion	Parameter	Messeinheit
Mechanisches Belastungsaggregat	Belastung der Probe	mechanisch hydraulisch elektrisch	Kraft F 0-2.5 [kN]	Kraftdose
	Dynamik der Prüfung		Geschwindigkeit v 0-400 [mm/s]	---
Temperieranlage	Temperatur bestimmen (Heizen bzw. Kühlen)	Halbschalen-Konstruktion Heizung: Widerstände, Peltier, Mikrowelle Kühlung: N ₂ , Peltier, Kühlthermostat	Temperatur T -50 bis 250 [°C]	Temperatursensor
	Dynamik des Temperierprozesses		Heiz-/Kühlgeschwindigkeit	---
Einrichtung für das FG- Training	Bestromung der Probe	Netzteil	elektr. Spannung U 0-20 [V]	Messkarte (Analog-Eingang)

Tabelle 4.1

Da die FG-Proben unterschiedliche Durchmesser haben muss der Benutzer die Dehnungsgeschwindigkeit der Probengeometrie anpassen. Das mechanische Belastungsaggregat soll eine horizontale Konstruktion sein, gesteuert mechanisch, elektrisch oder elektro-hydraulisch (s. **Abb.4.4**).

4.3 DIE TEMPERIERANLAGE

Eine weitere Voraussetzung für den Formgedächtniseffekt ist die Gefügeumwandlung aufgrund der Temperaturänderungen. Bei normalen Stählen erfolgt die Austenitumwandlung bei ca. 723°C. Formgedächtnislegierungen benötigen für die reversible Austenitumwandlung wesentlich niedrigere Temperaturen; z.B. erfolgt bei NiTi Legierungen die Austenitumwandlung bei ca. 50-150 °C. Das Aggregat soll also in der Lage sein, Temperaturen bis 200-250 °C zu erreichen. Die Martensitumwandlung erfolgt bei niedrigeren Temperaturen und deshalb muss die Probe auch bis in den negativen Temperaturbereich abgekühlt werden. Außer der

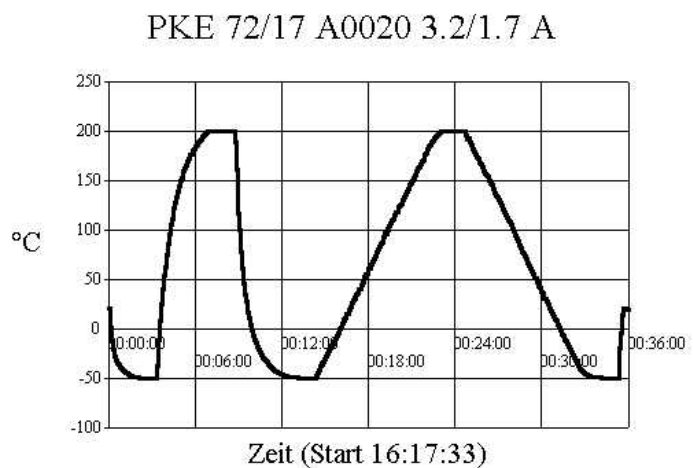


Abb.4.3 Heiz- und Kühlverlauf der Temperieranlage

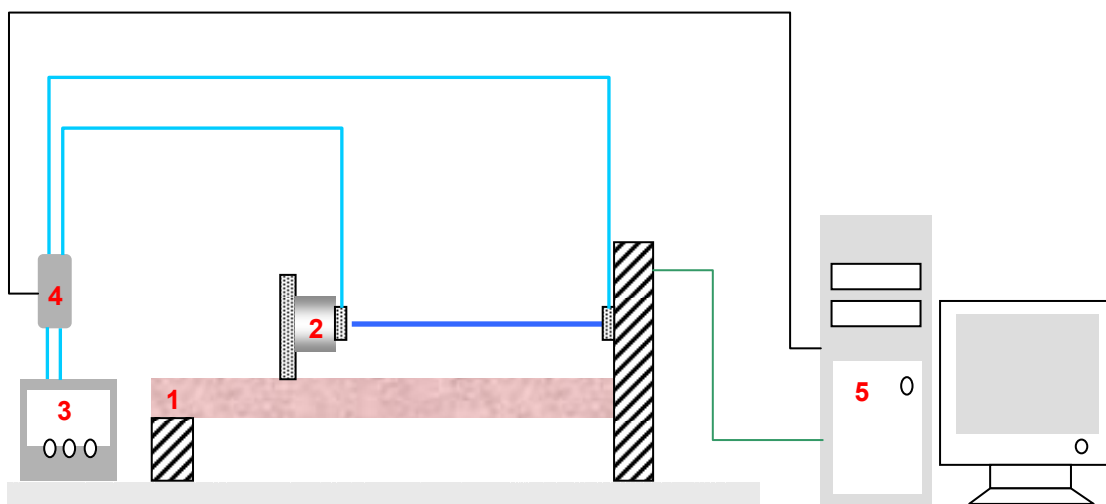
Heizanlage soll also auch eine Kühleinrichtung vorhanden sein die, die Probe abkühlt und auch FG-Untersuchungen im negativen Temperaturbereich erlaubt. Die Kühleinrichtung soll -50°C Werte ermöglichen. Für einige FG-Untersuchungen ist zyklisches Heizen und Kühlen erforderlich. Ein mögliches Beispiel dafür ist in der **Abb. 4.3** dargestellt.

Es gibt mehrere Varianten die Anlage zu heizen bzw. abzukühlen. Für das Heizen könnten elektrische Widerstände, Mikrowelle, Peltier Elemente oder eine Heizflüssigkeit (Heizthermostat) eingesetzt werden. Das Kühlen könnte durch flüssigen Stickstoff (N₂), Peltier Elemente oder eine Kühlflüssigkeit (Kühlthermostat) erreicht werden.

Eine geeignete Form für die Temperieranlage könnte eine klappbare Zweischalenkonstruktion sein.

4.4 DIE EINRICHTUNG FÜR DAS FGL-TRAINING

Die Anlage für das Training der FG-Materialien soll eine zyklische Bestromung Proben ermöglichen. Ein Netzteil liefert die benötigte elektrische Spannung. Der Stromkreislauf wird durch einen digitalen Schalter gesteuert.



- | | |
|---|----------------------|
| 1. Mechanisches Belastungsaggregat | 4. Relais |
| 2. Kraft-Messdose | 5. PC mit SPS |
| 3. Netzteil | |

Abb.4.4 Struktur der FGL-Trainieranlage

5. KONSTRUKTIONEN

5.1 KONSTRUKTION DER KIPPEINRICHTUNG

Das für den Prüfstand benötigte Belastungsaggregat (s. auch **Kap.4.2**) besteht aus einer universellen Zug-Prüfmaschine, hergestellt von der Firma Zwick/Roell (s.**Abb.5.1**). Ursprünglich ist das Aggregat als vertikale Ausführung konzipiert worden. Um in den Ofen eine homogene Temperaturverteilung ohne so genannten Kamineffekt zu gewährleisten, wurde eine Kippeinrichtung zur horizontalen Positionierung der Maschine konstruiert. Die Einrichtung ist mit Item Bauelementen zusammengebaut worden. Die folgende Tabelle enthält die für die Konstruktion benötigten Elemente.

Stückzahl oder laufender Meter [mm] bei Profile	Bezeichnung
550	Profil 8 80x40
50	Profil 8 80x40
50	Profil 8 80x40
252	Profil 8 40x40
152	Profil 8 40x40
152	Profil 8 40x40
8	Winkelsatz 8 40x40
2	Fußplatte 8 80x40, M10
2	Stellfuß D60 M10x75
2	Gummieinsatz D60
2	Abdeckkappe 8 80x40
6	Senkschraube M8x16
2	Stellfuß D40 M8x60
2	Gummieinsatz D40

Tabelle 5.1



Abb.5.1 Das mechanische Belastungsaggregat in vertikaler Ausführung

Die Kippeinrichtung besteht aus zwei Querträgern die an den beiden Enden der Maschine befestigt werden. Um den Prüfverlauf so wenig wie möglich zu beeinflussen, werden die Querträger auf gummierte, stufenlos höhenverstellbare Stellfüße gestützt.

Die gesamte Konstruktion wurde mit Hilfe der CAD Anwendung AutoCAD2000 und CAE Anwendung MsSolids gezeichnet und berechnet. Die folgende Abbildung zeigt ein 3D Modell der Konstruktion.

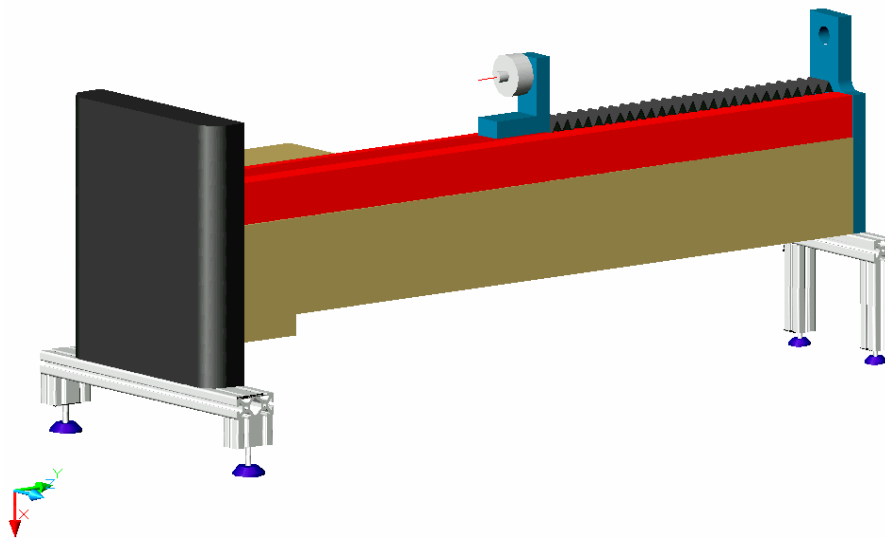
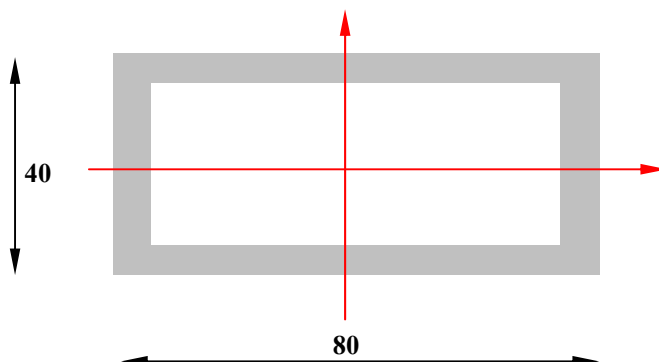


Abb.5.2 CAD Modell der Belastungsmaschine mit montierter Kippeinrichtung

Da die Kippeinrichtung die Stabilität der Prüfanlage absichert, wurden die zwei Querträger (Q1 und Q2) berechnet. Zur Berechnung wurde das Kalkulationsprogramm MsSolids verwendet.

Berechnung von Q1

- die Berechnung des Querschnitts des 80x40 Profils:



Y - Y Properties				Z - Z Properties			
Elastic Modulus	E	73.100,0000	MPa	Elastic Modulus	E	73.100,0000	MPa
From left to centroid	Z left	40,0000	mm	From bottom to centroid	Y bot	20,0000	mm
From centroid to right	Z right	40,0000	mm	From centroid to top	Y top	20,0000	mm
Area of shape	A	3.200,0000	mm ²	Area of shape	A	3.200,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iy	1,7067E+06	mm ⁴	Moment of Inertia	Iz	426.666,6667	mm ⁴
Section Modulus	Sy	42.666,6667	mm ³	Section Modulus	Sz	21.333,3333	mm ³
Section Modulus (left)	S left	42.666,6667	mm ³	Section Modulus (bottom)	S bot	21.333,3333	mm ³
Section Modulus (right)	S right	42.666,6667	mm ³	Section Modulus (top)	S top	21.333,3333	mm ³
Radius of Gyration	ry	23,0940	mm	Radius of Gyration	rz	11,5470	mm
Plastic Modulus	Zy	64.000,0000	mm ³	Plastic Modulus	Zz	32.000,0000	mm ³
Shape Factor		1,5000		Shape Factor		1,5000	
From left to plastic n.a.	Zp left	40,0000	mm	From bottom to plastic n.a.	Yp bot	20,0000	mm
From plastic n.a. to right	Zp right	40,0000	mm	From plastic n.a. to top	Yp top	20,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	2,1333E+06	mm ⁴	Polar Moment of Inertia	J	2,1333E+06	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴	Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	1,7067E+06	mm ⁴	Maximum Moment of Inertia	I _{max}	1,7067E+06	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	426.666,6667	mm ⁴	Minimum Moment of Inertia	I _{min}	426.666,6667	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees	Angle from z axis to I _{max} axis	B	90,0000	degrees
		Counterclockwise				Clockwise	

Abb.5.3 Die mechanischen Eigenschaften des Querschnitts des 80x40 Profils

- die Berechnung des 80x40 Profils:

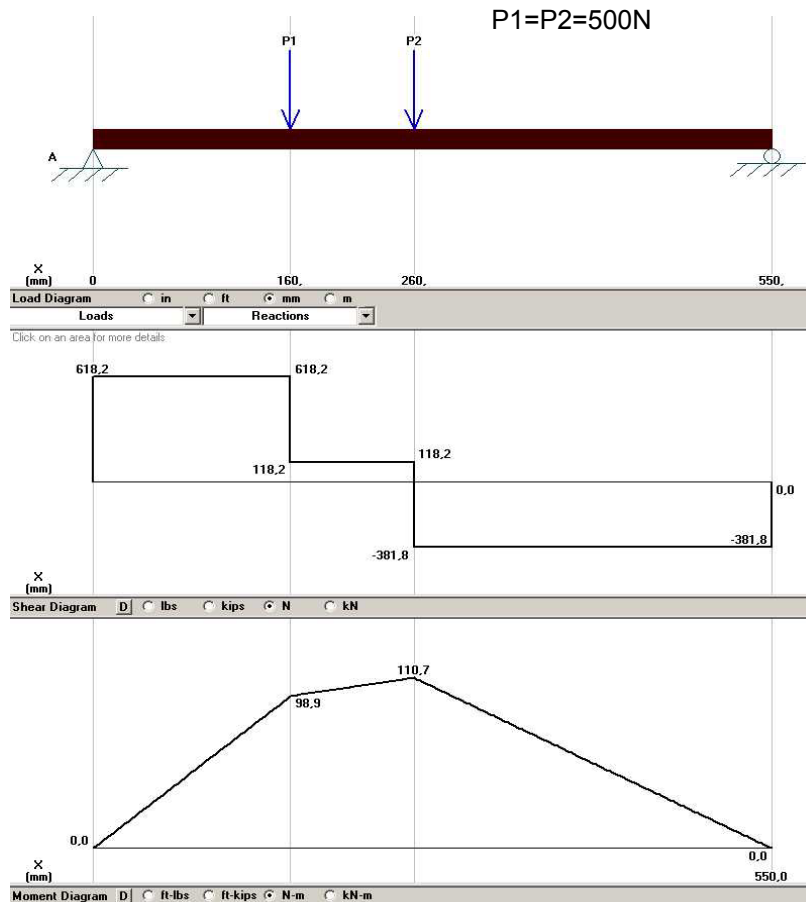


Abb.5.4 Darstellung der Scherkräfte und des Biegemoments

- die Biegefestigkeit des Querbalkens Q1 ist:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_Z} = \frac{M_B}{\frac{I_Z}{y_{\max}}} = 10,312 \text{ [MPa]} < \sigma_{BAI} = 70 \text{ [MPa]}$$

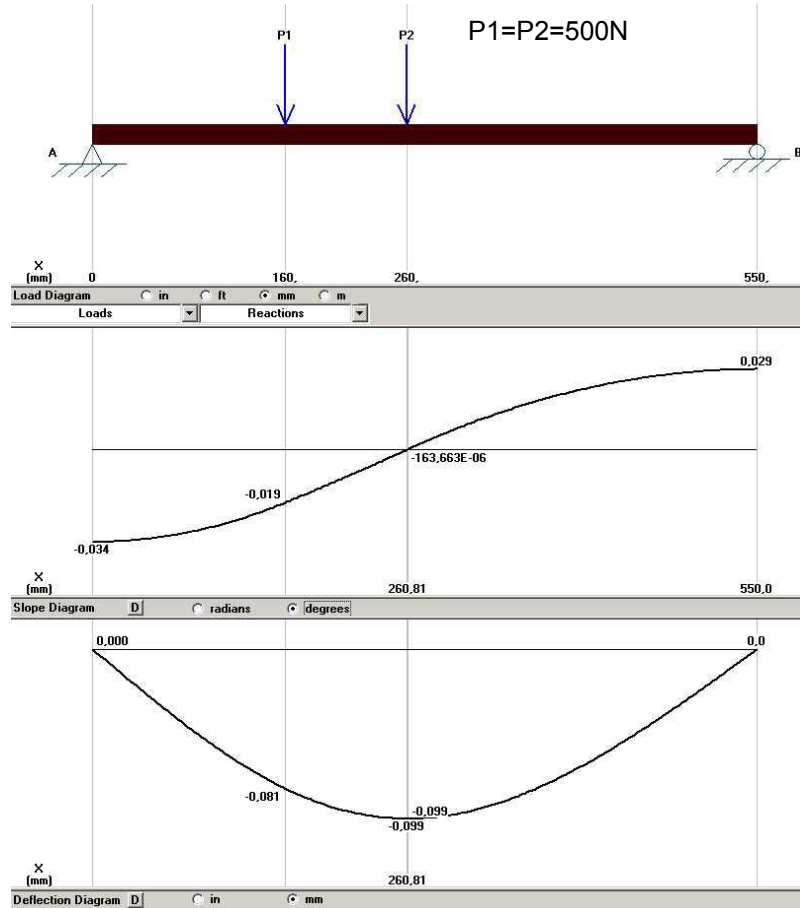
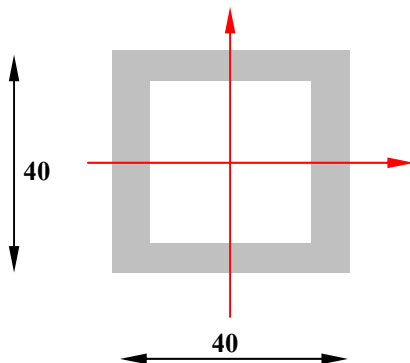


Abb.5.5 Darstellung des Steigungswinkels und der Durchbiegung

Berechnung von Q2

- die Berechnung des Querschnitts des 40x40 Profils:



Y - Y Properties				Z - Z Properties			
Elastic Modulus	E	73.100,0000	MPa	Elastic Modulus	E	73.100,0000	MPa
From left to centroid	Z left	20,0000	mm	From bottom to centroid	Y bot	20,0000	mm
From centroid to right	Z right	20,0000	mm	From centroid to top	Y top	20,0000	mm
Area of shape	A	1.600,0000	mm ²	Area of shape	A	1.600,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iy	213.333,3333	mm ⁴	Moment of Inertia	Iz	213.333,3333	mm ⁴
Section Modulus	Sy	10.666,6667	mm ³	Section Modulus	Sz	10.666,6667	mm ³
Section Modulus (left)	S left	10.666,6667	mm ³	Section Modulus (bottom)	S bot	10.666,6667	mm ³
Section Modulus (right)	S right	10.666,6667	mm ³	Section Modulus (top)	S top	10.666,6667	mm ³
Radius of Gyration	ry	11,5470	mm	Radius of Gyration	rz	11,5470	mm
Plastic Modulus	Zy	16.000,0000	mm ³	Plastic Modulus	Zz	16.000,0000	mm ³
Shape Factor		1,5000		Shape Factor		1,5000	
From left to plastic n.a.	Zp left	20,0000	mm	From bottom to plastic n.a.	Yp bot	20,0000	mm
From plastic n.a. to right	Zp right	20,0000	mm	From plastic n.a. to top	Yp top	20,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	426.666,6667	mm ⁴	Polar Moment of Inertia	J	426.666,6667	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴	Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	213.333,3333	mm ⁴	Maximum Moment of Inertia	I _{max}	213.333,3333	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	213.333,3333	mm ⁴	Minimum Moment of Inertia	I _{min}	213.333,3333	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees	Angle from z axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees
		Counterclockwise				Clockwise	

Abb.5.6 Die mechanischen Eigenschaften des Querschnitts des 40x40 Profils

- die Berechnung des 40x40 Profils:

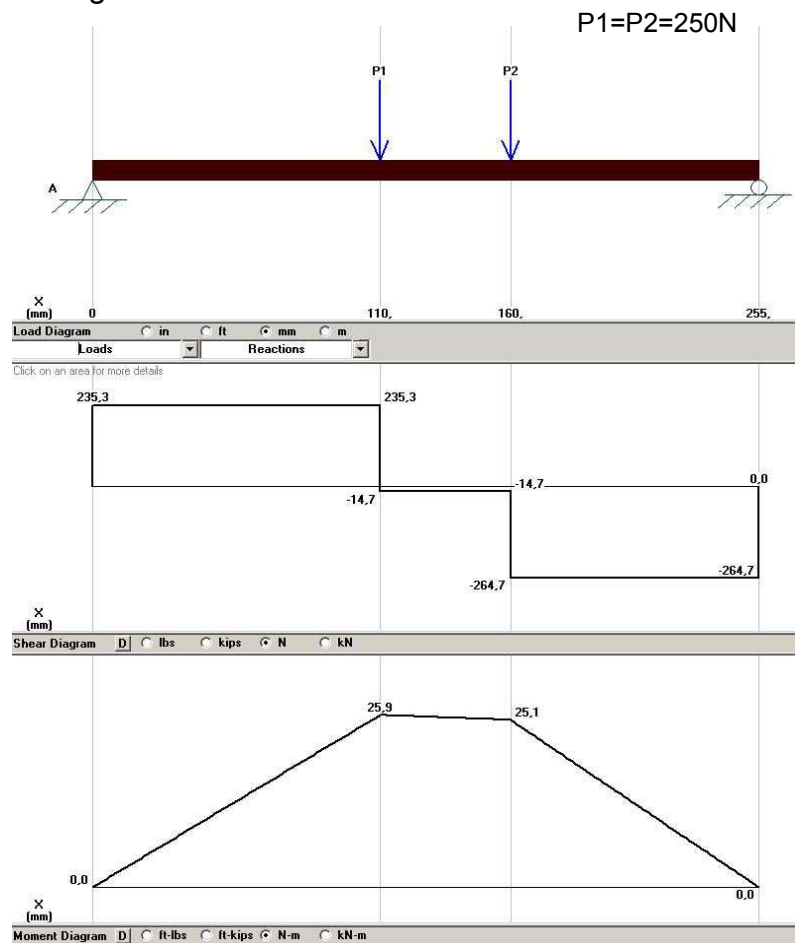


Abb.5.7 Darstellung der Scherkräfte und des Biegemoments

- die Biegefestigkeit des Querbalkens Q2 ist:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_Z} = \frac{M_B}{\frac{I_Z}{y_{\max}}} = 4,835 \text{ [MPa]} < \sigma_{BAI} = 70 \text{ [MPa]}$$

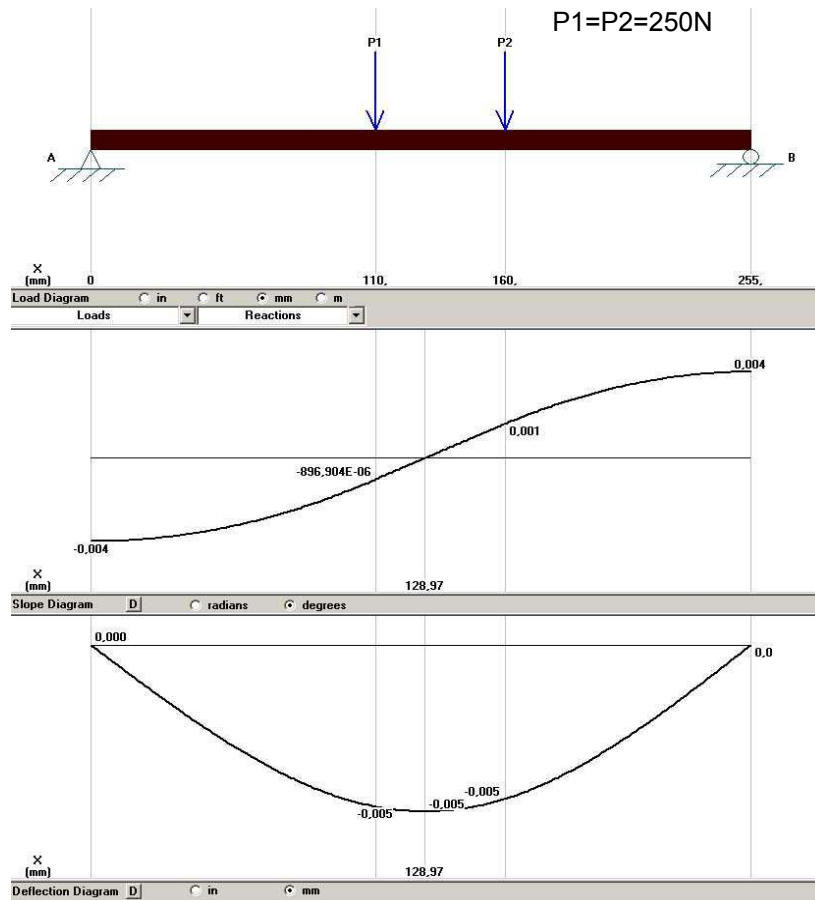


Abb.5.8 Darstellung des Steigungswinkels und der Durchbiegung

5.2 KONSTRUKTION DES ARBEITSTISCHES

Der Prüfstand benötigt eine stabile Positionierung. Dies wurde durch die Konstruktion eines massiven Arbeitstisches erreicht. Der Tisch besteht aus einer schweren Granitplatte die auf einem Gestell aus Alu-Profilen aufliegt. Die folgende Abbildung zeigt ein 3D Modell der Konstruktion.



Abb.5.9 CAD Modell des Arbeitstisches

Die für den Arbeitstisch benötigten Elemente sind in den folgenden Tabellen aufgezeigt.

A. Tischplatte

Baustoff	Farbe	Grösse LxBxH (mm)	Gewicht (kg)
Granit, massiv, Oberfläche und Kanten hochglanzpoliert	Serizzo Granit	1830x640x30	ca. 105

Tabelle 5.2

B. Aluminium Gerüst

Stückzahl oder laufender Meter [mm] bei Profile	Bezeichnung
1810	Profil 8 80x40 2N leicht
1810	Profil 8 80x40 2N leicht
460	Profil 8 80x40 2N leicht
460	Profil 8 80x40 2N leicht
640	Profil 8 80x80 4N90 leicht
640	Profil 8 80x80 4N90 leicht
640	Profil 8 80x80 4N90 leicht
640	Profil 8 80x80 4N90 leicht
8	Winkelsatz 8 160x80
8	Winkelsatz 8 80x80
4	Stellfuß D80 M10x80
4	Fußplatte 8 80x80 M10
4	Gummieinsatz D80
8	Abdeckkappe 8 40x40

Tabelle 5.3

Das Alu-Gerüst besteht aus vier 80x80 Profilen die sich auf stufenlos einstellbare Gummifüße stützen. Die vier Profile werden mittels eines rechteckigen Rahmens fixiert. Der Rahmen wurde aus breiten 80x40 Profilen konstruiert, mit glatter Oberfläche, um eine bessere Unterlage für die Granitplatte zu schaffen.



Abb.5.10 Montage des Alu-Gerüsts

Die massive Steinplatte wurde mit einem doppelten Streifen aus Silikon-Gel am Rahmen befestigt. Eine exakte waagerechte Position des Arbeitstisches wird durch das Einstellen der vier GummifüÙe erreicht.



Abb.5.11 Die fertige Konstruktion des Arbeitstisches

Weil der Arbeitstisch deutlich überdimensioniert ist (um eine sehr hohe Stabilität gewährleisten zu können) entfiel die Festigkeitsberechnung dieser Konstruktion.

5.3 KONSTRUKTION DES OFENHALTERS

Für das Heiz- und Kühlsystem des Prüfstands wurde ein Gerüst konstruiert das ebenfalls aus Item Elementen besteht und an den Querträger (Q1) der Kippeinrichtung montiert wurde. Die folgende Abbildung zeigt ein 3D Modell dieser Konstruktion.

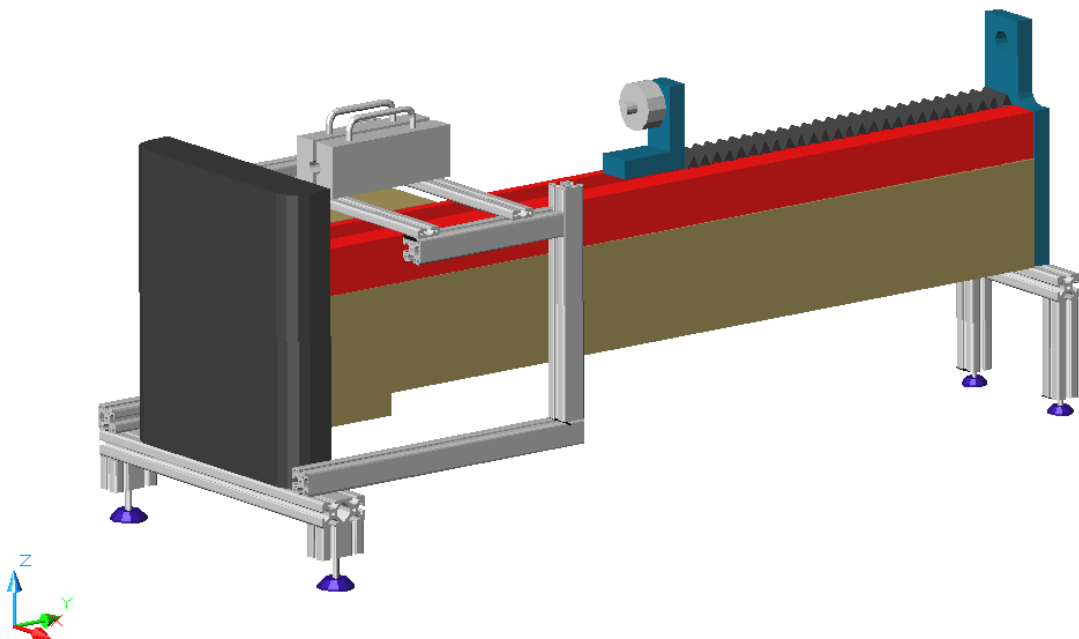


Abb.5.12 CAD Modell der Prüfmaschine mit Ofenhalter

Die für den Ofenhalter benötigten Elemente sind in den folgenden Tabellen aufgezeigt.

Stückzahl oder laufender Meter [mm] bei Profile	Bezeichnung
520	Profil 8 40x40 1N leicht
520	Profil 8 40x40 1N leicht
360	Profil 8 40x40 1N leicht
360	Profil 8 40x40 1N leicht
270	Profil 8 40x40 1N leicht

270	Profil 8 40x40 1N leicht
481	Profil 8 40x16
481	Profil 8 40x16
4	Abdeckkappe 8 40x416
2	Direkt-Verbindungssatz 8
6	Winkelsatz 8 40x40
8	Abdeckkappe 8 40x40

Tabelle 5.4

Bei dem Ofenhalter wurde nur das untere Profil (T1) berechnet, da hier die größte Biegebelastung auftritt.

Das Ziel aller bisher durchgeführten Festigkeitsberechnungen ist die Ermittlung der maximalen

Durchbiegung, um die Stabilität der

Konstruktion zu bewerten. Wegen der robusten Ausführung der Item-Profile und der relativ niedrigen Gewichtsbelastungen können Brüche oder plastische Verformungen der Konstruktionen nahezu ausgeschlossen werden.

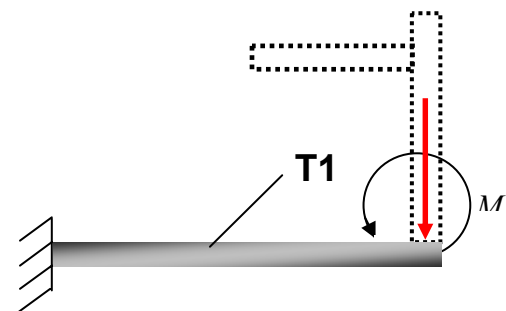


Abb.5.13 Belastungsschema des Ofenhalters

Die mechanischen Eigenschaften des Querschnitts des 40x40 Profils können aus der **Abb.5.3** entnommen werden.

- die Biegefestigkeit des T1 ist :

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_Z} = \frac{M_B}{\frac{I_Z}{y_{\max}}} = 7,31 \text{ [MPa]} < \sigma_{BAI} = 70 \text{ [MPa]}$$

M_B wurde aus den folgenden Diagrammen entnommen.

- die Berechnung des T1 Profils:

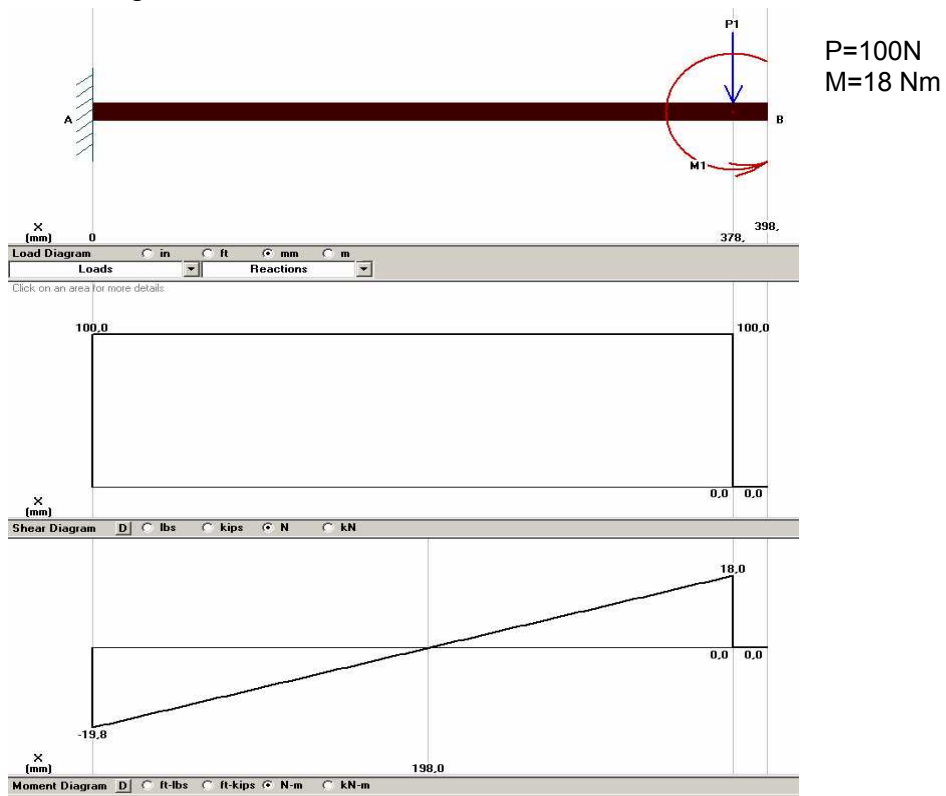


Abb.5.14 Darstellung der Scherkräfte und des Biegemoments

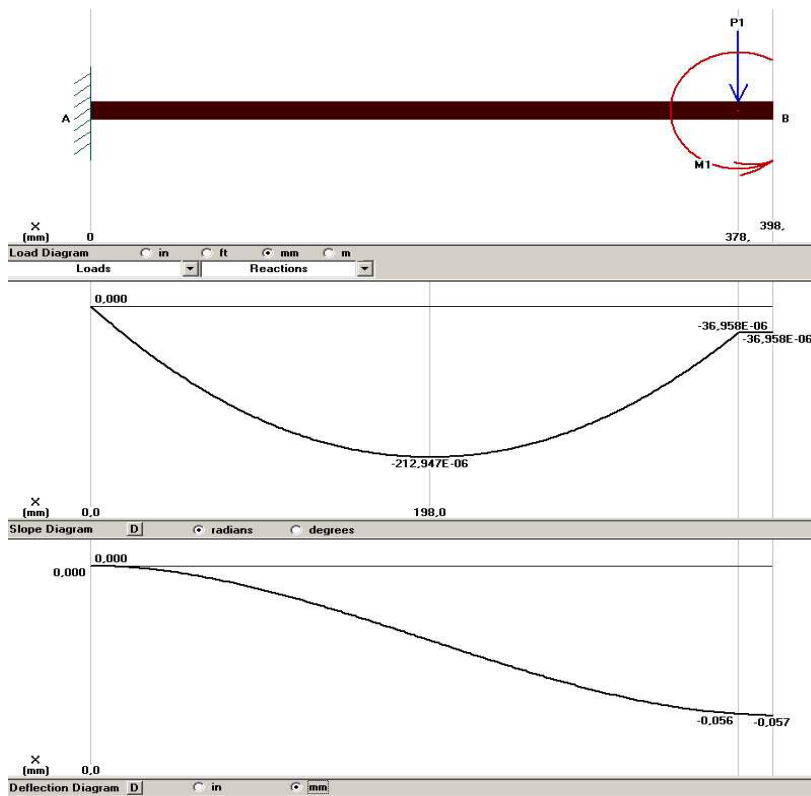


Abb.5.15 Darstellung des Steigungswinkels und der Durchbiegung

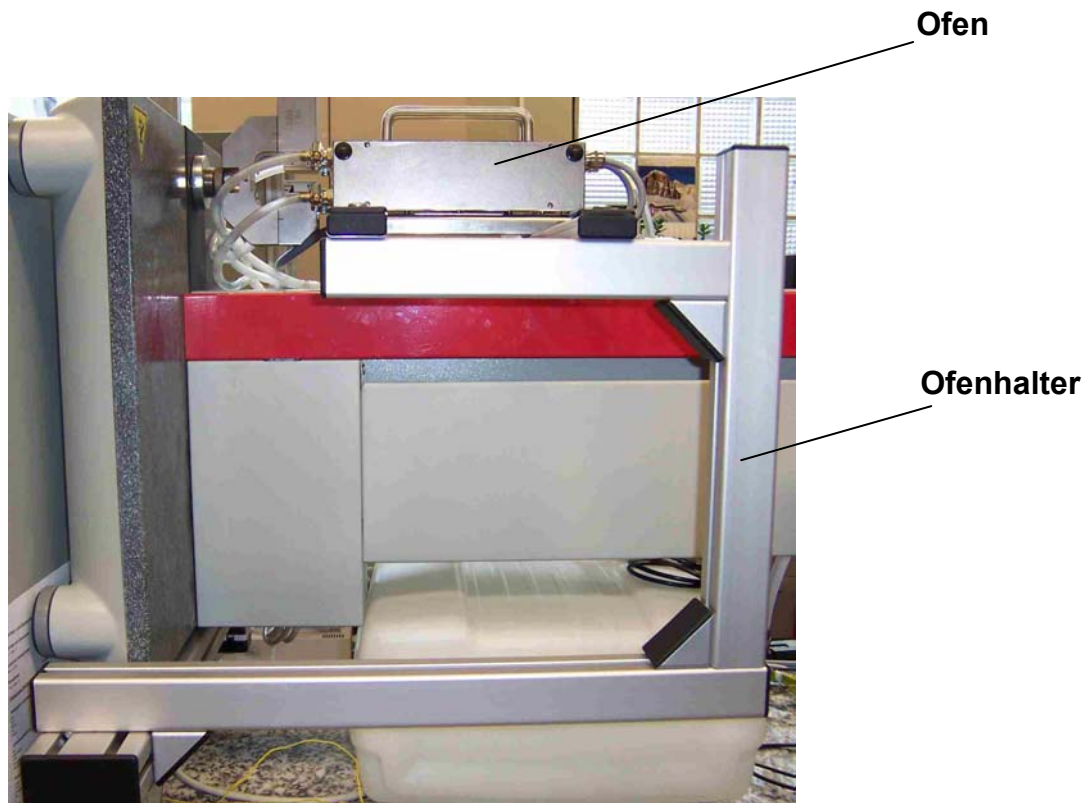


Abb.5.16 Seitliche Ansicht des Ofenhalters

Die im Prüfstand verwendeten Proben müssen präzise durch die $\varnothing 14\text{mm}$ Bohrung des Ofens geführt werden. Da die Proben fest an der Maschine eingespannt sind muss der Ofen positioniert werden. Der Ofenhalter wurde so konstruiert, dass eine sehr genaue Positionierung des Ofens (relativ zur Messprobe) möglich ist.

In der **Abb.5.17** sind die verschiedenen Positionierungen, die der Ofenhalter ermöglicht dargestellt.

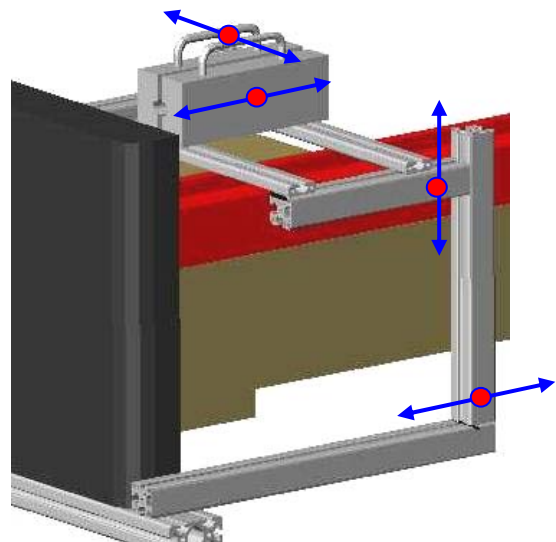


Abb.5.17 Einstellungsmöglichkeiten des Ofenhalters

5.4 KONSTRUKTION DER PROBENHALTER

Die Probenhalter haben sehr komplexe Anforderungen zu erfüllen. Das Beanspruchungskollektiv ist nachfolgend aufgelistet.

- ✓ Einspannung von Proben verschiedener Formen und Maße (Drähte und Rohre von $\varnothing 0,3$ bis 3mm);
- ✓ Axiale Belastbarkeit bis 2500N;
- ✓ Elektrische Isolierung der Proben;
- ✓ Benutzung des Zwick Probenhalters (s. **Abb.5.18**) als Befestigungsmodul an der Maschine;



Abb.5.18 Zwick Probenhalter

- ✓ Befestigungszonen der Proben sollen sich im Ofen befinden.

Es wurden mehrere Schritte benötigt um die Probenhalter zu entwickeln.

Die erste Variante der Probenhalter ist eine runde Konstruktion die in den Zwick Probenhalter eingespannt wird (s. **Abb.5.19**).

Diese Konstruktion hat einen bedeutenden Nachteil: die Befestigung der Probe am Halter wird durch Schrauben realisiert, die eine punktförmige Belastung auf die Probe aufbringen.

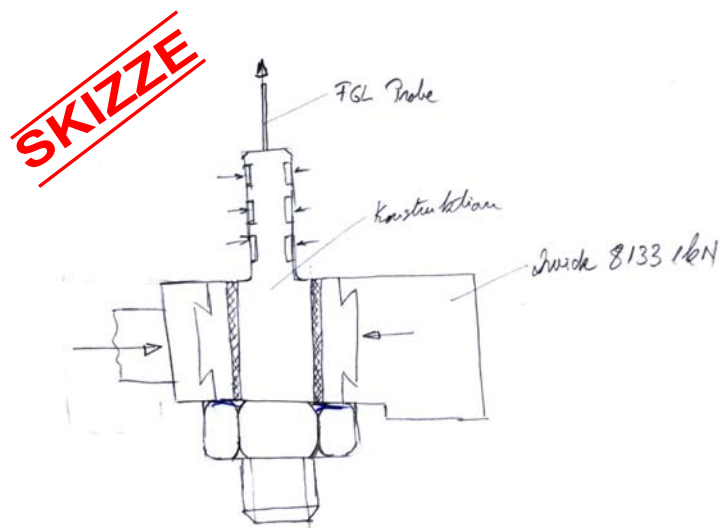


Abb.5.19 Probenhalter Var Ia

Eine Konstruktion, in der die Befestigung die Probe linear belastet ist in der **Abb.5.20** dargestellt. Es wird auch der Zwick Probenhalter benutzt aber es werden andere Spannbacken gefertigt bei denen statt der Keramiksicht eine PVD-Schicht aufgebracht wird (s.**Abb.5.20**). Der Nachteil dieser Konstruktion ist die externe Befestigung (nicht im Ofen) der Probe und die teure PVD Beschichtung.

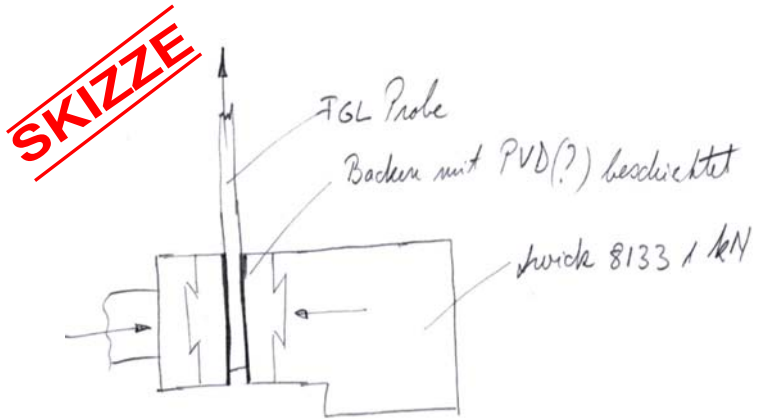


Abb.5.20 Probenhalter Var II

Eine verbesserte Konstruktion der *Variante Ia* ist in der **Abb.5.21** gezeigt. Die zwei Spannbacken der Zwick Halterung werden durch ein einziges Teil ersetzt (s. **Abb.5.22**). Ein rundes Kunststoffteil (s.**Abb.5.23**) soll die Probe von dem Rest der Maschine elektrisch isolieren.

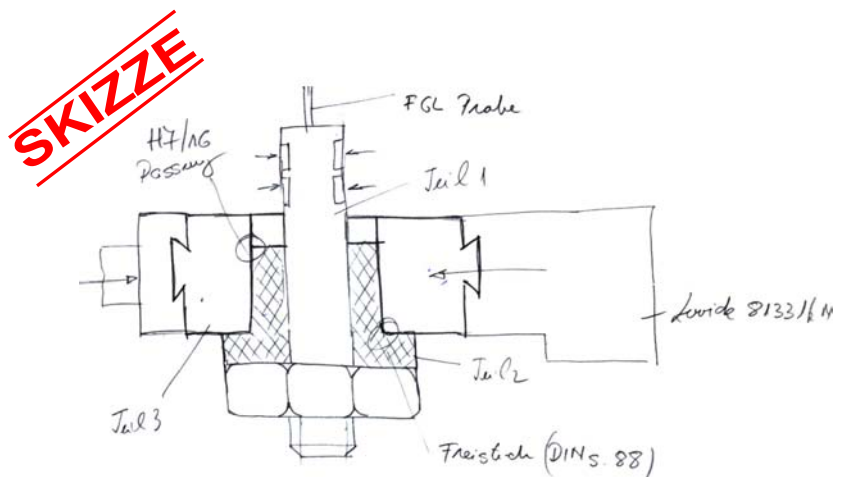


Abb.5.21 Probenhalter Var Ib

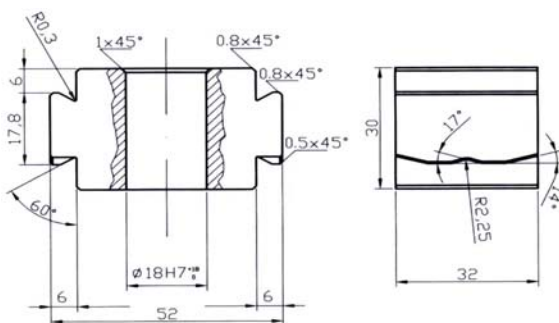


Abb.5.22 Konstruktion für den Probenhalter Ib

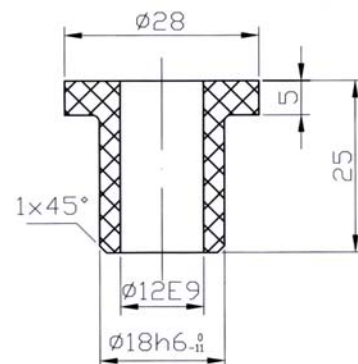


Abb.5.23 Konstruktion für den Probenhalter Ib

Dieser Probenhalter ist zwar eine verbesserte Konstruktion gegenüber der *Variante I*, der Nachteil der punktförmigen Probenbefestigung bleibt aber erhalten.

In der **Abb.5.24** wird eine weitere Entwicklung der Probenhalter gezeigt bei der die meisten Nachteile der vorherigen Konstruktionen eliminiert worden sind. Der Probenhalter besteht aus dem eigentlichen Halter (an der Maschine befestigt) und aus der Platte die auf den Halter geschraubt wird und damit die Messprobe befestigt. Ein CAD Modell dieser Teile ist in der **Abb.5.25** gezeigt.

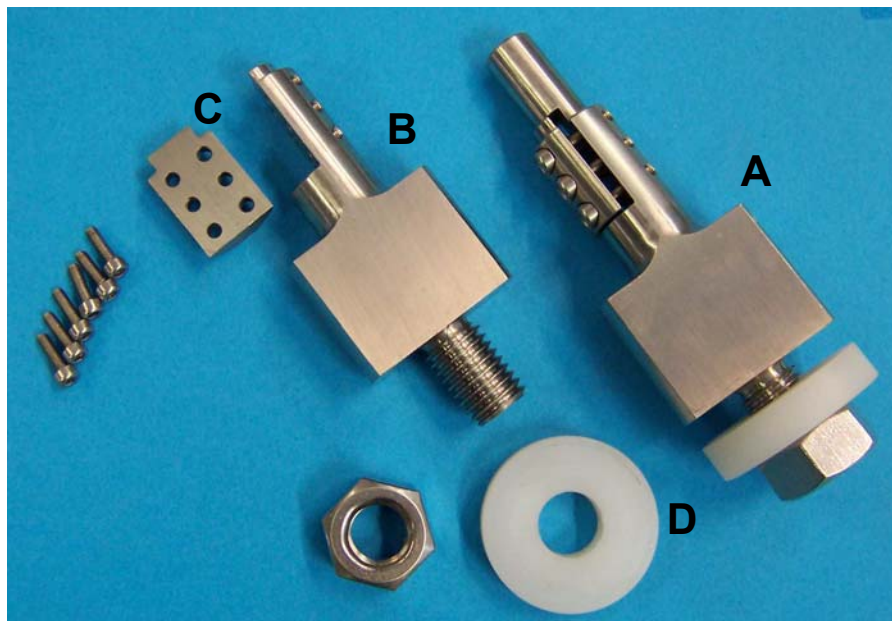


Abb.5.24 Variante III der Probenhalter

- A** - Probenhalter der auf der mobilen Traverse der Maschine montiert wird;
- B** - Probenhalter der fest am unteren Teil der Maschine befestigt wird ;
- C** - Platte, die auf den Probenhaltern geschraubt wird um die Messproben zu befestigen ;
- D** - Unterlegscheibe aus Kunststoff, die den Probenhalter von dem Rest der Prüfanlage elektrisch isoliert.

Gegenüber den vorherigen Konstruktionen hat diese Variante der Probenhalter folgende Vorteile:

- ✓ bei der Montage werden die Messproben nicht punktförmig sondern flächig belastet ;
- ✓ die Befestigungszone der Proben befindet sich im Ofen.

Andere Vorteile:

- ✓ zur Befestigung an der Maschine werden auch die Probenhalter von Zwick benutzt (s. **Abb.5.26**) ;
- ✓ die Probenhalter ermöglichen die Montage von Proben verschiedener Formen und Maße (Drähte und Rohre von $\varnothing 0,3$ bis 3mm) ;
- ✓ elektrische Isolierung der Messproben ;
- ✓ die Konstruktionen wurden aus INVAR (Ni36) gefertigt, einem Werkstoff mit geringer Wärmeausdehnung ;
- ✓ Geometrie der Teile wurde mit CAD optimiert (s. **Abb.5.25**).

Die Probenhalter werden an der Prüfmaschine mit Hilfe des Zwick8133 Halters befestigt (s. **Abb.5.26**). Der Vorteil besteht darin, dass die Prüfmaschine schon eine Aufnahme für den Zwick Halter besitzt. Die zusätzliche Konstruktion einer anderen Aufnahme entfällt und durch die Keramikbacken des Zwick Halters werden die Messproben elektrisch isoliert. Die weiße Unterlegscheibe aus Hartkunststoff übernimmt die axial wirkenden Kräfte und gibt damit dem gesamten Bauteil zusätzliche Stabilität. Die Messproben werden zwischen den Probenhalter und der Platte festgeschraubt.

Eine wichtige Funktion, die diese Konstruktion zu erfüllen hat, ist die Einspannung von Proben verschiedener Größen. Dies wurde ermöglicht indem auf die Einspannungsoberfläche der Probenhalter und der dazugehörigen Platten unterschiedliche Kaliber (siehe **Abb.5.27**) eingebracht wurden.

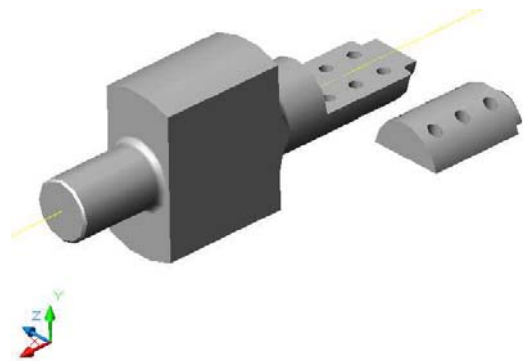


Abb.5.25 CAD Modell des Probenhalters

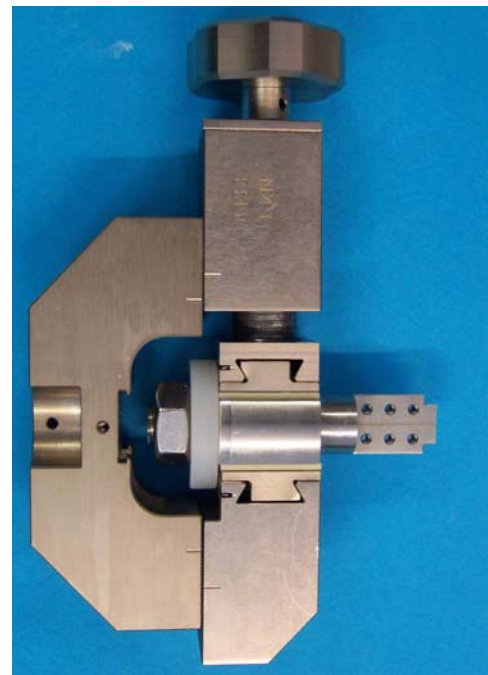


Abb.5.26 Befestigung des Probenhalters im Zwick8133 Halter

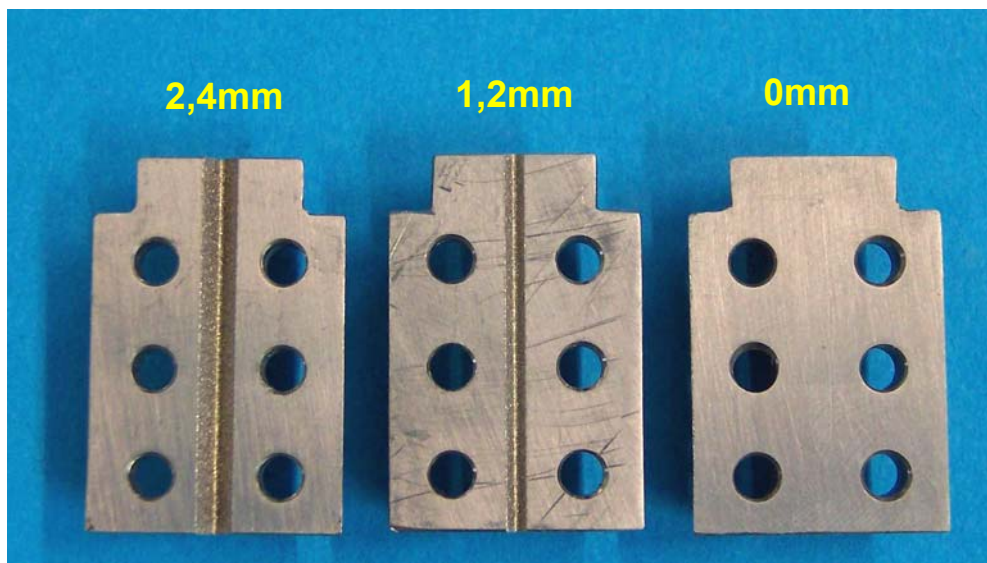


Abb.5.27 Platten für die Befestigung der Messproben am Halter

Die Probenhalter haben auf der Einspannungsoberfläche Kaliber von 0,5mm bzw. 2mm. Die Platten sind in drei Ausführungen gefertigt worden: mit Kaliber 0mm, mit Kaliber 1,2mm und mit Kaliber 2,4mm. In der **Tabelle 5.5** werden verschiedene Kombinationsmöglichkeiten zwischen Haltern und Platten empfohlen, um Proben mit der gewünschten Dimension einbauen zu können.

	Probendurchmesser in mm		
	Ø 0,3 bis 0,9	Ø 1 bis 1,9	Ø 2 bis 3
Kaliber - Halter in mm	0,5	0,5	2
Kaliber - Platte in mm	0	1,2 oder 2,4	1,2 oder 2,4

Tabelle 5.5

Die Probenhalter wurden aus Invar hergestellt, ein Werkstoff mit niedriger Wärmeausdehnung und dessen Eigenschaften in der **Tabelle 5.6** eingetragen sind. Bei den konstruierten Teilen wurden ebenfalls einige Berechnungen durchgeführt, um dessen Stabilität sicherzustellen.

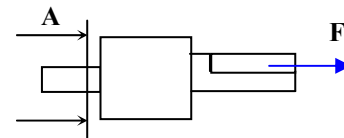
Elektrische, mechanische, physikalische und thermische Eigenschaften der Invar Legierung

Elektrisch spezifischer Widerstand (μOhmcm)	75-85
Elastizitätsmodul (GPa)	140-150
Härte – Brinell (HB)	160
Reißdehnung (%)	<45
Zugfestigkeit (MPa)	450-590
Dichte (g cm^{-3})	8,0
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20-90C ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	1,7-2,0
Wärmeleitfähigkeit bei 23C ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	13

Tabelle 5.6

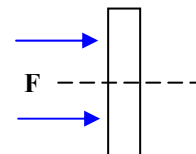
Die Zugfestigkeit des Halters wurde im Bereich des Gewindes (Schnitt A) berechnet:

$$\sigma_z = \frac{F}{A_G} = 16,565 \text{ [MPa]} < \sigma_{z\text{Invar}} = 500 \text{ [MPa]}$$



Die Druckfestigkeit der Kunststoffscheibe:

$$\sigma_D = \frac{F}{A_{\text{Sch}}} = 2,55 \text{ [MPa]} < \sigma_{z\text{PA6}} = 70 \text{ [MPa]}$$



Als Belastung F wurde die Maximalkraft der Anlage (2500N) eingesetzt.

Nach der ersten Versuchsreihe hat sich der Invar Werkstoff als zu weich erwiesen. Deshalb wurden zusätzliche Einsatzplatten aus gehärtetem Stahl (1.2343) gefertigt.

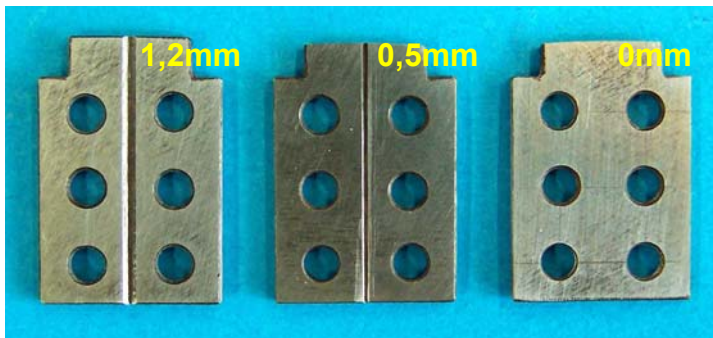


Abb.5.28 Zusätzliche Einsatzplatten für die Probenhalter

Die 1,7mm dicken Platten sind auch in 3 Ausführungen gefertigt worden, mit Kalibern auf der Einspannlänge von 0 bis 1,2mm (die Kaliber auf den Probenhaltern und Gegenplatten sind nicht mehr vorhanden da die Oberflächen gefräst wurden um die Einsatzplatten dem Probenhalter anzupassen). Für jeden Probenhalter werden jeweils 2 Einsatzplatten benötigt. Insgesamt wurden 6 Platten gefertigt (2x0mm, 2x0,5mm und 2x1,2mm).

5.7 KONSTRUKTION DER TEMPERIERANLAGE

Die Anforderungen an die Temperieranlage wurden im Kapitel 4.3 beschrieben. Es wurde eine Anlage benötigt die in der Lage ist Temperaturprofile (Rampen) im Bereich von -50 bis 200°C , zeitgesteuert zu fahren.

In Zusammenarbeit mit der Firma Peltron GmbH aus Fürth entstand eine Anlage die auf Peltier Elementen basiert und die Mehrheit der formulierten Anforderungen erfüllt.

Die Peltier Elemente sind thermoelektrische Bauelemente, die sowohl als Wärmepumpen als auch als Generatoren eingesetzt werden können [4]. Das Funktionsprinzip beruht auf dem von Franzosen J.C.A. Peltier entdeckten Prozess: der Stromfluss durch einen geschlossenen Kreis aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern bewirkt eine Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen. Mit der Entwicklung der Halbleiter hat die Peltier-Technik einen bedeutenden Aufschwung erlebt.

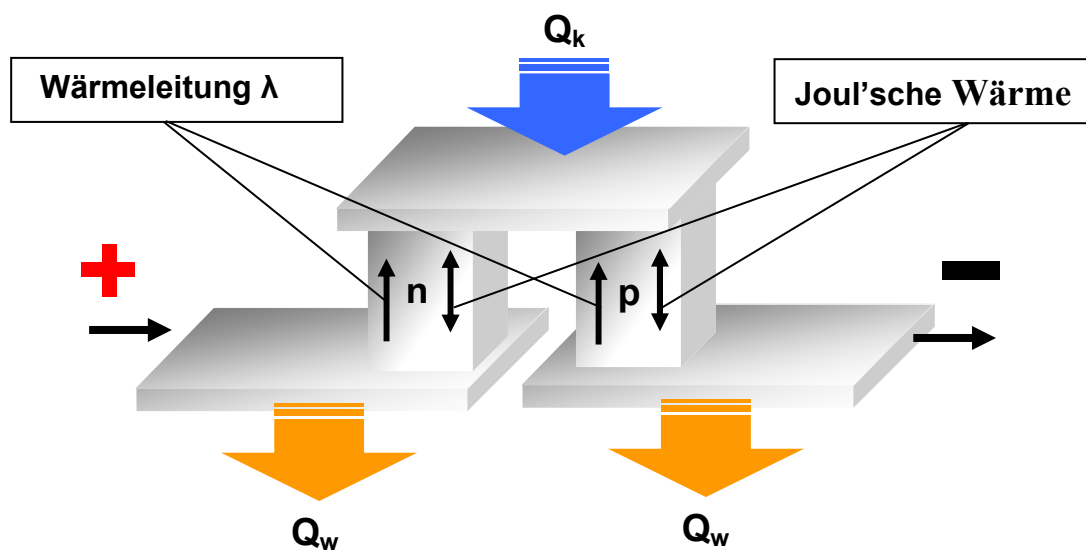


Abb.5.28 Schematische Darstellung eines Peltier Elements

Die Halbleiter – Werkstoffe die hohe Thermospannungen, einen niedrigen elektrischen Widerstand und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen – verstärken den Peltier Effekt. Erfolgreich eingesetzt werden Legierungen aus Wismut, Tellur, Antimon oder Selen. Die schematische Darstellung der Funktionsweise eines Peltier Elements wird in der **Abb.5.28** gezeigt [4]. Das Peltier Element besteht aus zwei

Halbleitern, von denen der eine p und der andere n leitend ist. Die Halbleiter werden durch eine Kupferbrücke verbunden. Wenn durch das Element Strom fließt dann kühlt sich die obere Seite ab und entzieht der Umgebung Wärme. Die aufgenommene thermische Energie wird an die warme (untere) Seite und an die Umgebung weiter abgegeben. Des Element kann man also mit einer Pumpe vergleichen die Wärme von der kalten zur warmen Seite leitet. Werden mehrere Elemente miteinander verbunden so wird die Leistung gesteigert. Die Umpolung des Stromes ändert die Richtung des Wärmeflusses und die Kaltseite wird zum Heizelement konvertiert.

In der **Abb.5.28** sind drei verschiedene Wärmeströme zu erkennen:

- **Q_k / Q_w** ist ein Wärmestrom der vom Peltier Effekt erzeugt wird und sich von der kalten zur warmen Seite richtet ;
- die **Joul'sche Wärme** ist ein Wärmestrom der durch die Verlustleistung in den beiden stromdurchflossenen Halbleitern entsteht ;
- die **Wärmeleitung λ** ist ein Wärmestrom der von der Warmseite an die Kaltseite fließt und von der Wärmebrücke, die sich in dem Halbleiter bildet, erzeugt wird.

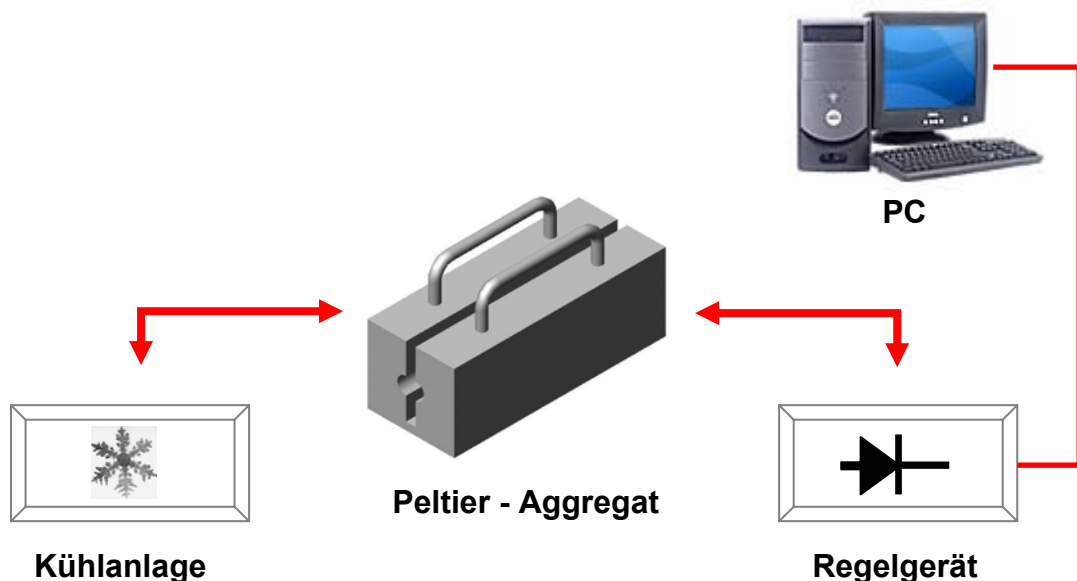


Abb.5.29 Schematische Darstellung der gesamten Temperieranlage

In der **Abb.5.29** wird eine schematische Darstellung der gesamten Temperieranlage gezeigt. Im Mittelpunkt der Einrichtung steht das Peltier Aggregat. Um einen einfachen, raschen und sicheren Ein- und Ausbau der Proben zu ermöglichen wurde es als eine klappbare Zweischalenkonstruktion konzipiert (s.**Abb.2.30**) die mittels Ofenhalter am Belastungsaggregat befestigt wird (s.**Abb.5.12**).

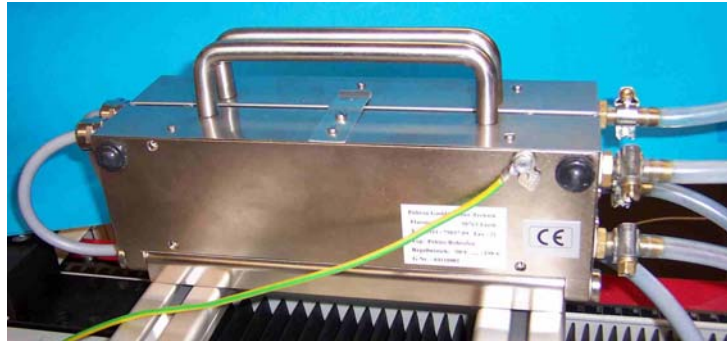


Abb.5.30 Peltier Aggregat (zugeklappt)



Abb.5.31 Peltier Aggregat (einseitig aufgeklappt)

Die Peltier Elemente wurden in eine Kunststoffmasse eingebettet und geklebt. Die Kaltseite (halbrohrförmige Kupferplatten) ist nach Außen gerichtet und kühlt bzw. erwärmt den Probenraum. Die Warmseite befindet sich im Inneren des Ofens. Die Wärme die in dieser Seite induziert wird muss entzogen werden. Deshalb wurde eine zusätzliche Kühlanlage gebaut, die die Wärme von der Warmseite abführt (s.**Abb.5.32**). Die Kühleinrichtung besteht aus einem Wassertank (Kapazität 15l), einer Wasserpumpe (ca. 4l/min) und den dazugehörigen Schläuchen.

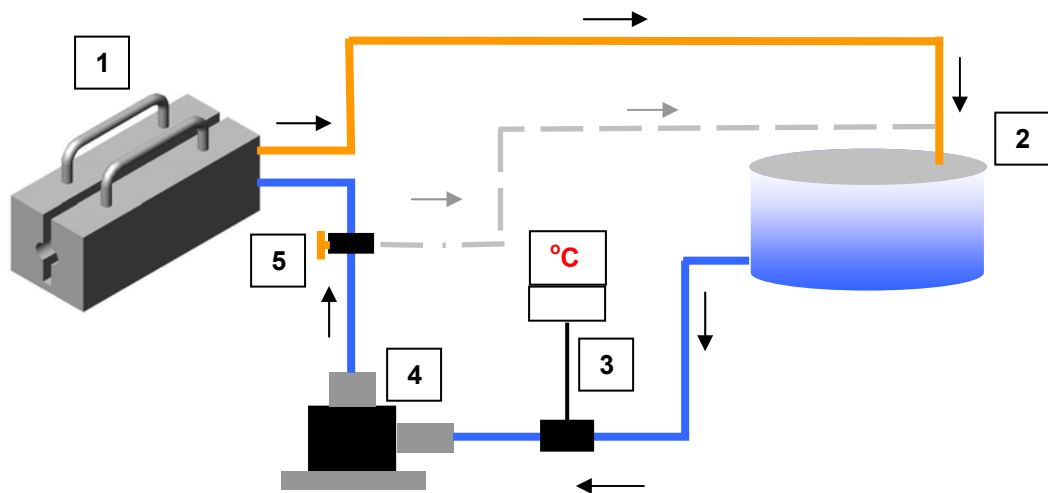


Abb.5.32 Schematische Darstellung der Kühlanlage

1. Peltier Aggregat
2. Wassertank
3. Temperatursensor mit Warnsignal
4. Wasserpumpe
5. 3-Wegehahn

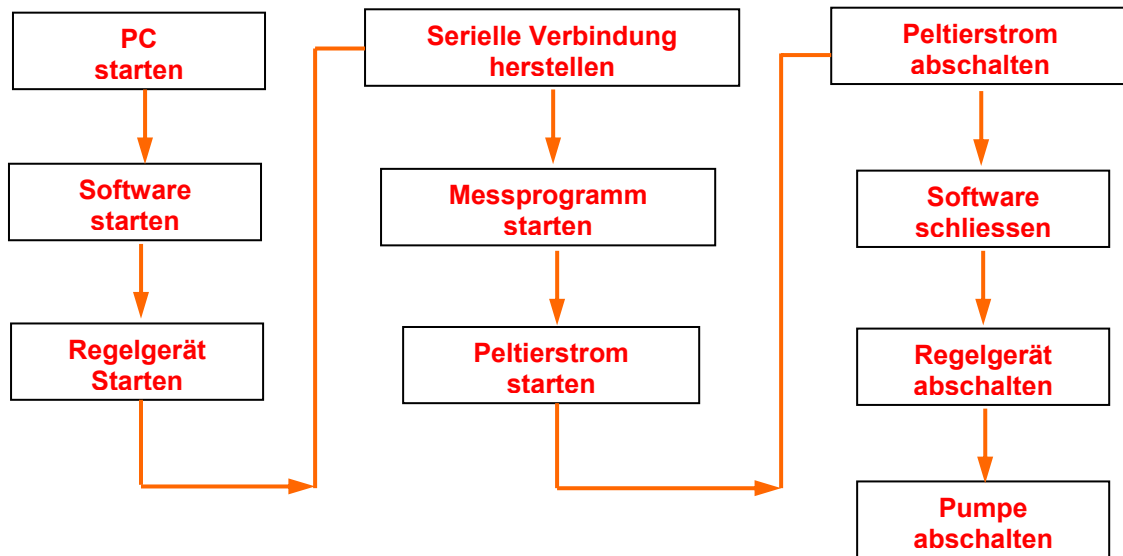
Die Pumpe ist nur bedingt wärmebeständig (bis. 45°C), deshalb wurde vor der Pumpe ein Temperatursensor montiert um die Wassertemperatur zu überwachen. Wenn die Wassertemperatur 45°C überschreitet dann gibt der Sensor ein Warnsignal und der Benutzer hat die Option die Pumpe einfach auszuschalten bis die Wassertemperatur sinkt oder den Hahn auf den Bypass-Kreislauf umzuschalten.



Abb.5.33 Das Peltron PRG RS H400 Regelgerät

In der **Abb.5.33** ist das Peltron PRG RS H400 Regelgerät abgebildet. Seine Funktion ist die Kontrolle des Peltierstroms und die Überwachung der Ist- und Solltemperatur. Das Gerät kann manuell oder mit dem PC betrieben werden.

Das Regelgerät wurde mittels einer RS-Schnittstelle am PC angeschlossen und wird mit der von Peltron entwickelten Software betrieben. Die Bedienung der Geräte wird in dieser Reihenfolge durchgeführt:



Nach dem Anschalten des Gerätes und der Verbindung mit der seriellen Schnittstelle des PCs wird auf dem Monitor die Isttemperatur (Zimmertemperatur) gezeigt. Das Programm hat zwei wichtige Benutzeroberflächen.

Die erste Programmoberfläche ist sehr einfach zu bedienen

und bietet dem Benutzer die Möglichkeit eine Solltemperatur einzustellen. Nach dem Einschalten des Peltier-Stroms (abhängig von der Dämpfungsstufe und der Zeitsteuerung) erreicht das Peltier-Aggregat nach einer gewissen Zeit die Solltemperatur. Die zweite Programmoberfläche ist umfangreicher und erlaubt dem Benutzer, ein eigenes Temperaturprofil (Rampe) zu erstellen (s.**Abb.5.34**).

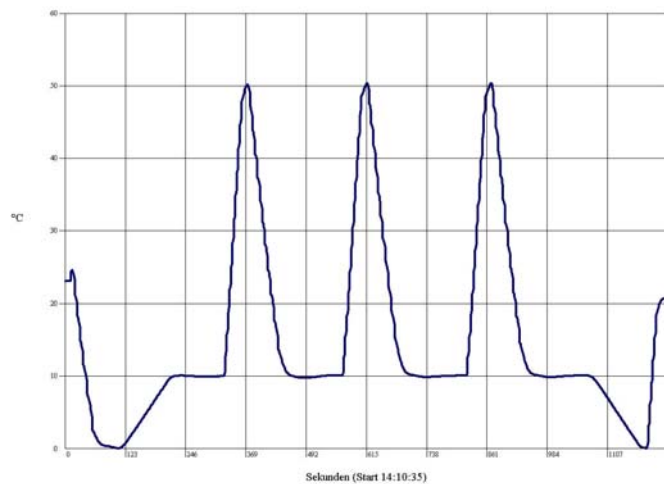


Abb. 5.34

6. DIE FG-TESTEINRICHTUNG

6.1 GRUNDEINSTELLUNGEN AN DER ZWICK PRÜFMASCHINE

Die Zwick-Prüfmaschine (s.**Abb.5.1**) wird von dem TestXPert Programm gesteuert. Der erste Schritt ist die Installation des Programms auf der Festplatte des Prüfstandrechners. Die Installation der Vollversion kann nur mit den zwei Lizenz-Disketten von Zwick durchgeführt werden.

Nach dem Starten der Software ist es erforderlich Benutzername und Passwort einzugeben. TestXpert kennt drei Benutzerebenen mit unterschiedlichem Funktionsumfang:

- Konfigurationsebene ;
- Testebene mit Menüzugriff ;
- Testebene ohne Menüzugriff.

Die Konfigurationsebene wird vom Systemadministrator eingerichtet. Es ermöglicht den vollen Funktionsumfang des Programms zu nutzen (z.B. Prüfvorschriften und Maschine konfigurieren, Oberfläche gestalten oder Rechte am Benutzer vergeben). In der Testebene mit Menüzugriff bereitet der Prüfer die Prüfung vor und führt sie aus. Er kann auf einige Menüs und auf die Werkzeugleiste zugreifen. Möglich sind dabei z.B.: Prüfvorschriften laden, Prüfung parametrisieren, Prüfmaschine konfigurieren, Prüfung starten, stoppen, auswerten oder Protokolle drucken. In der Testebene ohne Menüzugriff führt der Benutzer ohne Menüzugriff die vorbereitete Prüfung aus. Möglich ist eine Prüfvorschrift laden oder die Prüfung starten oder stoppen.

Der nächste Schritt nach der Eingabe von Benutzername und Passwort ist die Haupteinstellung der Prüfmaschine. Um das Menü zu aktivieren ist es erforderlich zuerst eine Prüfvorschrift zu laden.

Öffnen → Prüfvorschrift laden (z.B. fmaxzug.zpv)

Prüfvorschriften sind in TestXpert die .zpv Dateien; fmaxzug ist eine Standard Prüfvorschrift die von TestXpert automatisch bei der Installation auf der Festplatte gespeichert wird. Im Menü Maschine befindet sich der Befehl Einrichten:

Maschine → Einrichten

TestXpert bietet hier die Möglichkeit die verschieden Elemente der Maschine zu konfigurieren (z.B Wegaufnehmer oder Kraftmessdose).

Maschine → Einrichten → Wegaufnehmer

Im Dialog Wegaufnehmer wurden folgende Daten eingegeben:

Prüfraum: Unten

Oberer Softendschalter (Maschine wird gestoppt wenn die Traverse den Wert erreicht):

Unterer Softendschalter (Maschine wird gestoppt wenn die Traverse den Wert erreicht):

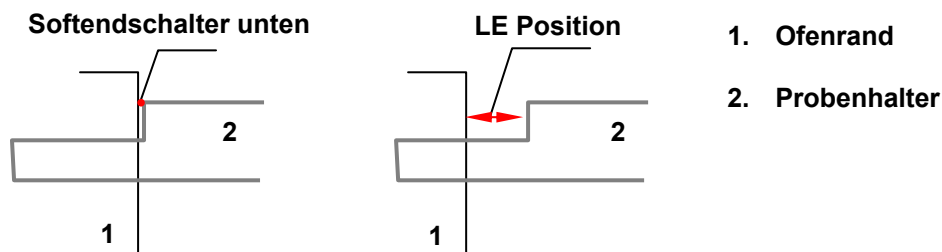


Abb.6.1 Softendschalter und LE Position

Die korrekte Eingabe dieses Parameters ist sehr wichtig. Der untere Softendschalter wurde so eingestellt, daß der an der Traverse befestigter Probenhalter den Ofenrand leicht berührt (s. **Abb.6.1**).

Wenn die Traverse die Softendposition erreicht dann wird die Maschine automatisch abgeschaltet. Das verhindert eine Beschädigung des Ofens. Im Falle eines Programmfehlers übernimmt ein mechanischer, Schalter der an der Traverse montiert ist, die Funktion des Softendschalters.

Aktuelle LE Position : absolute Position der Traverse. Um den Wert einzugeben wird die Traverse in die gewünschte Position gefahren (der Wert wird auf der Traversenskala abgelesen); danach wird der „A“ Knopf (neben dem Fenster Aktuelle LE) gedrückt um den Wert der Traversenposition aufzunehmen. In der Prüfvorschrift kommt ein ähnlicher LE-Parameter vor. Der LE-Prüfvorschriftsparameter ist die Positionierung des Probenhalters vor dem Prüfungsstart. Dieser Parameter wird so gewählt, dass der Ofenrand sich in der Mitte der Probenhalterspitze befindet (s.**Abb.6.1**).

Folgende Parameter wurden für die FG-Versuche festgelegt:

- Softendschalter-unten: 487,987 ;
- Softendschalter-oben: 799,998 ;
- Aktuelle LE-Position: abhängig von der Position der Traverse.

Die Einstellungen bilden den Prüfplatz und wurden als „FGL-Ofen“ gespeichert.

Maschine → Einrichten → Traverse → Prüfplatz → Speichern

Vor jeder Prüfung muss der Prüfplatz neu geladen werden.

Die Funktion des LE-Referenz Parameters wurde vom Softendschalter-unten übernommen.

6.2 ERSTELLUNG VERSCHIEDENER SOFTWARE-BAUSTEINE

TestXpert ist eine frei programmierbare Software. Nach der Installation erscheint eine einfache Menüleiste die dem Benutzer den Zugriff auf minimale Software-Befehle ermöglicht (z.B. Prüfvorschrift laden). Um die erweiterte Menüleiste zu öffnen muss der User eine Prüfvorschrift laden. Die TestXpert CD enthält mehrere einfache Prüfvorschriften die beim Programmstart geladen werden können. Der Benutzer hat die Möglichkeit die vorhandenen Prüfvorschriften um zu programmieren und seine eigene zu erstellen.

Durch den Begriff „Bausteine“ sind verschiedene, mit TestXpert programmierbare Parameter, Parameterdialoge, Schaltflächen etc. zu verstehen. Die erstellten Bausteine können später in einer Prüfvorschrift eingefügt werden.

Beschriftung der Serie / Unterserie / Probe

TestXpert teilt die Versuche in drei Ebenen auf: Serie, Unterserie und Probe. Ursprünglich werden diese nur aufgelistet und einfach nummeriert (z.B. Probe1, Probe2, etc.). Um die Übersicht der Prüfungsergebnisse zu verbessern wurde eine Programm-Routine erstellt mit deren Hilfe komplexe Namen der Serie, Unterserie und Probe zugewiesen werden können.

1. Erstellung des Parameters Beschriftung Serie:

Konfiguration → *Parameter* → *Neu* → *Textparameter*

Name: Beschriftung Serie;

Parameter wird der Serie zugeordnet.

2. Erstellung des Parameters Beschriftung Unterserie:

Identisch mit 1. Parameter wird der Unterserie zugeordnet.

3. Erstellung des Parameters Beschriftung Probe:

Identisch mit 1 und 2. Parameter wird der Probe zugeordnet.

4. Die erstellten Parameter werden im Menü Probenverwaltung aktiviert:

Probenverwaltung → *Serieneigenschaften* → *Probenliste*

5. Erstellung eines Parameterdialoges:

Konfiguration → *Dialoge* → *Neu*

Der neue Dialog wurde als „Beschriftung Dialog“ benannt. Die drei erstellten Parameter wurden im Dialog eingefügt.

6. Erstellung einer Verknüpfung in der Menüleiste:

rechter Mausklick auf der Menüleiste → *Werkzeuggeste editieren*

Neu → Symbol für Verknüpfung wählen

Typ → Dialog öffnen

Dialog → Beschriftung Dialog

 **Erstellung des Ereignis Dialogs „Ofen-Starten“**

Bei Erreichen der Vorkraft startet der Ereignis Dialog „Ofen-Starten“ ein Fenster mit der Meldung „Vorkraft erreicht. Bitte Peltier Ofen starten“.

1. Textparameter „Peltier Ofen Starten“ erstellen:

Konfiguration → *Parameter* → *Neu*

Allgemein → *Typ* → Text

Text → Schaltfläche (mit Name als Beschriftung)

Skripten → Aktionsskript:

```
InfoBox („ Peltier Ofen bitte starten ! “)  
end
```

2. Dialog „Peltier Ofen starten“ erstellen:

Konfiguration → *Dialoge* → *Neu*

Der neue Dialog wurde als „Beschriftung Dialog“ benannt. Der Textparameter wurde im Dialog „Peltier Ofen Start“ eingefügt.

3. Ereignis Dialog im Prüfablauf einprogrammieren:

Konfiguration → Systemskripten → Bei Ablaufereignis

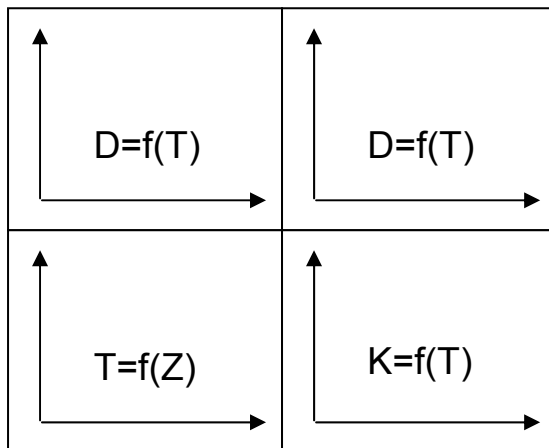
```

If Arg (1) = 40606
    Call ParamDialog (30027)
Endif
    
```

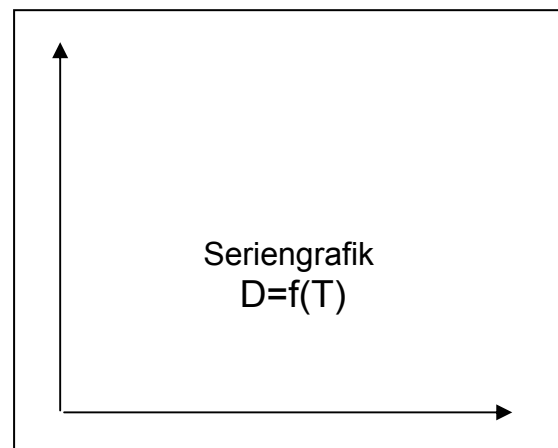
Erstellung des Bildschirm-Layouts

TestXpert bietet dem Benutzer die Möglichkeit das Bildschirm-Layout selber zu konfigurieren. Es wurden zwei verschiedene Layouts erstellt die separat selektiert werden können:

Bildschirmlayout 1 (B1)



Bildschirmlayout 2 (B2)



D – Verkürzung [% oder mm]

T – Temperatur [°C]

K – Kraft [N]

Z – Zeit [s]

Bei der Erstellung des B1 und B2 wurden zuerst die Bildschirmpartitionen gestaltet (vier für B1 und eine für B2) und mit B1 bzw. B2 benannt:

Konfiguration → Bildschirmlayouts → Neu

B1 oder B2 können dann der Anzeige zugewiesen werden:

Konfiguration → Bildschirmlayouts → Zuweisen

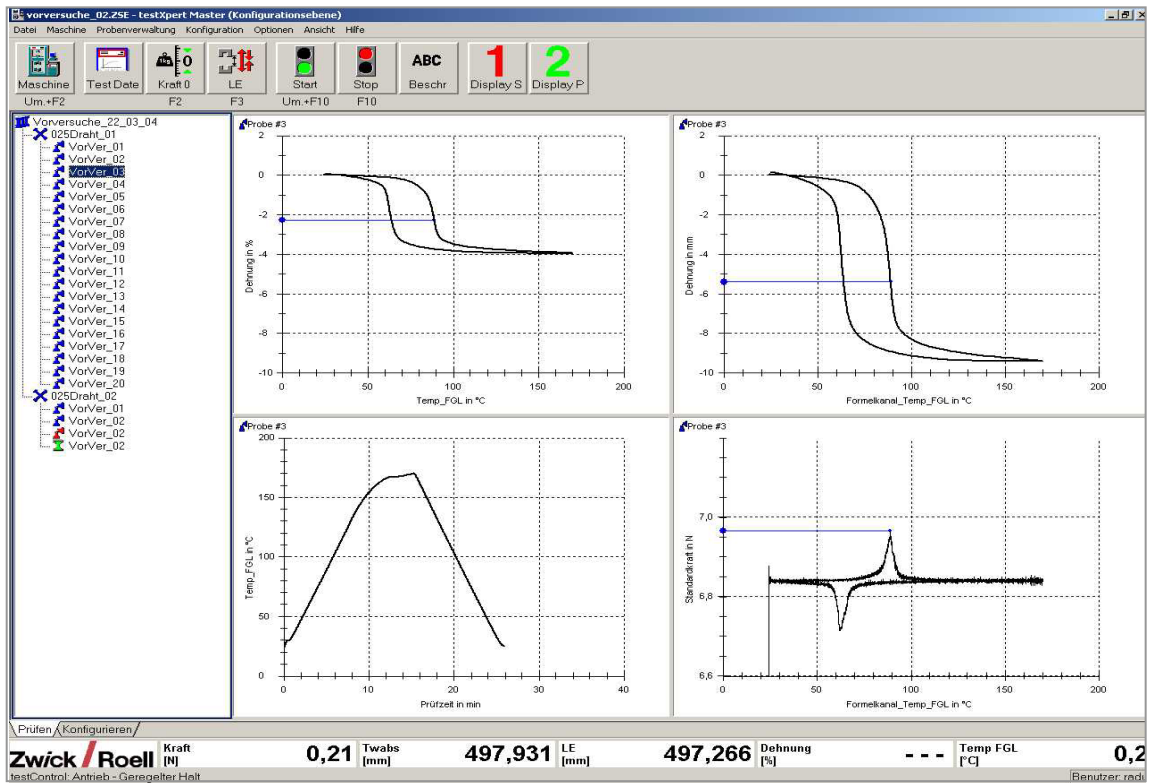


Abb.6.2 Bildschirmlayout B1 des Messprogramms

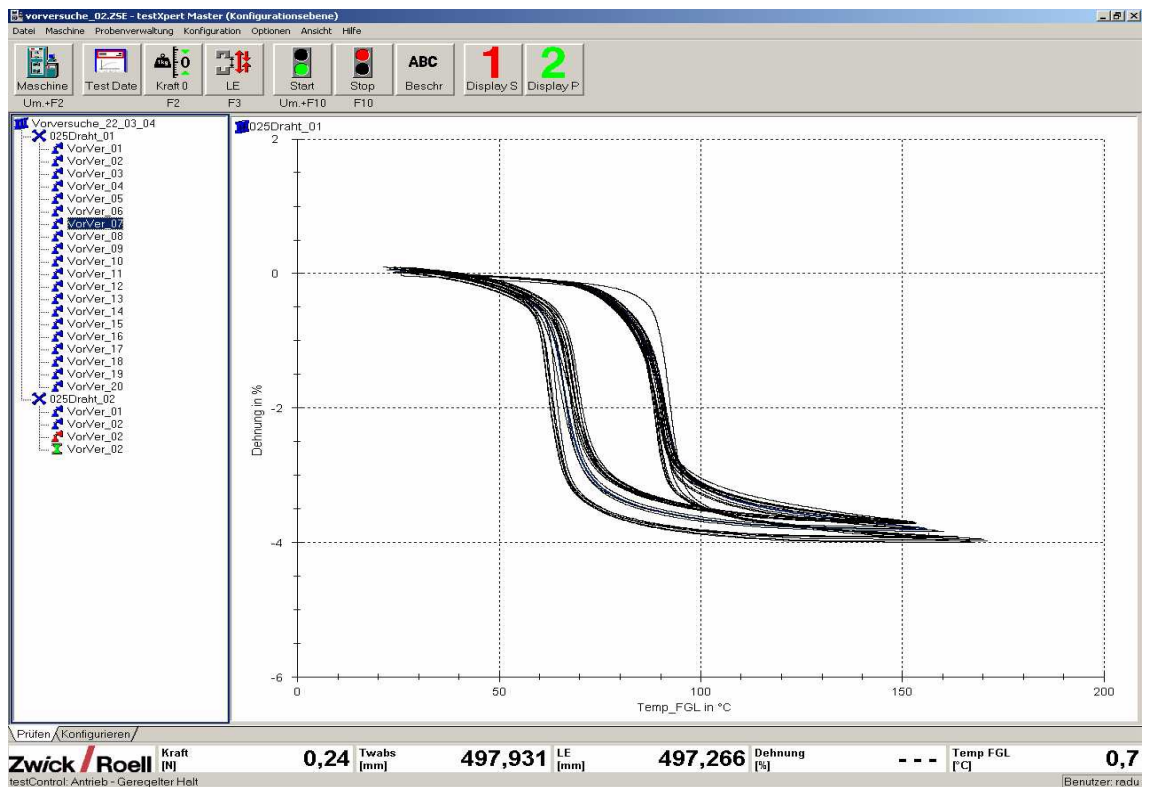


Abb.6.3 Bildschirmlayout B2 des Messprogramms

Konfigurieren der Partitionen:

rechter Mausklick auf der Partition → *Feldinhalt wählen*

Seriengrafiken (bzw. Probengrafiken) → *Neu*

Um B1 oder B2 aufrufen zu können wurde eine Bildschirmverknüpfung erstellt:

rechter Mausklick auf der Werkzeugleiste → *Werkzeugleiste editieren*

Neu → Symbol für Verknüpfung wählen

Typ → Internes ZIMT-Skript

Skript → Switch to Layout

Erstellung des Benutzerassistenten

Der Benutzerassistent ist ein zusammengesetztes Interface mit dessen Hilfe der Benutzer die wichtigsten Versuchsparameter einstellen kann. Der erstellte Benutzerassistent hat folgende Struktur:

- Einrichten
- Probendaten_FGL
- LE-Position
- Allgemeine Einstellungen
- Stufendefinition
- Versuchs-/Ergebnisdefinition

- Messwertspeicher_FGL

- Aktionen nach Prüfung

Beschreibung der Parameterdialoge:

Einrichten (in TestXpert vorprogrammiert)

- enthält die wichtigsten Einstellungsparameter der Maschine:
Prüfplatzname / Prüffart / Prüfraum / Softend oben / Softend unten / Aktuelle LE /
Obere Kraftgrenze / Untere Kraftgrenze.

Probendaten_FGL

- Parameterdialog der programmiert wurde und folgende Parameter enthält:
Probenform für Querschnittsberechnung / Durchmesser / Parallele Probenlänge.

LE-Position (in TestXpert vorprogrammiert)

- enthält folgende Parameter:
Einspannlänge / LE übernehmen / LE-Geschwindigkeit / Einspannlänge nach
Vorlaufweg.

Allgemeine Einstellungen (in TestXpert vorprogrammiert)

- enthält folgende Parameter: Geschwindigkeit für alle Stufen / Gleiche Haltezeit für
alle Stufen / Gleiche Halteart für alle Stufen / Positionierung für alle Stufen.

Vorkraft_FGL

- wurde auch programmiert und enthält die Parameter: Vorkraft; Vorkraft Geschwindigkeit; Vorkraft Haltezeitmodus; Halteart bei Vorkraft.

Stufendefinition (in TestXpert vorprogrammiert)

- enthält folgende Parameter: Aktuelle Stufe / Zielposition / Haltezeit.

Versuchs-/Ergebnisdefinition (in TestXpert vorprogrammiert)

- Parameter: Ablaufdefinition.

Messwertspeicher_FGL

- wurde auch separat erstellt, enthält: TRS Kraftintervall / TRS Zeitintervall.

Aktionen nach Prüfung (in TestXpert vorprogrammiert)

- Parameter: Probe entlasten / Max. zulässige Kraft am Prüfungsende / Geschwindigkeit entlasten / LE einstellen nach Prüfung.

Um den Benutzerassistenten aufrufen zu können wurde eine Bildschirmverknüpfung erstellt:

rechter Mausklick auf der Werkzeugleiste → *Werkzeugleiste editieren*

Neu → Symbol für Verknüpfung wählen

Typ → Dialog öffnen

Aktion → Benutzerassistent

Erstellung des Messkanals für den externen Temperatursensor

Um den Temperaturwert im Ofeninnenraum erfassen zu können wurde ein zusätzlicher Temperatursensor eingebaut.

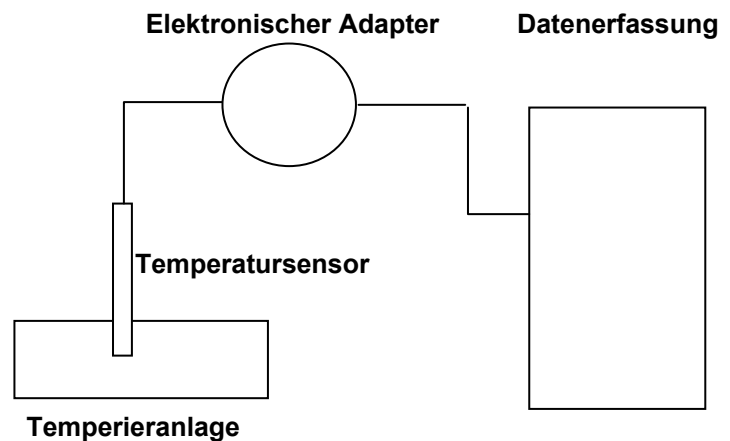
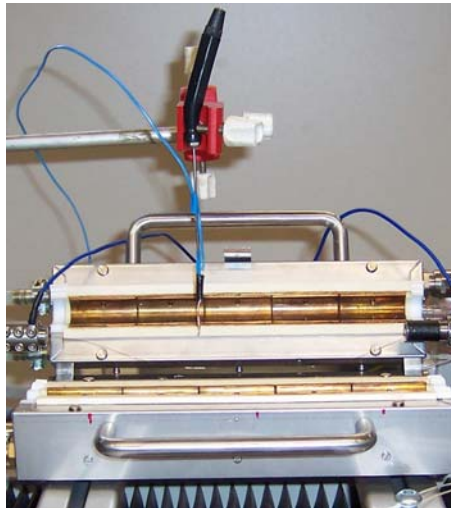


Abb.6.4 Externer Temperatursensor

Dieser ist am Datenerfassungssystem angeschlossen und liefert den Temperaturablauf im Temperierraum, in der Nähe der FGL Probe. Um den Sensorwert (in mV) zu erfassen wurde ein Messkanal *Temp_FGL_abs* (44035) erstellt:

Konfiguration → *Kanäle* → *Neu*

Der Wert des Temperaturkanals wird durch den Eingabeparameter *Temp_Kalib* (32771) kalibriert:

Konfiguration → *Parameter* → *Neu*

Der neue Temperaturwert wird mit Hilfe des Formelkanals *Temp_FGL* in den Diagrammen oder Datentabellen dargestellt:

Konfiguration → *Kanäle* → *Neu*

Formel: `Return (ChannelValueAt (44035,line) / P[32771])`

6.3 DIE DURCHFÜHRUNG EINER FG- PRÜFUNG (TESTING)

Das Ziel für den ersten Versuch an der umgebauten Prüfmaschine ist die genaue Ermittlung der Phasenumwandlungstemperatur einer Legierung aus Formgedächtnismaterial. Die für den Versuch gewählte Nickel-Titan Legierung hat die Bezeichnung DY90 und eine Dehnungsfähigkeit (Memory-Effekt) von ca. 4%. Die Probe ist drahtförmig mit einem Durchmesser von 0,245mm und einer Länge von 290mm. Nach der Einspannung in den vorgesehenen Probenhaltern wird die Messprobe nur leicht vorgespannt (max. 0,1N) um die „aktive“ (freie) Länge der Probe zu messen. Im TestXpert Programm wird dann die Prüfvorschrift für die Testing Untersuchungen geladen und dann die Versuchsparameter im Benutzerassistent eingetragen.

Als nächstes wird die Temperieranlage eingerichtet. Die Probe soll von Zimmertemperatur bis 160°C in 500sec erwärmt und dann wieder bis zur Zimmertemperatur in 500sec abgekühlt werden. Diese Parameter werden im Programm der Anlage eingegeben.

Die Prüfung kann dann vom TestXpert Programm gestartet werden. Die Zugmaschine belastet die Probe mit 135N/mm² (ca. 8N). Nachdem diese Vorkraft erreicht wird kann die Temperieranlage (von der eigenen Software) gestartet werden. Die Probe wird im belasteten Zustand erwärmt und dann abgekühlt. Beim Erreichen der Endtemperatur wird die Prüfung beendet. Die Resultate sind in der **Abb.6.2** und **Abb.6.3** dargestellt.

7. DIE FG-TRAININGSEINRICHTUNG

7.1 KONSTRUKTION DER TRAININGSEINRICHTUNG

Die Anforderungen an die Trainingseinrichtung wurden im Kapitel 4.4 beschrieben. Der Zweck der zyklischen Bestromung ist die Stabilisierung des Formgedächtniseffekts. Die für das Training benötigte Amperezahl wird mittels eines Netzteils geliefert. Die Unterbrechung des Stromkreislaufes an der FG-Probe erfolgt durch ein SPS (Speicher-Programmierbare-Steuerung) gesteuertes Lastrelais (s.Abb.7.1).

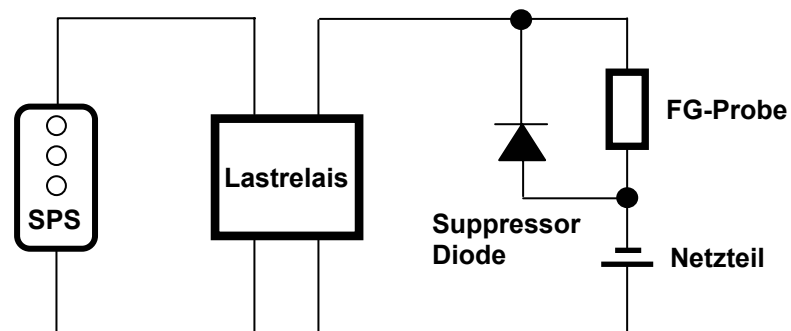


Abb.7.1 Schaltplan der Trainingseinrichtung

Das verwendete SPS Modul stammt von der Firma Jetter und hat die Bezeichnung Nano-A. Es stehen 8 digitale Eingänge, 14 digitale Ausgänge sowie 2 analoge Ausgänge zur Verfügung. Für die Trainingseinrichtung wurden die zwei analogen Ausgänge verwendet, die eine maximale Leistung von 10V bei 10mA haben und die am Lastrelais angeschlossen worden sind. Das Lastrelais ist ein Crydom Fabrikat (Modell D2D12) das eine Eingangsspannung von 5V bei 1,6mA benötigt und eine elektrische Spannung von bis zu 12V (max. 27A) steuern kann. Die für das Lastrelais erforderliche Spannung wird von den digitalen Ausgängen der SPS generiert. Damit wird das Relais eingeschaltet (Stromkreislauf offen) bzw. ausgeschaltet (Stromkreislauf zu). Um das Relais von Restspannungen (nach dem Abschalten) zu schützen wurde eine zusätzliche Supressor-Diode angeschlossen.

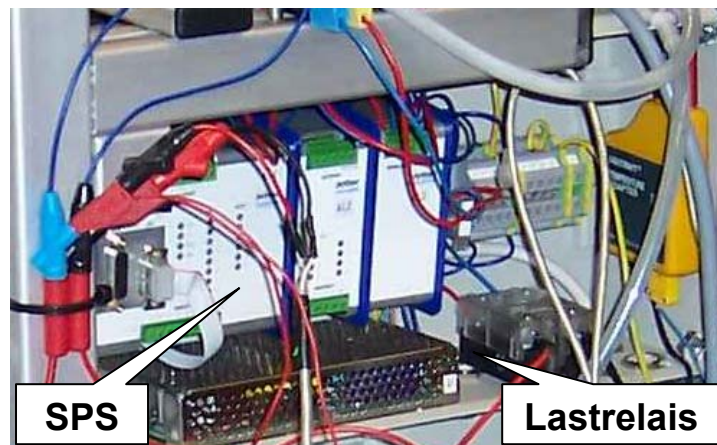


Abb.7.2 SPS und Lastrelais

Die Dauer und die Anzahl der Schaltvorgänge können vom Benutzer bestimmt werden. Dafür wurde ein Kommunikationsprogramm zwischen SPS und PC erstellt.

Festlegung des SPS Registernummer

Dem Grundgerät ist die Modulnummer 1 zugeordnet. Von diesem aus werden die Modulnummern von links nach rechts gezählt.

Für die Adressierung der Register gilt:

$$\text{Registernummer} = 3000 + (\text{Modulnummer} - 2) * 10 + \text{lokale Registernummer}$$

Für den ersten Kanal des Analog-Moduls gilt:

$$\text{Registernummer} = 3000 + (3 - 2) * 10 + 0 = \underline{3010}$$

Ausgabe einer analogen Spannung mit Hilfe der SPS

Mit dem ZIMT-Befehl `Jset aIO(a,b,c)` kann eine analoge Spannung auf einen analogen Ausgang der SPS ausgegeben werden. Dabei wird an dem analogen Ausgang `a` der Spannungswert `b` ausgegeben (für `b=2047` wird eine Spannung von 10V ausgegeben). Der Parameter `c` gibt an ob die Feinauflösung bei der stattfindenden D/A-Umwandlung verwendet werden soll.

Erstellung der Kommunikationssoftware zwischen SPS und PC

Die SPS soll ein analoges Signal ausgeben dessen Amplitude und Frequenz vom Benutzer bestimmt werden soll.

Es wurden folgende Parameter definiert (s. **Abb.7.3**):

- SPS Spannungswert: P[32778] [SPS_Spannung_korr];
- SPS Spannungswert in V: P[32774] [SPS_Spannung_FGL];
- Zeitintervall zwischen 2 Zyklen: P[32775] [Training_Bestromungspause]
- Dauer der Bestromung: P[32776] [Training_Bestromungsdauer]
- Anzahl der Zyklen: P[32777] [Training_Zyklennummer_FGL].

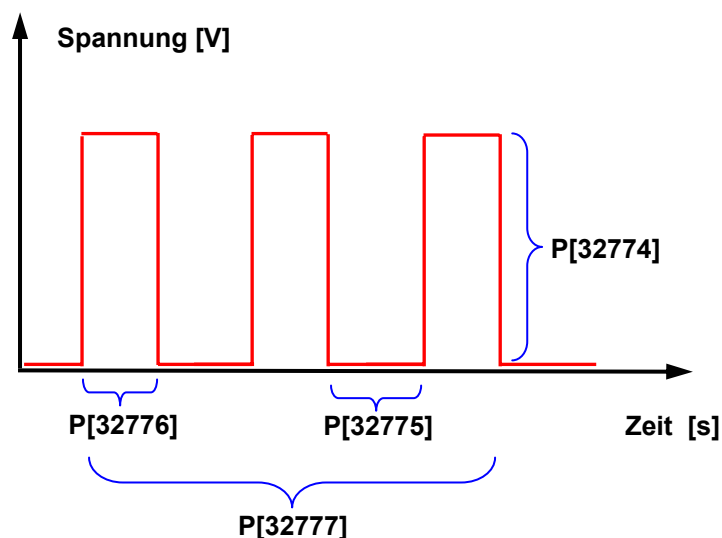


Abb.7.3 Analoge Signalausgabe der SPS

Der Parameter 32778 ist ein Formelparameter mit folgendem Wert:

$$P[32778] = 204,7 * P[32774]$$

Der vom Benutzer eingegebene Wert für die elektrische Spannung wird mit der Konstante 204,7 multipliziert und damit in eine SPS-Registerzahl umgewandelt.



Um diese Parameter vor der Prüfung im Programm eingeben zu können, ist dem Benutzerassistent für die Testing-Prüfung eine zusätzliche Rubrik „FGLTraining“ beigefügt worden. Dieser wurde dann in eine neue Datei als Prüfvorschrift für die Training-Prüfung gespeichert.

Die Kommunikationssoftware zwischen PC und SPS ist ein internes Zimt-Skript, gestartet mit einer Verknüpfung auf dem Desktop:

rechter Mausklick auf der Werkzeugleiste → *Werkzeugleiste editieren*

Neu → Symbol für Verknüpfung wählen (Bezeichnung: FGL Tr)

Typ → internes Zimt-Skript

Zimt-Skript:

```
CALL ConfigJetter ( JNANO, "COM4", True, False )
```

```
VAR i NUM
```

```
FOR i=1 TO p[32777]
```

```
SLEEP p[32775]
```

```
CALL JSETREG( 3010, p[32778] )
```

```
SLEEP p[32776]
```

```
CALL JSETREG( 3010, 0 )
```

```
NEXT
```

```
INFOBOX ( "FGL Training Beendet" )
```

7.2 DIE DURCHFÜHRUNG EINER FG- PRÜFUNG (TRAINING)

Zweck der Trainingsprüfung ist die Stabilisierung des Formgedächtnis-Effekts. Ähnlich der Testing-Prüfung wird auch hier die drahtförmige FG-Probe in die Zugmaschine eingespannt und bis auf den Zugfestigkeitswert belastet. Die FG-Drähte werden durch Lötösen die an den Probenhaltern geschraubt sind (**s.Abb.7.4**) am Stromkreislauf angeschlossen.

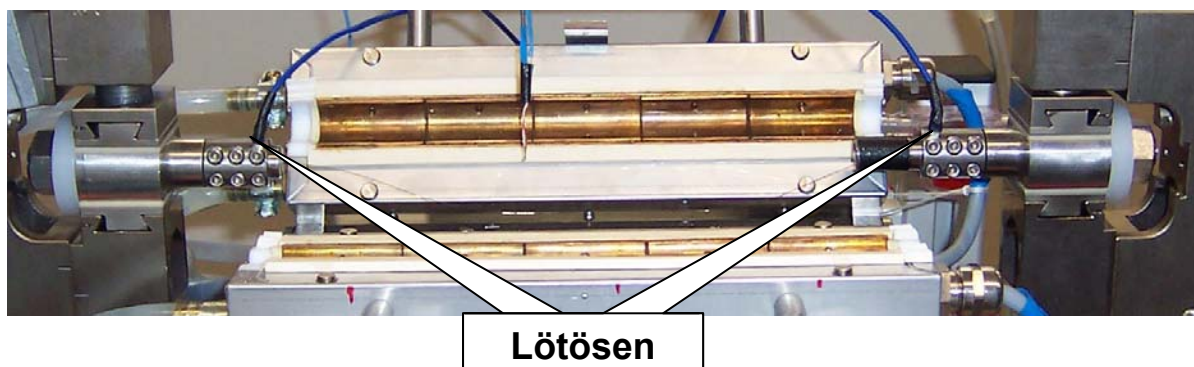


Abb.7.4 Anschluss der FG-Probe am Stromkreislauf

Der Prüfer beginnt den Trainingsversuch, indem er die Prüfvorschrift für das FG-Training öffnet und im Benutzerassistent die Versuchsparameter eingibt. Nachdem die Prüfung per Software gestartet wird und die Vorkraft erreicht ist erscheint auf dem Bildschirm die Meldung: *FGL Training bitte starten*. Das Netzteil mit richtig eingestellter Amperezahl und Spannung kann eingeschaltet werden und dann auch das Trainingsprogramm mit der Betätigung der Bildschirmverknüpfung *FGLTr*. Nach dem alle Zyklen durchgeführt worden sind erscheint die Meldung *FGL Training beendet* und der Prüfer kann das Netzteil bzw. die Software abschalten. Die Ergebnisse einer Training-Prüfung werden in der **Abb.7.5** gezeigt. Hier ist die gleiche FG Legierung (DY90 mit 4% Dehnung) wie bei der Testing-Prüfung benutzt worden.

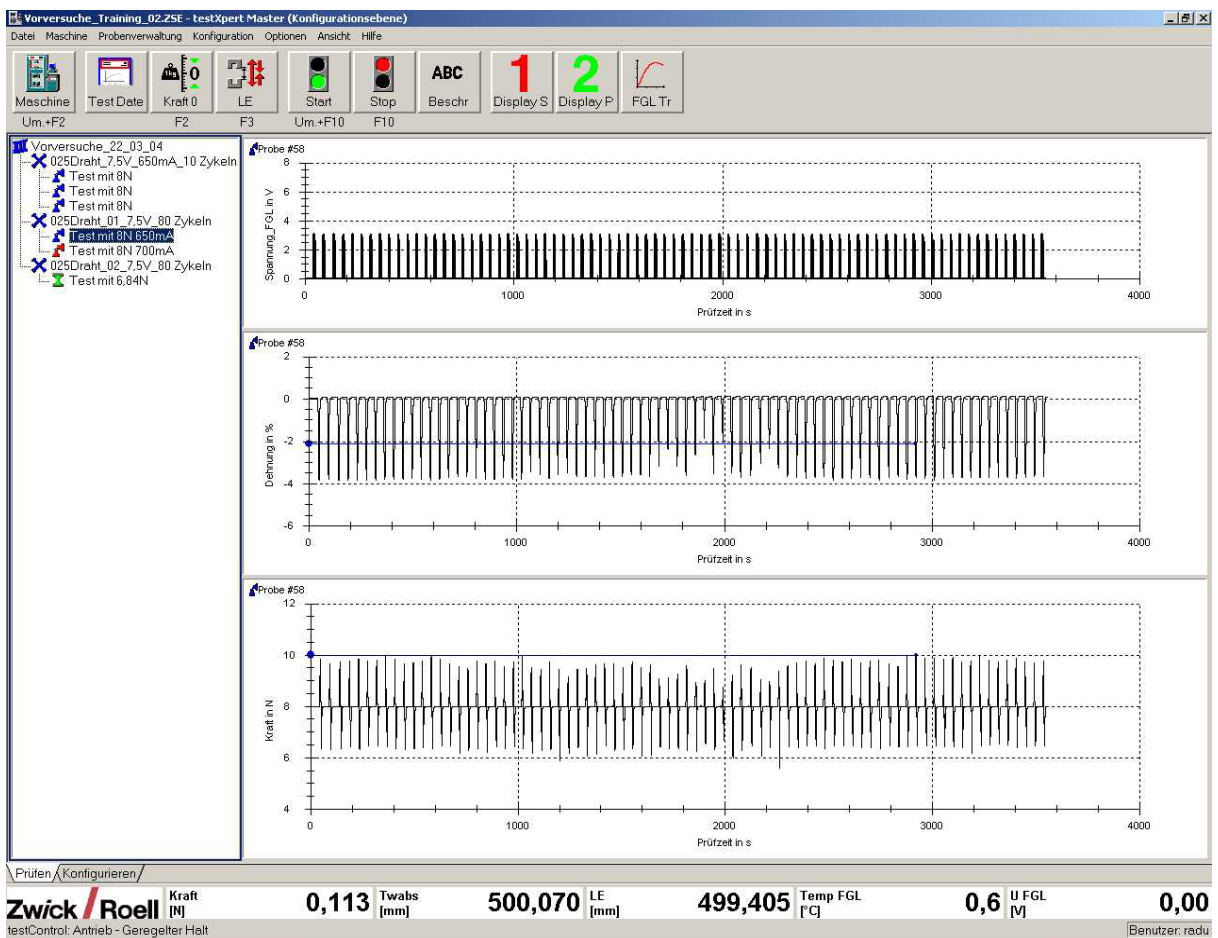


Abb.7.5 Ergebnisse einer Trainig-Prüfung (80 Zyklen)

Für die oben abgebildete Prüfung wurden folgende Parameter benutzt:

- FG Material: DY 90;
- Spannkraft der FG-Probe: 8N;
- Zyklennummer: 80;
- Zeitintervall zwischen 2 Zyklen:10s;
- Dauer der Bestromung:5s;
- Strom: 650mA;
- Elektrische Spannung: 7,5V;

8. REDESIGN DER FG-PRÜFMASCHINE

Auf der Basis der bisherigen Versuchsergebnisse und den Erfahrungen mit der im Projekt entwickelten FG-Prüfanlage auf Basis der Zwick-Prüfmaschine P1 (s. **Abb. 5.1** bzw. **Abb. 8.1**) wurde wie im Projektantrag vorgesehen gegen Ende der Projektlaufzeit ein so genanntes „Redesign“ durchgeführt.

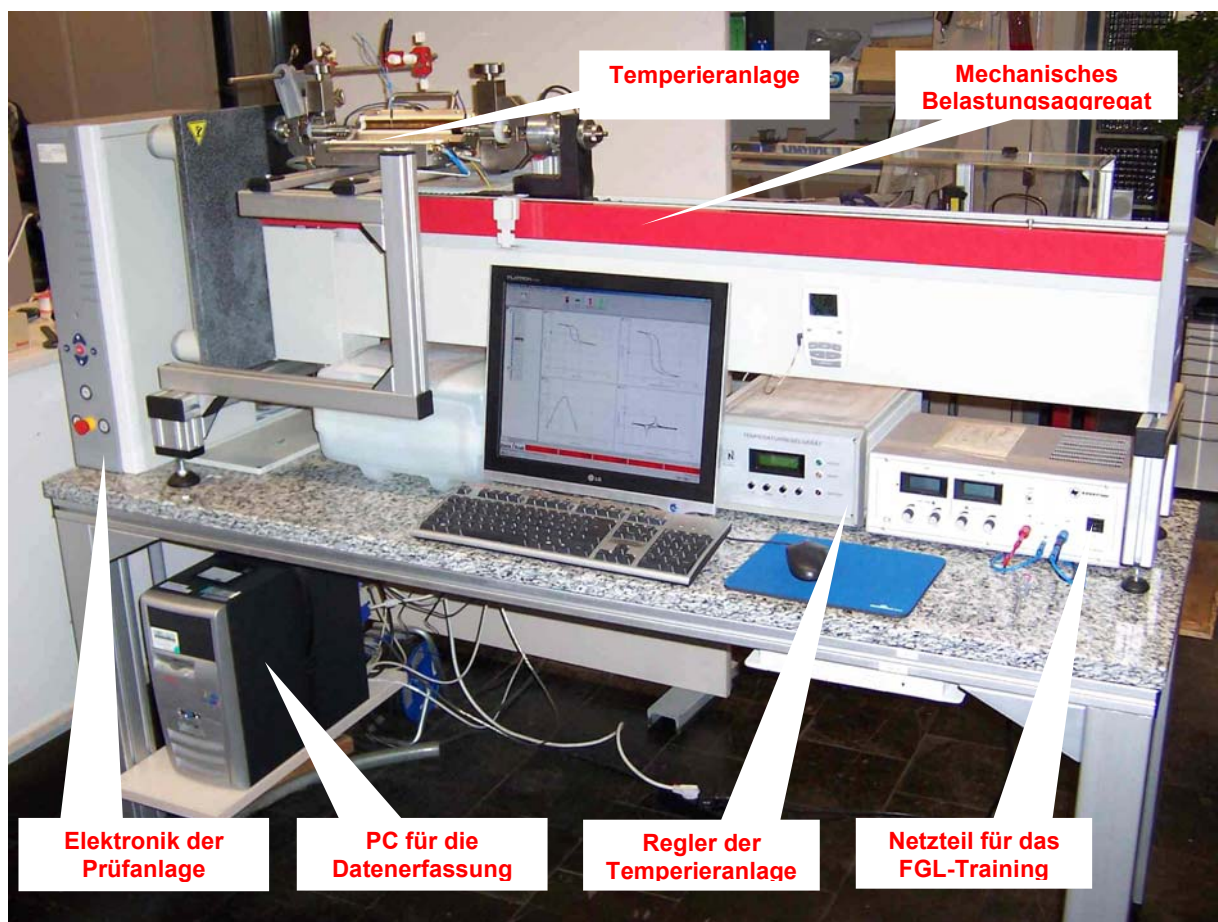


Abb. 8.1. FG-Prüfanlage auf Basis der Zwick-Prüfmaschine

Mit dem beteiligten Projektpartner, der Firma w+b Walter und Bai Prüfmaschinen AG, aus Löhningen (im Weiteren w+b), wurde eine verbesserte FG-Prüfanlage auf der Basis von deren Prüfmaschinen konzipiert und gebaut („Redesign“). Abbildung 8.2 zeigt die diesen weiterentwickelten Prototyp P2, bei dem fast alle Komponenten zum

Einsatz kamen, die im bisherigen Projekt für die erste FG-Prüfanlage P1 auf der Basis der Zwick-Prüfmaschine verwendet wurden.

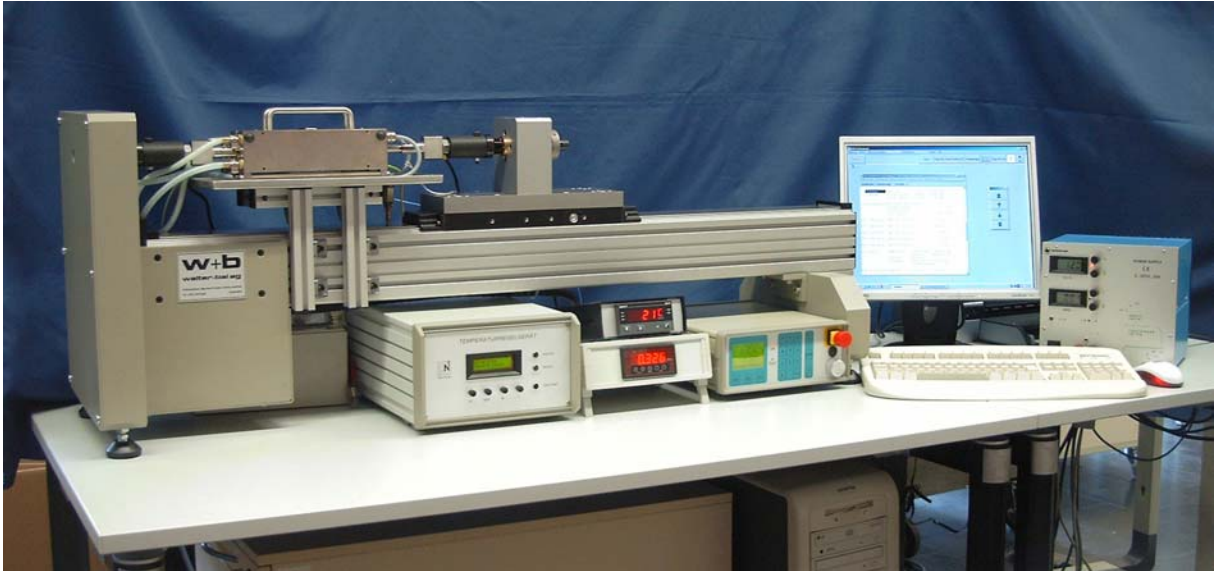


Abb. 8.2. FG-Prüfanlage auf Basis der w+b-Prüfmaschine

Wie in Abb. 8.2. ersichtlich, kam neben einem neuen Prüfmaschinentisch auch ein neuer Rechner zum Einsatz, da der Projektpartner w+b auch über eine eigene Ansteuerungssoftware verfügt und die bisherige Prüfanlage P1 für andere Prüfaufgaben weiter verwendbar sein soll. Die Arbeiten zur Konzeption, Fertigung, Montage und Adaption der Software an die gestellten Aufgaben erfolgten in sehr enger Kooperation sowohl beim Projektpartner w+b in CH- Löhningen, als auch an der Fachhochschule Konstanz. Die Vorteile dieses weiterentwickelten Prototyps P2 gegenüber der FG-Prüfmaschinen-Entwicklung auf der Basis der Zwick-Prüfmaschine P1 liegen vor allem in einer noch schnelleren Traversengeschwindigkeit und in der sehr hohen Aatastrate. Außerdem wurden bei diesem Prototyp mehr frei Kanäle vorgesehen, um weitere zukünftige Messaufgaben realisieren zu können. Die zusätzliche Messung des elektrischen Widerstandes in der zu untersuchenden FG-Probe konnte hierbei schon innerhalb der Projektlaufzeit realisiert werden.

Die Vorteile und die technischen Daten dieser w+b-FG-Prüfanlage sind nachfolgend aufgelistet.

8.1 VORTEILE DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS

- ☞ kompakte Test- und Prüfeinheit
- ☞ unkomplizierte Temperatursteuerung über Peltier-Technologie
- ☞ automatisierte Testabläufe
- ☞ reproduzierbare Tests
- ☞ anwendungsorientierte Simulation von FG-Bauelementen (Aktor / Sensor)

8.2 TECHNISCHE DATEN DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS

- ☞ Belastungen bis zu 2 kN (Verwendung unterschiedlicher Kraftmessdosen)
- ☞ maximale Probenlänge: 750mm
- ☞ Durchmesser min./max: 0,01mm bis 5mm
- ☞ maximale Traversengeschwindigkeit: 2000mm/min
- ☞ Temperaturbereich des Peltierofens: -40..+180°C
- ☞ Zusätzliche elektrische Erwärmung (über Netzgerät bis zu: 32V / 18A)
- ☞ Abtastraten bis zu 500Hz

8.3 ANLEITUNG ZUR DURCHFÜHRUNG VON VERSUCHEN AN FG-PROBEN AN DER W+B-FG-PRÜFMASCHINEN

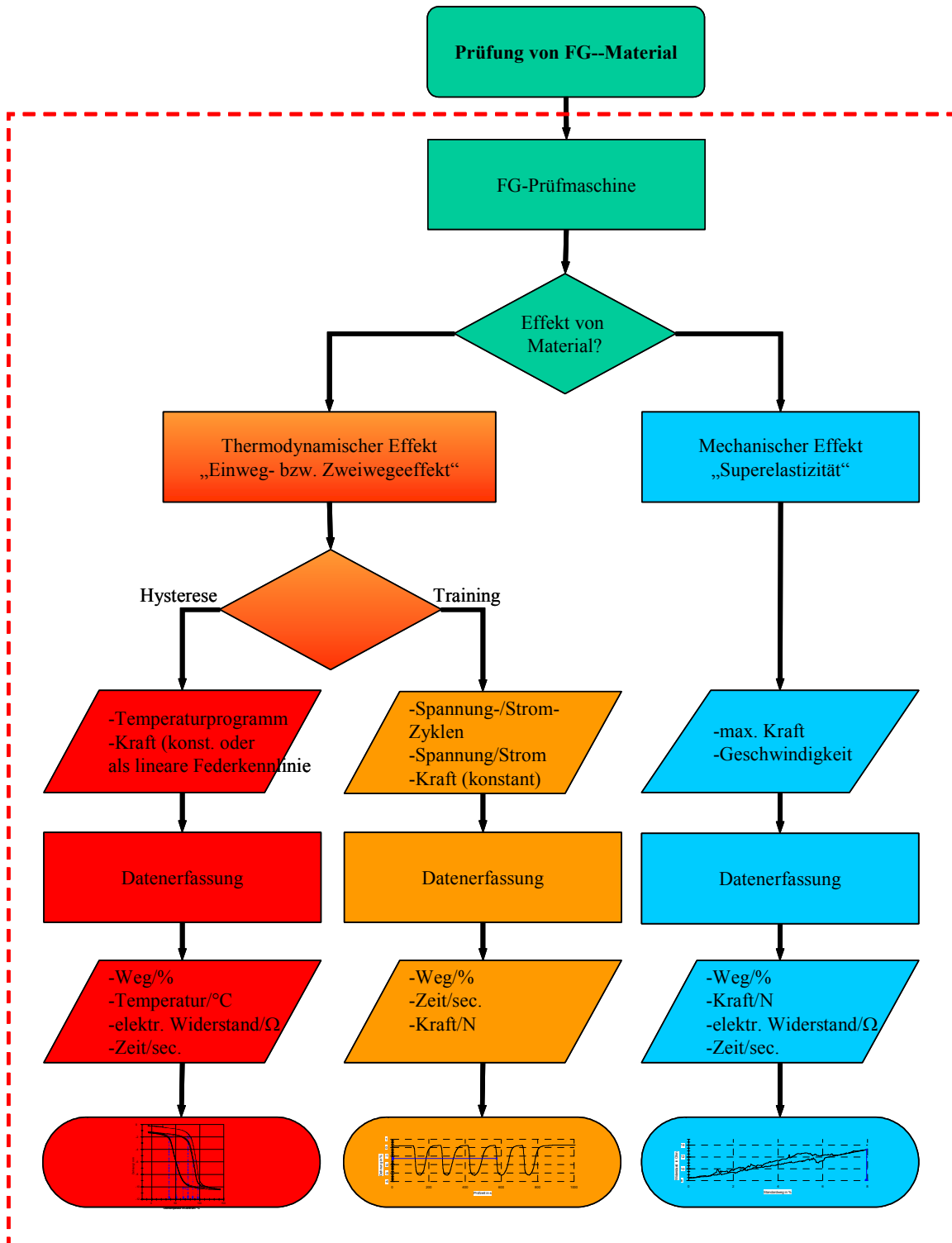
Einleitung

Die W+B Prüfmaschine wurde konzipiert für die Untersuchung von Drähten sowie Rohren aus FGL. Hierfür wurden vier Prüfprogramme erstellt:

- 1A Aufnahme der Hysterese bei konstanter Kraft;
(Erwärmung durch Peltier-Ofen)
- 1B Aufnahme der Hysterese bei veränderlicher Kraft;
(Erwärmung durch Peltier-Ofen; Eingabe der Federrate einer linearen Federkennlinie)
- 2 Training unter konstanter Kraft; (Erwärmung durch Strom (max. 18A):
Eingabe der Bestromungszeit und Pause)
- 3 Superelastizität (Fahren einer Rampe)

Die Funktion und der Ablauf der einzelnen Programme wurden in einem Flussdiagramm zusammengetragen. Das Flussdiagramm ist in Abb. 8.3 gezeigt.

Entwicklung einer Prüfanlage zur Prüfung von Bauelementen aus Formgedächtnismetallen



Die Prüfmaschine verfügt über zwei Regelgeräte. Das Regelgerät für die Prüfmaschine wird mit dem Programm „DionPro“ angesprochen. Die Software für das Regelgerät des Peltier-Ofens heißt „Regelgerät 4.1.1“.

Die aktuelle Ofentemperatur wird mit einem Thermoelement Typ K im Ofenzentrum gemessen und in einem Konverter der Marke „West“ entsprechend umgesetzt. Für die Aufnahme des elektrischen Widerstandes dient ein Gerät der Marke „Karl Tesar“. Die Messwerte Temperatur und elektrischer Widerstand werden als analoges Signal ausgegeben und sind am W+B-Regelgerät angeschlossen.

Für einen Trainingsvorgang wird ein externer Transformator an dem Stromverteilerkasten angeschlossen. An dem Stromverteilerkasten sind zwei Eingänge und zwei Ausgänge (Gleichstrom) mit entsprechender Beschriftung angebracht. Das Relais ist für maximal 18 Ampere ausgelegt! (Hinweis: ab 16 A verdampft bereits die Chromschicht von den Steckern). An den Ausgängen am Stromverteilerkasten werden die schwarzen Kabel, die an den Halterungen angebracht sind, angeschlossen.

!Achtung! Beim Training darf das Widerstandsmessgerät nicht angeschlossen sein, da es sonst zerstört wird! !Achtung!

Damit eine Zerstörung des Widerstandsmessgerätes nicht vorkommt, wurde an jeder Aufnahme nur ein Kabel angeschlossen. Die zwei schwarzen Kabel können entweder an dem Stromverteilerkasten oder an dem Widerstandsmessgerät angeschlossen werden.

Genaue Angaben über die einzelnen Geräte bitte aus den vorhandenen Hersteller-Informationen entnehmen.

W+B Regelgerät

Beim Einschalten des W+B-Regelgerätes muss der Modus „PC-Control“ eingestellt sein. Zeigt das Gerät etwas anderes an, so kann mit der F2 das Menü geöffnet werden und die Einstellungen durch drehen des Rades entsprechend verändert werden. Mit F1=esc wird das Menü verlassen. Mit F3 wird die eingestellte Änderung gespeichert.

Starten von DionPro

Durch Doppelklick auf die Sanduhr öffnet sich das Programm „Dion Pro“ für die Bedienung und Ansteuerung der Prüfmaschine.

Paßwort eingegeben!

Frei lassen, Enter

Verbindung mit Regelgerät herstellen
(Regelgerät ist auf COM 1 angeschlossen!)

Steuerung – neue Verbindung –
OK (warten)

Online schalten mit edc-button

Klick auf edc (warten)

Rechter Mausklick (rMK) auf Fläche

es erscheint eine Leiste mit Pfeilen, durch Anklicken der Pfeile kann der Schlitten auf der Traverse bewegt werden

Der Schlitten auf der Traverse kann auch direkt mit dem Regelgerät verfahren werden

drücken der Stop-Taste – drücken auf Dreieck hoch oder runter, vorsichtig am Rad drehen

Handbetrieb (Anzeige von Kraft, Weg..) und Abgleichen von Kraft und Weg in diesem Fenster

Klicken auf „Kreis 1“
Nullpunkt – Kraft/Weg - abgleichen

Unter „Anwendung – Statische Versuche“ können Prüfvorschriften geladen werden um statische Versuche (z.B. Zugversuch) durchzuführen. Die Prüfvorschriften können nicht selber erstellt werden.

Für die FG-Anwendungen sind jedoch die zyklischen Prüfungen von Interesse. Hierfür stellt DionPro eine Software zur Verfügung mit der die Prüfungen programmiert werden können (Mischung aus Basic und Ablaufsprache). Sobald ein Programm geladen wurde kann dies direkt im Programmfenster verändert werden. Beispielsweise kann die Skalierung der Online-Grafik direkt im Programmfenster angepasst werden. (Hinweis: Bei Programmänderungen muss DionPro gegebenenfalls neu gestartet werden.)

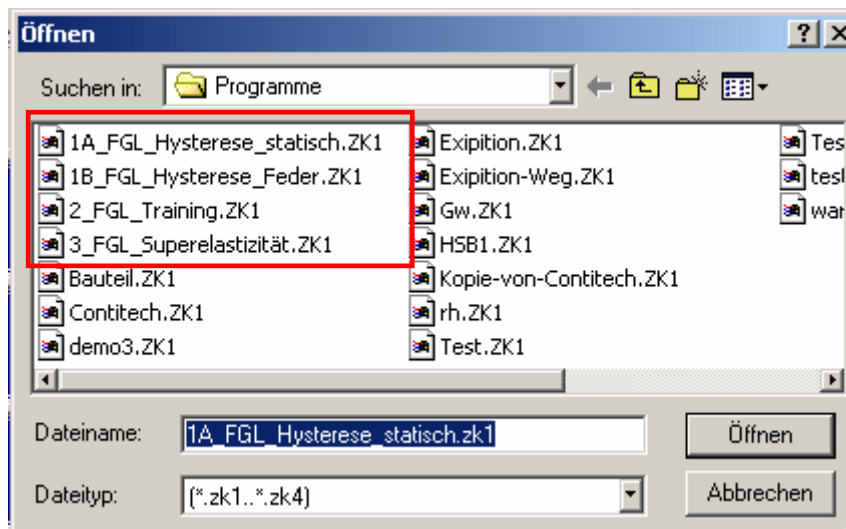
Alle FG Programme sind in dem Verzeichnis:

Programme \ W+B \ Programme

als ZK1-Datei abgelegt. Zusätzlich wurden die Programme in dem Verzeichnis „Programme \ W+B \ Sicherung der Programme“ zusätzlich gespeichert, so dass bei einer versehentlichen Änderung der Programme diese wieder zur Verfügung stehen. Dabei müssen die Dateien wieder in den Ordner „... \ Programme“ kopiert werden.

Öffnen von einem Programm:

DionPro: zyklische Programme \ neu/öffnen \ (Auswahl)



Nach Bestätigung öffnet sich ein neues Fenster. In diesem Fenster muss vor jedem Versuch eine neue ZYP-Datei erstellt werden, in der die Messwerte gespeichert werden:

Programmfenster: Proto-Datei \ Neu/Wählen

In diese Datei werden unter dem angegebenen Dateinamen und Pfad die Messwerte gespeichert. Für die Speicherung der Messwerte wurde der Ordner:

Programme \ W+B \ temp_Messwerte \ (Name)

vorgesehen. Wenn der Name der Datei nicht abgeändert wird, so werden die bestehenden, alten Messwerte überschrieben.

Auswertung:

Die Auswertung der Versuche erfolgt in Excel. Um die Messwerte in Excel konvertieren zu können muss nach dem Versuch eine Ascii-Datei erstellt werden. Dies erfolgt nach dem Versuch im Programmfenster:

Programmfenster: Proto-Datei \ P=>Ascii

Es wird in dem gleichen Ordner in dem die ZYP-Datei geschrieben wurde eine ZYA-Datei (Ascii-Format) erstellt. Diese Textdatei kann in Excel geöffnet werden unter:

Excel: Datei – öffnen – (Auswahl alle Dateitypen) - Ende

Nun erscheinen in der Tabelle die Messwerte: Zeit / Kraft / Weg / Temperatur / Widerstand . Die kompletten Messwerte nun markieren und kopieren.

Als nächster Schritt wird unter Excel die Datei „Vorlage für Auswertung“ im Verzeichnis „W+B“ geöffnet. !Diese Datei unter einem anderen Namen speichern damit die Vorlage später wieder zur Verfügung steht! Die kopierten Messwerte müssen nun in das entsprechende Feld „Daten_Prog(1-3)“ eingefügt werden. Die Grafik wird angezeigt. Die Auswertung der Phasenumwandlungstemperaturen erfolgt durch Anlegen der Tangenten (Linie ziehen mit Grafik-Editor).

Programm 1A: Aufnahme der Hysterese unter konstanter Zugspannung

(Voraussetzung: alles aus)

Dieses Programm dient zur Bestimmung der Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) von FGL. Es wird eine Kraft vorgegeben die während des Versuches konstant gehalten wird. Das Temperieren des Drahtes erfolgt über den Peltier-Ofen. Dabei sind die Änderungen des Wegs, der Temperatur im Ofenzentrum und des elektrischen Widerstandes von Interesse.

Versuchsablauf:

- Vergewissern, dass der Transformator ausgeschaltet ist
- den Peltier-Ofen öffnen (Aus Stabilitätsgründen den Ofen nicht an den Griffen anfassen, sondern am Rahmen!)

- Öffnen von DionPro
- Verbindung mit Regelgerät herstellen und Online schalten
- den Schlitten von der Prüfmaschine auf Position fahren (rechter Probenhalter ragt ca.10 mm in den Ofen)
- Gegebenenfalls muss der Block auf dem Schlitten versetzt werden (die vier 6-Kant-Schrauben lösen und den Block in eine andere Position versetzen)
- Ofen schließen, der rechte Probenhalter darf den Ofen nicht berühren. Gegebenenfalls die Ofenposition einstellen, durch Lösen und Verschieben der Bosch-Profile
- Probe bei geöffnetem Ofen einspannen (die Druckplättchen der Probenhalter sind entsprechend dem Durchmesser der Drahtprobe auszuwählen.)
- Die Probenlänge ist auf die Länge des Peltier-Ofens zuzüglich der Einspannlänge an den Probenhaltern beschränkt (285 – 290 mm)
- schwarze Kabel an das Widerstandsmessgerät anschließen
- Probe so vorspannen, dass sich gerade eine Kraftänderung am Regelgerät zeigt
- Kraft und Weg nullen:
 - Programmfenster: Einrichten \ Nullpunkt \ (Kraft/Weg/Dehnung)
- Pfad für Messwerte angeben:
 - Programmfenster: Proto-Datei \ Neu/wählen... (wie zuvor beschrieben)
- Peltier-Ofen schließen
- Alle Messgeräte angeschlossen?
- Versuch starten mit „START-Button“

Nach Start müssen die Werte in folgender Reihenfolge und Einheit angegeben werden:

1. Vorkraft in kN
2. Geschwindigkeit in N/sec
3. Endkraft in kN

Nachdem die Endkraft eingegeben wurde beginnt der Versuch!

Nach Erreichen der Vorkraft erscheint der Hinweis: „Temperatur-Programm starten“

- mit SPACE bestätigen

Die Einstellung der gewünschten Temperatur kann manuell am Peltier-Regelgerät erfolgen oder über die Software „Regler4.1.1“ programmiert werden.

(siehe Beschreibung von Peltier-Regelgerät)

-Peltier-Temperaturprogramm starten

-Pumpe für Kühlkreislauf einschalten

Nachdem das Temperaturprogramm abgelaufen ist kann die Datenaufnahme mit drücken der Taste „SPACE“ beendet werden.

Soll der Versuch zwischendrin abgebrochen werden, so kann dies auch durch anklicken des Buttons „Stop-Standby“ oder mit „F4“ geschehen.

Nach dem Versuch muß eine ASCII-Datei erstellt die im Excel ausgewertet werden kann. (siehe Kapitel: „Auswertung“)

Programm 1B: Aufnahme der Hysterese bei veränderlicher Kraft $F_{(s)}$

Dieses Programm dient zur Bestimmung der PUT von FGL bei einer veränderlichen Kraft (Bauteilversuch). Die Kraft ändert sich entsprechend der Wegänderung ab Erreichen der Endkraft entsprechend der eingegebenen Federkonstante (nur für lineare Federkennlinie). Das Temperieren des Drahtes erfolgt über den Peltier-Ofen. Dabei sind die Änderungen des Wegs, der Temperatur im Ofenzentrum und des elektrischen Widerstandes von Interesse.

Versuchsablauf:

- wie bei Programm 1A bis Start..

Nach Start müssen die Werte in folgender Reihenfolge und Einheit angegeben werden:

1. Vorkraft in kN
2. Geschwindigkeit in N / sec
3. Endkraft in kN
4. Federkonstante in kN / mm

Nachdem die Federkonstante eingegeben wurde beginnt der Versuch!

Programm 2: Training von FGL

Dieses Programm dient zum Trainieren von FGL. Der Draht wird hierbei mit elektrischem Strom beheizt. Der Strom wird von einem externen Transformator geliefert. Über die Software kann die Ein- und Ausschaltzeit, sowie die Zyklenanzahl eingegeben werden. Bei dieser Messung ist zu beachten, dass das Widerstandsmessgerät nicht mit den schwarzen Leitungen verbunden ist, da das Gerät ansonsten zerstört würde.

Versuchsablauf:

Die Drahtlänge ist auf die Traversenlänge zwischen den Aufnahmen beschränkt. Der Peltier-Ofen ist aufgeklappt. Es dürfen keine Gegenstände mit dem Draht und Einspannungen in Berührung sein: Kurzschlussgefahr!

- Probe einspannen
- schwarze Kabel aus dem Widerstandsmeßgerät entfernen und an den Transformator anschließen
- bei gezogenem Stecker die Spannung am Netzgerät einstellen
- Programm in DionPro aufrufen
- Pfad und Name für Messwert-Datei angeben
- Draht manuell vorspannen
- Kraft abgleichen
- Start-Button anklicken
- Eingabe von:

1. Geschwindigkeit in N / sec
2. Endkraft in kN
3. Zyklenanzahl
4. Einschaltzeit pro Zyklus in sec
5. Ausschaltzeit pro Zyklus in sec

Nachdem alle Zyklen durchlaufen wurden erscheint der Hinweis Stop (durch drücken der Taste „Space“).

Programm 3: Superelastizität

Mit diesem Programm wird eine Rampe gefahren. Die maximale Kraft, Vorschub und Haltezeit werden vorgegeben. Das Programm fährt dann von der Kraft Null auf F_{\max} und nach der entsprechenden Haltezeit wieder auf Kraftwert Null. In dieser Messung sind die Änderung des elektrischen Widerstandes und der Kraft zum Weg von Interesse.

- Öffnen des Programms „3_FGL_Superelastizität.ZK1“
- Widerstandsmessgerät angeschlossen?
- Start-Button; Eingabe von:

1. Geschwindigkeit in mm / sec
2. Endkraft in kN
3. Warezeit in sec

Sobald die Rampe durchlaufen wurde kann die Datenaufnahme durch die Taste „Space“ beendet werden.

Auswertung: siehe oben

Programmdefinition zu „Superelastizität“:

Das Programm soll von der Kraft Null auf eine maximale Kraft (F_{\max}) fahren, dort Halten (Haltezeit) und nach der Haltezeit wieder auf die Kraft Null zurückfahren. Die Geschwindigkeit (Vorschub) soll dabei frei wählbar sein (mm/s)

8.4 VORSTELLUNG DES W+B-FG-PRÜFMASCHINEN-PROTOTYPS AUF DER SMST2004 IN BADEN-BADEN

Dieser „redesignte Prototyp einer FG-Prüfanlage“ wurde nach einigen Tests an der Fachhochschule Konstanz vom 4.-8. Oktober 2004 bei der internationalen Konferenz für FGL und Superelastische Technologien, SMST2004, in Baden-Baden den Herstellern und Anwendern von Formgedächtnislegierungen vorgestellt.

Die Tatsache, dass seit dieser Vorstellung insgesamt sechs konkrete Anfragen und eine definitive Bestellung einer derartigen Prüfmaschine beim Industriepartner eingingen, unterstreicht den Erfolg dieses angewandten Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

Eine Kopie der Posterpräsentation [10] sowie des dort gezeigten Demonstrationsvideoclip dieser w+b-FG-Prüfmaschine [11] befindet sich im Anhang dieser Arbeit bzw. auf der beigefügten DVD.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Konstanz wurde eine voll automatisierte, universale Prüfanlage entwickelt mit deren Hilfe es möglich ist, das Verhalten von Formgedächtnislegierungen (FGL) bei der Variation verschiedener Parameter zu ermitteln.

Formgedächtnislegierungen sind Materialien, die sich nach einer thermischen und/oder mechanischen Belastung wieder an ihre Ursprungsgeometrie „erinnern“. Die gebaute Prüfanlage erfasst die Temperaturwerte, bei der die Umwandlungsprozesse in der Struktur der FG-Materialien stattfinden. Damit kann man die Dehnungsrate und den genauen Temperaturbereich der untersuchten Materialien bestimmen. Da die Untersuchungen bei unterschiedlichen Belastungen durchgeführt werden können, ermöglicht diese Prüfanlage erstmals eine realitätsnahe Prüfung an Formgedächtnisbauteilen.

Die Voraussetzung für den Shape-Memory Effekt ist eine gewisse Belastung (Dehnung) der Probe. Als Aggregat wurde eine universelle 2,5kN Zugmaschine benutzt und umgebaut. Für den Umbau sind mittels CAD folgende Anbauteile entwickelt und konstruiert worden:

- Kippeinrichtung für die horizontale Positionierung der Maschine,
- Arbeitstisch,
- Halterung für die Temperieranlage.

Um die drahtförmigen Proben an die Prüfmaschine fixieren zu können wurden Probenhalter aus einem Werkstoff mit geringer Wärmeausdehnung konstruiert. Sie ermöglichen eine Einspannung von Proben verschiedener Formen und Maße (Drähte und Rohre von $\varnothing 0,01$ bis 5mm). Das Mess- und Datenerfassungsprogramm wurde in TestXpert programmiert.

Eine weitere Voraussetzung für den Formgedächtniseffekt ist die Gefügeumwandlung aufgrund der Temperaturänderungen. Es wurde ein Anlage konstruiert die in der Lage ist Temperaturprofile (Rampen) im Bereich von ca. -40 bis ca. $+180^{\circ}\text{C}$, zeitgesteuert zu fahren. Die Funktionsweise der Temperieranlage basiert auf dem Peltier-Prinzip: der Stromfluss durch einen geschlossenen Kreis aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern bewirkt eine Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen. Um einen einfachen, raschen und sicheren Ein- und Ausbau der Proben zu ermöglichen wurde es als eine klappbare Zweischalenkonstruktion konzipiert die mittels Ofenhalter an der Prüfmaschine befestigt wird. Durch diese Art der Temperieranlage entfallen aufwendige Zusatzeinrichtungen (wie z.B. Stickstofftanks), es ist lediglich eine Wasserkühlung für die Peltier Elemente erforderlich.

Eine weitere Funktion der entwickelten Prüfmaschine ist das sogenannte „Training“ der FG-Materialien, dessen Zweck die Stabilisierung des Formgedächtniseffekts ist. Die Trainingseinrichtung ermöglicht eine zyklische Bestromung der Proben. Die für das Training benötigte elektrische Energie wird mittels eines Netzteils geliefert. Die Unterbrechung des Stromkreislaufes an der FG-Probe erfolgt durch ein SPS (Speicher-Programmierbare-Steuerung) gesteuertes Lastrelais. Das Programm für die Steuerung der Trainingseinrichtung wurde ebenfalls in TestXpert programmiert.

Auf der Basis der bisherigen Versuchsergebnisse und den Erfahrungen mit der im Projekt entwickelten FG-Prüfanlage P1 auf Basis der Zwick-Prüfmaschine wurde wie im Projektantrag vorgesehen gegen Ende der Projektlaufzeit ein so genanntes „Redesign“ durchgeführt. Mit dem beteiligten Projektpartner, der Firma w+b Walter und Bai Prüfmaschinen AG, aus Löhningen (im Weiteren w+b), wurde eine verbesserte FG-Prüfanlage P2 auf der Basis von deren Prüfmaschinen konzipiert und gebaut („Redesign“), bei dem fast alle Komponenten zum Einsatz kamen, die im bisherigen Projekt für die erste FG-Prüfanlage auf der Basis der Zwick-Prüfmaschine (P1) verwendet wurden.

Die Vorteile und die technischen Daten dieses „w+b FG-Prüfmaschinen-Prototyps P2“ lassen sich wie folgt angeben:

- kompakte Test- und Prüfeinheit
- unkomplizierte Temperatursteuerung über Peltier-Technologie
- automatisierte Testabläufe
- reproduzierbare Tests
- anwendungsorientierte Simulation von FG-Bauelementen (Aktor / Sensor).
- Belastungen bis zu 2 kN (Verwendung unterschiedlicher Kraftmessdosen)
- maximale Probenlänge: 750mm
- Durchmesser min./max: 0,01mm bis 5mm
- maximale Traversengeschwindigkeit: 2000mm/min
- Temperaturbereich des Peltierofens: -40..+180°C
- Zusätzliche elektrische Erwärmung (über Netzgerät bis zu: 32V / 18A)
- Abtastraten bis zu 500Hz

Dieser „redesignte Prototyp einer FG-Prüfanlage“ wurde nach einigen Tests an der Fachhochschule Konstanz vom 4.-8. Oktober 2004 bei der internationalen Konferenz für FGL und Superelastische Technologien, SMST2004, in Baden-Baden den Herstellern und Anwendern von Formgedächtnislegierungen vorgestellt. Seitdem befindet sich dieser Prototyp im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Konstanz. Neben weiteren Forschungsarbeiten innerhalb von Forschungsprojekten, Doktor-Master- und Studienarbeiten wurden für einen in der Region ansässigen Industriebetrieb auch schon Messungen an Formgedächtniselementen durchgeführt, die zur Einnahme von Drittmittel führten. Die Erfahrungen all dieser Arbeiten dienen als Basis für einen genormten Prüfprozess.

Die Tatsache, dass seit dieser Vorstellung insgesamt sechs konkrete Anfragen und eine definitive Bestellung einer derartigen Prüfmaschine beim Industriepartner eingingen, unterstreicht zudem den Erfolg dieses angewandten Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

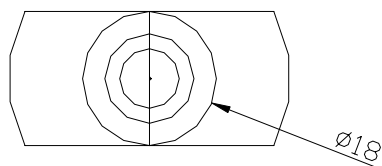
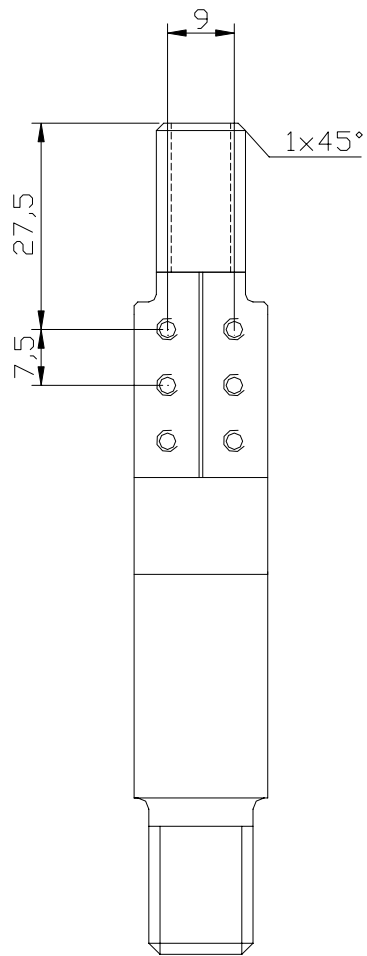
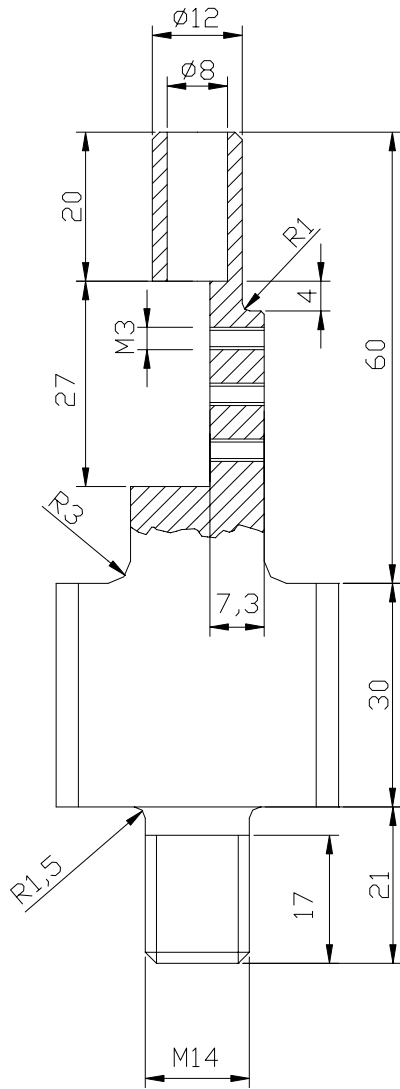
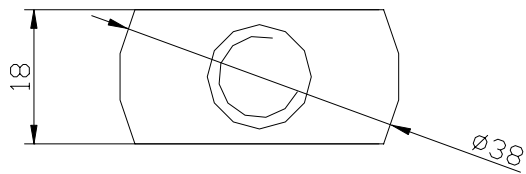
10. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Seidel, Wolfgang: Werkstofftechnik; München, Wien; Hanser Verlag 1990.
- [2] Stöckel, Dieter: Legierungen mit Formgedächtnis; Band 259, Kontakt und Studium; Expert Verlag 1988.
- [3] Fischer, Falko: Literature Review of Different Influences on the Shape Memory Effect and Development of a Test Facility for Shape Memory Wires; Thesis Project; Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, Fachhochschule Konstanz; May 2000.
- [4] Kupsch, Wolfgang, J. : Anmerkungen zur Anwendung der Peltier Elemente; http://www.efindon.de/efindon/pdf/peltier_elemente-aufsatz.pdf.

11. ANHANG

- [1] 2D-Zeichnung: Probenhalter „oben“;
- [2] 2D-Zeichnung: Probenhalter „unten“;
- [3] 2D-Zeichnung: Probenhalter-Gegenplatte;
- [4] 2D-Zeichnung: Zwischenplatte, 0mm;
- [5] 2D-Zeichnung: Zwischenplatte, 0,5mm;
- [6] 2D-Zeichnung: Zwischenplatte, 1,2mm;
- [7] 2D-Zeichnung: Unterlegscheibe;
- [8] 2D-Zeichnung: Peltier-Anlage;
- [9] 2D-Zeichnung: Grundplatte;
- [10] Posterpräsentation auf der „2nd European Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications SMST 2004, in Baden-Baden, Germany, October 3rd-7th, 2004 (Originalgröße DIN A 0);
- [11] Demonstrationsvideoclip der w+b-FG-Prüfmaschine, gezeigt auf der „2nd European Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications SMST 2004, in Baden-Baden, Germany, October 3rd-7th.

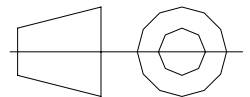
Auf der DVD [11] befinden sich außerdem alle Berichte und Zeichnungen in elektronischer Form



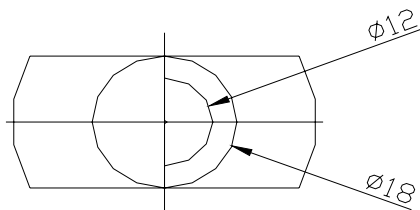
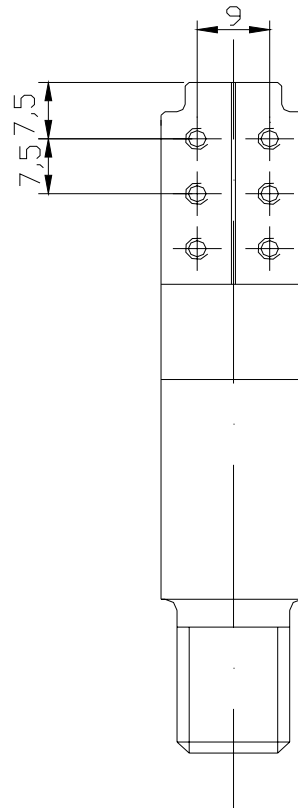
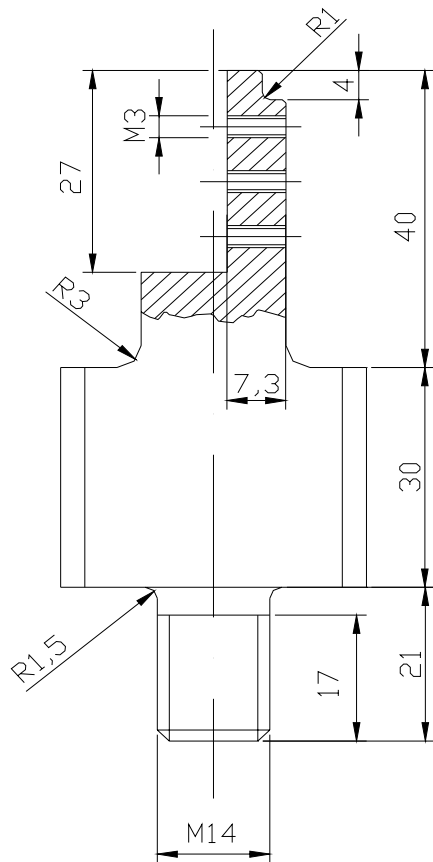
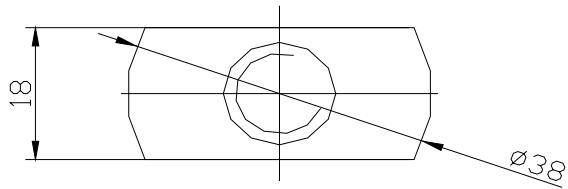
Scharfe Kanten 0,5x45°

Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8



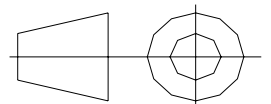
Verwendungsbereich		Zul. Abw.		Oberfl.		Maßstab 1:1		Gewicht	
						Werkstoff, Halbzeug			
						Rohteil-Nr			
						Modell- oder Gesenk-Nr			
				Datum	Name	Probenhalter			
				Bearb.					
				Gepr.					
				Norm					
								Blatt	



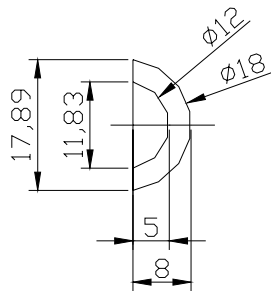
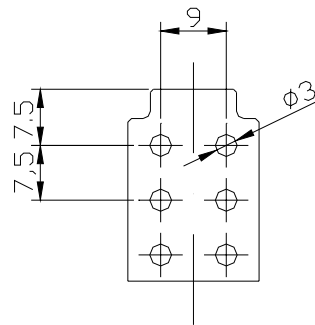
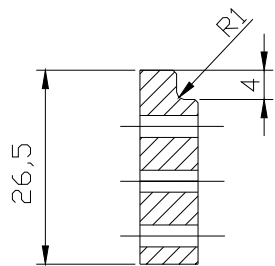
Scharfe Kanten 0.5x45°

Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8

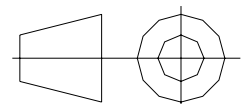


Verwendungsbereich		Zul. Abw.		Oberfl.		Maßstab 1:1		Gewicht	
						Werkstoff, Halbzeug		<h1>Probenhalter</h1>	
						Rohteil-Nr			
						Modell- oder Gesenk-Nr			
				Datum	Name				
				Bearb.					
				Gepr.					
				Norm					
								Blatt	

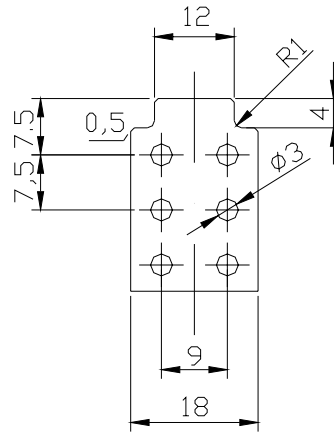
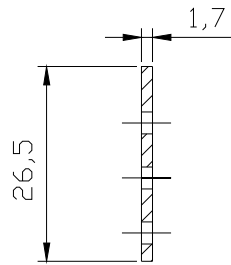


Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8



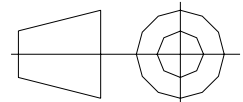
Verwendungsbereich	Zul. Abw.l	Oberfl.l	Maßstab		Gewicht
			Werkstoff, Halbzeug Rohteil-Nr Modell- oder Gesenk-Nr		
			Datum	Name	
			Bearb.		
			Gepr.		
			Norm		
					Blatt



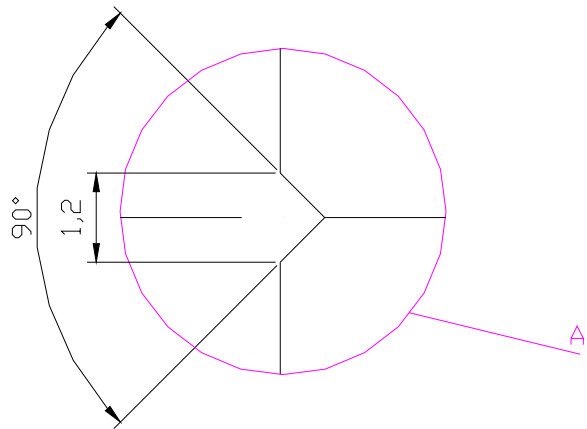
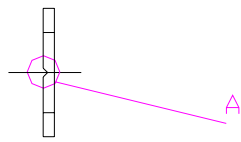
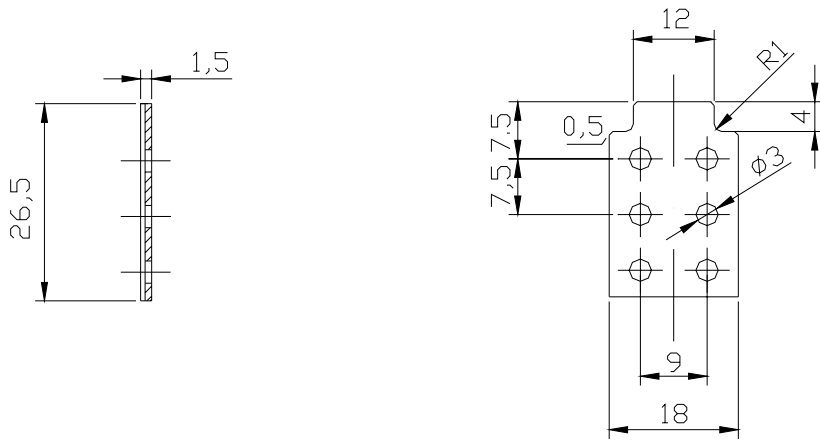
2 Stück

Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8

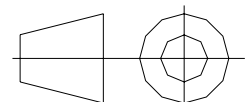


Verwendungsbereich				Zul. Abw.		Oberfl.		Maßstab		Gewicht	
								Werkstoff, Halbzeug			
								Rohteil-Nr			
								Modell- oder Gesenk-Nr			
					Datum	Name					
				Bearb.							
				Gepr.							
				Norm							
										Blatt	

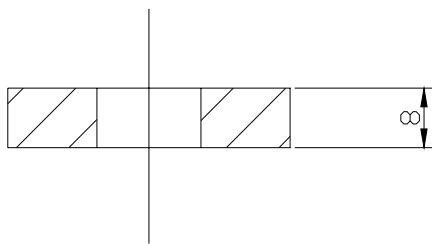
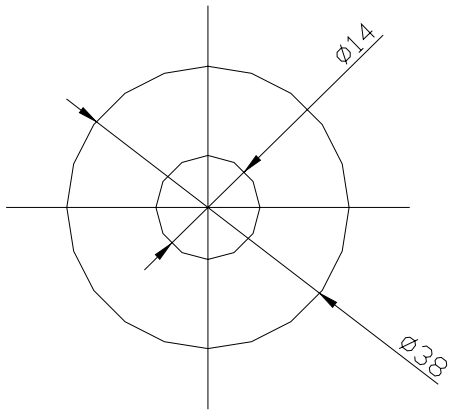


Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8

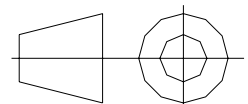


Verwendungsbereich				Zul. Abw.		Oberfl.		Maßstab		Gewicht	
								Werkstoff, Halbzeug			
								Rohteil-Nr			
								Modell- oder Gesenk-Nr			
					Datum		Name				
				Bearb.							
				Gepr.							
				Norm							
										Blatt	

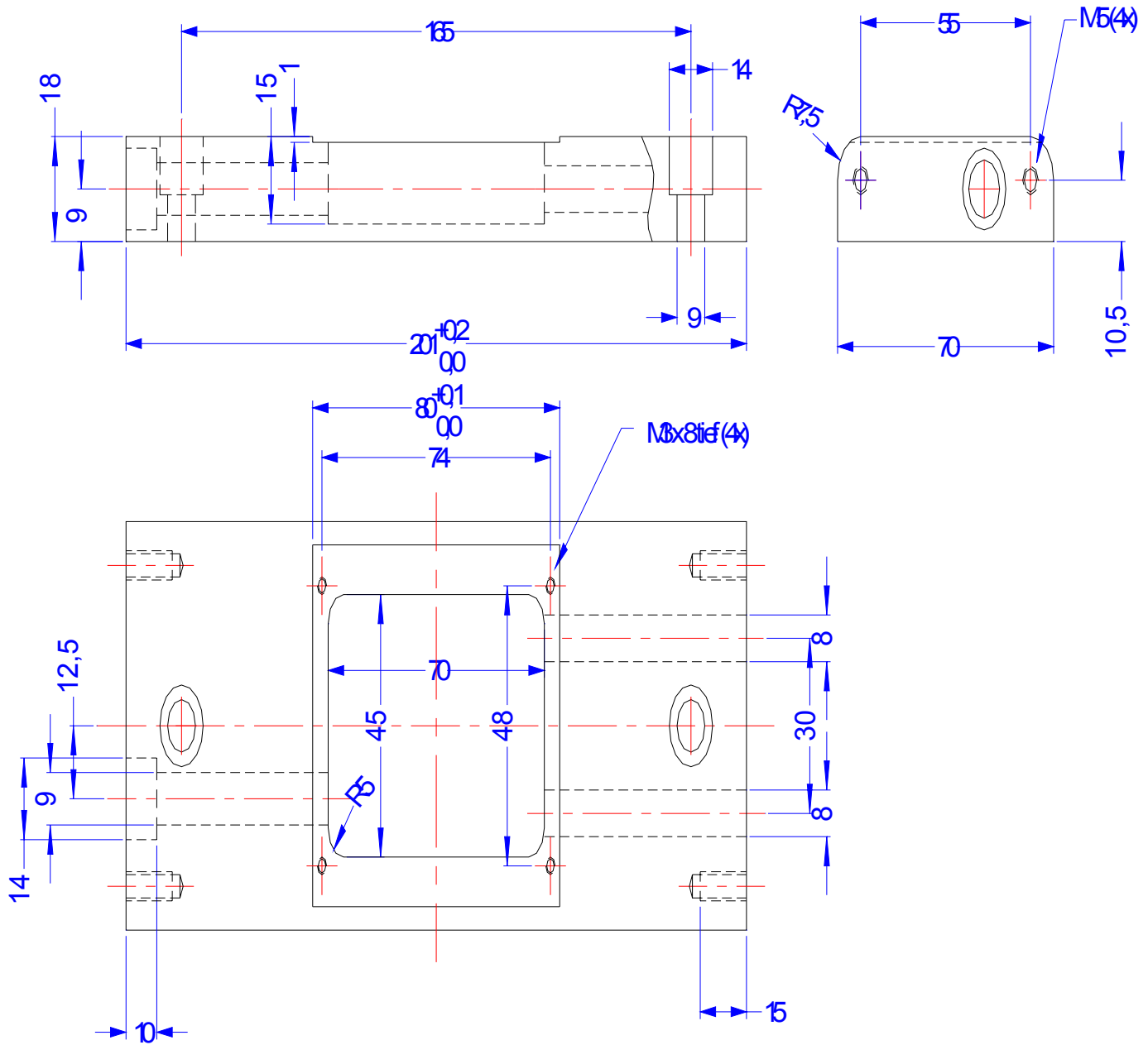


Allgemeintoleranzen:
 DIN ISO 2768-1 (1991-06)
 DIN ISO 2768-2 (1991-04)

Ra0,8

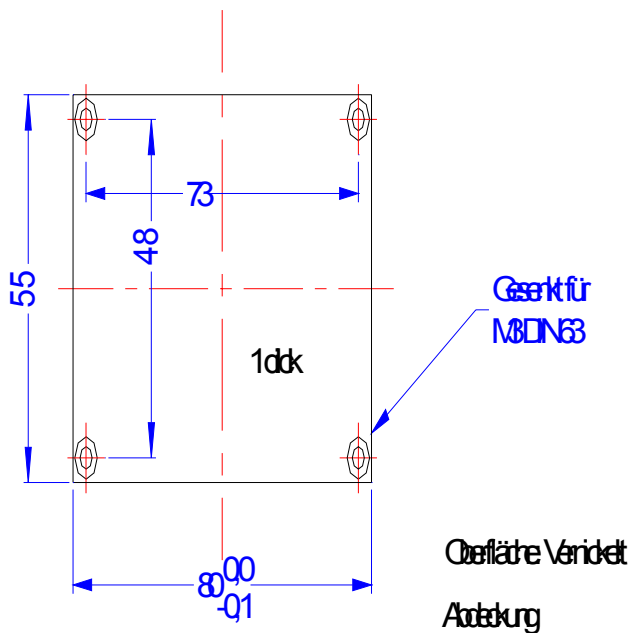


Verwendungsbereich			Zul. Abw.		Oberfl.		Maßstab 1:1		Gewicht	
							Werkstoff, Halbzeug		Unterlagscheibe	
							Rohteil-Nr			
							Modell- oder Gesenk-Nr			
			Datum		Name					
			Bearb.							
			Gepr.							
			Norm							
									Blatt	



Abdeckung mit Dichtungsmittel anschrauben, um Eindringen von Wasser zu verhindern (ZB Formerkautschuk)

Oberfläche Vernickelt
 Bedarf: Je 1 Stück



Verwendungsbereich	[Zul. Abw.]	[Oberfl.]	Maßstab: MAPSTAB	[Gewicht]	
			Werkstoff: Halbzeug Rohteil-Nr: Modell- oder Gesenk-Nr:		
		Datum	Name	Gunplatte	
		Bearb. 21703	Kupsch		
		Gepr.			
		Norm		Gunpldng	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Blatt
					Blätter
				Ersatz für:	Ersatz durch: