

Montanuniversität Leoben

**Einsatz des Umformdilatometers mit
Zug-/Druckadapter zur Simulation von
Warmumformprozessen**



Die vorliegende Arbeit wurde am Department Metallkunde und Werkstoffprüfung der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit der voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG durchgeführt.

Leoben, November 2011

Danksagung

Mein gebührender Dank gilt meinen Betreuern Frau Dipl.-Ing. Sabine Zamberger von der voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG, Abteilung Forschung und Entwicklung, und Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Harald Leitner für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit sowie für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfestellung.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Clemens, Vorstand des Departments Metallkunde und Werkstoffprüfung, für die Begutachtung der vorliegenden Arbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt auch dem Leiter der Abteilung Prüftechnik, Herrn Ing. Gerald Frank und seinen Mitarbeitern, sowohl im Analyselabor als auch in der Werkstätte, die mir fachlich mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Abschließend gilt mein Dank meinen Eltern, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch immer unterstützt und mir den Rücken gestärkt haben, und meiner Freundin Christine, die mir während dieser Zeit eine große mentale Stütze war.

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, November 2011

Uwe Tertinek

Kurzfassung

Die Entwicklung eines neuen Werkstoffkonzeptes und dessen industrielle Erzeugung können sehr kostenintensiv und zeitaufwendig sein. Hinzu kommt das Risiko, dass die Eigenschaften des Materials nicht den Anforderungen entsprechen könnten. Um die Werkstoffentwicklung in der heutigen Zeit voranzutreiben und zu optimieren, zeigt sich immer mehr die Notwendigkeit, reale industrielle Prozesse so genau wie möglich im Labormaßstab zu simulieren.

Die Verwendung eines Umformdilatometers ermöglicht bestimmte Zeit-Temperatur-Umformprofile zu simulieren und die Auswirkung unterschiedlicher (Umform-)Temperaturen und/oder Umformparameter auf das entstehende Gefüge zu untersuchen. Die voestalpine Stahl Donawitz hat die Möglichkeit, neben dem Standard-Umformdilatometer, auch eine Zug-/Druckeinrichtung zu verwenden. Das Ziel der Diplomarbeit besteht darin, die Anwendungsmöglichkeiten für den Zug-/Druckadapter aufzuzeigen und zu beurteilen.

Im Zuge der Diplomarbeit wurden Versuchsreihen mit vorgegebenen Zeit-Temperatur-Umformprofilen durchgeführt. Durch die Auswertung der aufgezeichneten Daten und der metallografischen Beurteilung des Gefüges konnte die Reproduzierbarkeit der Versuche bewertet werden. Als Versuchsmaterial diente ein mit Nb, Ti und V mikrolegierter C-Mn-Stahl mit 0,08wt% C und 1,5wt% Mn. Mit Hilfe des entsprechenden ZTU-Schaubildes war es möglich, vorab das bei den Versuchen entstehende Gefüge, die Phasenanteile und die Härte des Materials abzuschätzen. Durch den Vergleich der Versuchsdaten konnte der Geräteinfluss bzw. jener der Umformparameter abgewogen werden.

Abstract

The design and development of new material concepts and their industrial production can both be cost-intensive and time-consuming. Furthermore, there is always the risk that the material properties do not satisfy the requirements. The simulation of industrial processes offers the opportunity to increase the efficiency in modern materials development.

The use of a deformation dilatometer makes it possible to simulate certain time-temperature profiles and to analyse the effect of different deformation temperatures and/or deformation parameter on the emerging microstructure. Besides a standard deformation dilatometer the voestalpine steel Donawitz company also has the possibility to use a tension/deformation-adapter. The purpose of this diploma thesis is to illustrate and to judge the application of this tension/deformation-adapter.

In the course of the diploma thesis a series of experiments with given time-temperature-deformation profiles was performed. Through the analysis of the collected dilatometer data, hardness measurements and metallographic inspection of the samples, the reproducibility of the experiments could be judged. The material under investigation was a Nb, Ti and V microalloyed C-Mn-steel with 0,08wt% C and 1,5wt% Mn. With the help of a proper time-temperature-tension curve (TTT curve) it was possible to make conclusions *ex ante* about the emerging microstructure, phases and phase fractions and the hardness of the material. Comparison of the measured data allowed to distinguish between the effects of the deformation device itself and the deformation parameter.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole	VII
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Dilatometrie.....	2
2.1 Aufbau und Auswertung im Allgemeinen.....	3
2.2 Aufbau und Anwendung des Bähr 805 A/D/T	5
2.2.1 Anwendung der Abschreckeinheit (Bähr 805 A)	7
2.2.2 Anwendung des Umformmoduls (Bähr 805 D)	7
2.2.3 Anwendung des Zug-/Druckadapters (Bähr 805 T)	10
2.2.4 Software und Bedienung	17
3 Grundlagen zur Bestimmung von Fließkurven	18
3.1 Definition der Fließkurve	18
3.2 Geräte, Messprinzip und Unterschiede.....	21
3.3 Einflussgrößen	24
3.3.1 Werkstoff.....	24
3.3.2 Adiabatische Erwärmung	25
3.3.3 Stauchversuche und Reibung	25
4 Experimenteller Teil.....	27
4.1 Werkstoff.....	27
4.2 Dilatometerversuche.....	28
4.2.1 Anordnung der verwendeten Thermoelemente	29
4.2.2 Erstellung der Temperaturprofile mit der Dilatometer Software	29
4.2.3 Parameter der Zug-/Druckversuche.....	32
4.2.4 Darstellung der Dilatometerdaten.....	36
4.3 Metallographische Untersuchung und Härtemessung	37
5 Versuchsauswertungen und Ergebnisse	39
5.1 Evaluierungen des Versuchsaufbaus.....	39
5.1.1 Abweichende Versuchsergebnisse	42
5.2 Reproduzierbarkeit der Versuche	42

5.2.1 Bestimmung der Umwandlungstemperaturen	43
5.2.2 Betrachtung der Temperaturunterschiede in den einzelnen Segmenten.....	45
5.2.2.1 Segment 1 und 2; Aufheizen auf 1000°C und 10min halten.....	45
5.2.2.2 Segment 3 und 4; Abkühlen auf Umformtemperatur und 5min halten ..	48
5.2.2.3 Segment 5, 6 und 7; Umformen, 10s halten Abkühlung auf 30°C.....	50
5.3 Ergebnisse der Probenauswertung und Fließkurvenbestimmung.....	54
5.3.1 Probenform nach Versuch	54
5.3.2 Metallografie	55
5.3.3 Fließkurven.....	60
6 Diskussion.....	66
6.1 Reproduzierbarkeit und Versuchsanordnung	66
6.2 Werkstoffverhalten	67
6.3 Gerätetechnischer Teil.....	70
7 Zusammenfassung	73
Literaturverzeichnis	VIII

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 2.1: Beispiele für Kurvenverläufe bei Phasenumwandlungen.....	2
Abb. 2.2: Dilatometerkurven unterschiedlicher Stähle [3].....	2
Abb. 2.3: Prinzip eines induktiven Wegaufnehmers [5]	4
Abb. 2.4: Dilatometerkurve mit angelegten Tangenten zur Bestimmung der Gefügeanteile [6]	5
Abb. 2.5: Gesamtansicht des Bähr 805.....	6
Abb. 2.6: Messkammer mit den unterschiedlichen Komponenten des Bähr 805 A.....	7
Abb. 2.7: Übersichtsaufnahme des Bähr 805 D [7].....	8
Abb. 2.8: Wichtige Komponenten des Bähr 805 D [7]	8
Abb. 2.9: Anordnung der Stempel, Probe und Schubstangen des Bähr 805 D [7]	9
Abb. 2.10: Messkammer des Bähr 805 D mit eingebauter Druckplatte [7]	9
Abb. 2.11: Messkammer des Bähr 805 D mit eingebauter Probe [7].....	10
Abb. 2.12: Abmessungen der für den Adapter benötigten Zugproben [9]	10
Abb. 2.13: Übersichtsaufnahme des Bähr 805 T	11
Abb. 2.14: Detailaufnahme des linken Teils der Messkammer des Bähr 805 T	11
Abb. 2.15: Induktiver Wegaufnehmer im Abschreckmodus mit Komponenten für Umbau ...	12
Abb. 2.16: Modifizierter induktiver Wegaufnehmer für Zug-/Druckadapter	13
Abb. 2.17: Eingebaute Probe ohne Spule	13
Abb. 2.18: Eingeschraubte Probe mit Markierung	14
Abb. 2.19: Probe mit Markierungen für das Anschweißen der Thermoelemente	14
Abb. 2.20: Zugprobe vor Einbau	15
Abb. 2.21: Eingeschraubte Zugprobe mit gesicherten Thermoelementen	15
Abb. 2.22: An der Klemmachse fixierte Zugprobe	16
Abb. 2.23: Rechter Teil der Messkammer mit induktivem Wegaufnehmer bei Bähr 805 T ...	16
Abb. 3.1: Fließkurven einiger Metalle bei Raumtemperatur [10]	19
Abb. 3.2: Einfluss auf Fließkurve durch dynamische Erholung und Rekristallisation [11]...	20
Abb. 3.3: Fließkurven von C15 Stahl, umgeformt bei 1373 K mit unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten [10].....	20
Abb. 3.4: Fließkurven von X5CrNiMo1810 bei verschiedenen Umformtemperaturen [12] .	21
Abb. 3.5: Übersichtsaufnahme einer Gleeble 3500 [13]	23
Abb. 3.6: Übersichtsaufnahme einer TMTS Servotest [15]	24
Abb. 3.7: Zylinderstauchprobe nach Rastegaev [10]	26
Abb. 4.1: Gefüge PK9FL Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x.....	27
Abb. 4.2: Kontinuierliches ZTU-Schaubild und Erklärung der Kurzzeichen [22]	28

Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Anordnung der Thermoelemente	29
Abb. 4.4: Eingabefenster für Temperaturprofile	30
Abb. 4.5: Segmentfenster, Segment 5 Zug 800°C.....	31
Abb. 4.6: Segmentfenster, Segment 5 Druck 800°C	32
Abb. 4.7: Temperaturprofile	36
Abb. 4.8: Längenänderung der Probe [μm] vs. Zeit [s]; Zugversuche 800°C	36
Abb. 4.9: Zuggeschnittene Dilatometerprobe.....	37
Abb. 5.1: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Vorversuch 7.....	40
Abb. 5.2: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Vorversuch 10.....	40
Abb. 5.3: Umgeformte Zugprobe des Vorversuchs 10.....	40
Abb. 5.4: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Vorversuch 11.....	41
Abb. 5.5: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Vorversuch 15.....	41
Abb. 5.6: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Versuch 00734.....	42
Abb. 5.7: Längenänderung der Probe [μm] vs. Temperatur [T]; Bereich der Phasenumwandlung in Segment 1 (Versuch 00746).....	43
Abb. 5.8: Längenänderung der Probe [μm] vs. Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]; Bereich der Phasenumwandlung in Segment 7 (Versuch 00746).....	43
Abb. 5.9: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 1 für Versuch 00746	46
Abb. 5.10: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00746	46
Abb. 5.11: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00754	47
Abb. 5.12: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 1 für Versuch 00751	47
Abb. 5.13: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00751	48
Abb. 5.14: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 3 für Versuch 00746	48
Abb. 5.15: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 4 für Versuch 00746	49
Abb. 5.16: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 3 und 4 für Versuch 00751	49
Abb. 5.17: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 3 und 4 für Versuch 00765	50
Abb. 5.18: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00750	51
Abb. 5.19: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00781	51
Abb. 5.20: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00777	52
Abb. 5.21: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00770	52
Abb. 5.22: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 5, 6, 7 und 8 für Versuch 00742	53
Abb. 5.23: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 7 für Versuch 00746	54
Abb. 5.24: Links: Schliff der Proben, die bei 800°C und 850°C umgeformt wurden; Rechts: Schliff der Proben der Umformtemperaturen 900°C und 1000°C	54
Abb. 5.25: Druckproben nach Umformen bei 850°C.....	55
Abb. 5.26: Gefüge Versuch 00746 (Zug; 800°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x	55
Abb. 5.27: Gefüge Versuch 00745 (Zug; 850°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x	56
Abb. 5.28: Gefüge Versuch 00751 (Zug; 900°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x	56

Abb. 5.29: Gefüge Zugversuche (1000°C; 1mm/s; 1000x Vergrößerung) Nitalätzung, a) 00753 b) 00754 c) 00755.....	57
Abb. 5.30: Gefüge Versuch 00782 (Zug; 1000°C; 5mm/s) Klemmätzung; 500x.....	57
Abb. 5.31: Fließkurve; Zugversuche 800°C.....	60
Abb. 5.32: Fließkurve; Zugversuche 850°C.....	60
Abb. 5.33: Fließkurve; Zugversuche 900°C.....	61
Abb. 5.34: Fließkurve; Zugversuche 1000°C.....	61
Abb. 5.35: Fließkurve; zweistufige Umformung 850°C	61
Abb. 5.36: Fließkurve; Druckversuche 800°C	62
Abb. 5.37: Fließkurve; Druckversuche 850°C	62
Abb. 5.38: Fließkurve; Druckversuche 900°C	62
Abb. 5.39: Fließkurve; Zugversuche 800°C mit verschiedenen Umformgeschwindigkeiten..	63
Abb. 5.40: Fließkurve; Zugversuche 850°C mit verschiedenen Umformgeschwindigkeiten..	63
Abb. 5.41: Fließkurve; Zugversuche 900°C mit verschiedenen Umformgeschwindigkeiten..	63
Abb. 5.42: Fließkurve; Zugversuche 1000°C mit verschiedenen Umformgeschwindigkeiten	64
Abb. 5.43: Fließkurve; Zugversuche mit verschiedenen Umformtemperaturen.....	64
Abb. 5.44: Fließkurve; Druckversuche mit verschiedenen Umformtemperaturen	64
Abb. 6.1: Flachprobe mit dazugehörigen Adapter [30].....	71

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 3.1: Übersicht der Grundverfahren für die Fließkurvenaufnahme [10].....	22
Tab. 4.1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs (Masse %) [19]	27
Tab. 4.2: Umformparameter der durchgeführten Versuche.....	32
Tab. 4.3: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche	33
Tab. 5.1: Zusammenfassung der Phasenumwandlungstemperaturen im ersten und letzten Segment des Temperaturprofils.....	44
Tab. 5.2: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 1mm/s	58
Tab. 5.3: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 5mm/s	58
Tab. 5.4: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 10mm/s	59
Tab. 5.5: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und dickster Durchmesser der Probe; Druckversuche 1mm/s.....	59

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole

ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
UZTU	Umform-Zeit-Temperatur-Umwandlung
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierung
HF	Hochfrequenz
F	Kraft
S_0	Ausgangsquerschnitt
S	tatsächlicher Querschnitt
L_0	Ausgangslänge
L_1	Endlänge
k_f	Fließspannung
φ	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	Umformgeschwindigkeit
T_m	Schmelzpunkt
ΔT_u	Temperaturerhöhung in Umformzone
β	Anteil mechanische Energie
W	Umformbarkeit
ρ	Dichte
c	spezifische Wärme
V	Volumen
$t_{8/5}$	Abkühlzeit von 800°C auf 500°C

1 Einleitung und Problemstellung

Die Entwicklung eines neuen Werkstoffkonzeptes und dessen industrielle Erzeugung können sehr kostenintensiv und zeitaufwendig sein. Oft liegt ein langer Weg zwischen der Entwicklung in einem Labor einer Forschungseinrichtung und dem Einsatz in der Industrie oder anderen Anwendungsgebieten. Hinzu kommt das Risiko, dass die Eigenschaften des Materials nicht den Anforderungen entsprechen könnten. Um die Werkstoffentwicklung gerade in der heutigen Zeit voranzutreiben und zu optimieren, zeigt sich immer mehr die Notwendigkeit, reale industrielle Prozesse so genau wie möglich im Labormaßstab zu simulieren. So ist die Simulationstechnik unstrittig zu einem unentbehrlichen und leistungsstarken Werkzeug geworden. Die Verringerung von Entwicklungs- und Produktionskosten sowie die Beschleunigung von Entwicklungsabläufen sind treibende Kräfte für den Einsatz von Simulationswerkzeugen [1].

Der voestalpine Stahl Donawitz steht neben dem Standard Abschreck- und Umformdilatometer Bähr 805 A/D ein Zug-/Druckadapter zur Verfügung. Durch die Verwendung dieses Adapters ist es einerseits möglich reale Prozesse im Labormaßstab zu simulieren, andererseits bietet der Adapter die Möglichkeit zur Messung von Fließkurven und der Erstellung von Umform-Zeit-Temperatur-Umwandlungs (UZTU) Schaubildern. Die Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten macht daher den Zug-/Druckadapter zu einem interessanten Werkzeug. Durch die Probengeometrie ergibt sich z.B. die Möglichkeit nach einer durchlaufenen Prozesssimulation, wie der thermomechanischen Behandlung eines mikrolegierten Stahls, die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes bei Raumtemperatur durch einen herkömmlichen Zugversuch an diesen Proben zu bestimmen.

Das angestrebte Ziel der Diplomarbeit besteht darin, die Anwendungsmöglichkeiten für den Zug-/Druckadapter aufzuzeigen und zu beurteilen. Die ausgewerteten Daten der durchgeführten Versuchsreihen, mit vorgegebenen Zeit-Temperatur-Umformprofilen, dienen zur Beurteilung und Einschätzung der Reproduzierbarkeit der Versuche. Weiters soll auf das Gerät selbst und eventuelle Besonderheiten bei der Probenvorbereitung und deren anschließenden Einbau eingegangen werden. Alle Einflussmöglichkeiten, die beim Umgang mit dem Gerät auftreten und zu falschen Ergebnissen führen können, müssen kritisch betrachtet und bewertet werden.

2 Dilatometrie

Unter Dilatometrie versteht man die Messung der Längenänderung, hervorgerufen durch eine thermische Behandlung der Probe. Das Auftreten von Phasenumwandlungen lässt sich durch Auftragen der Volumen- bzw. Längenänderung der Probe über die Temperatur erkennen. Bei Phasenumwandlungen 1. Ordnung tritt ein Sprung in der Kurve auf (Volumensprung), wohingegen bei Phasenumwandlungen 2. Ordnung nur ein Knick (Änderung der Steigung) beobachtet werden kann [2].

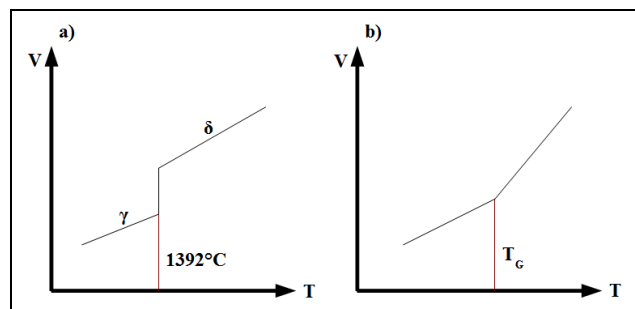


Abb. 2.1: Beispiele für Kurvenverläufe bei Phasenumwandlungen

Ein Beispiel für einen Volumensprung ist die Gitterumwandlung von reinem Eisen bei 1392°C, wie Abbildung 2.1 a) dargestellt. Der kubisch flächenzentrierte Austenit wandelt sich bei dieser Temperatur in den kubisch raumzentrierten δ -Ferrit um. Der Verlauf der Kurve in Abbildung 2.1 b) entspricht dem eines Glaswerkstoffs. Beim Erreichen der Glasübergangstemperatur T_G ändert sich der thermische Ausdehnungskoeffizient, was mit einer Änderung der Steigung in der $V(T)$ Darstellung einhergeht.

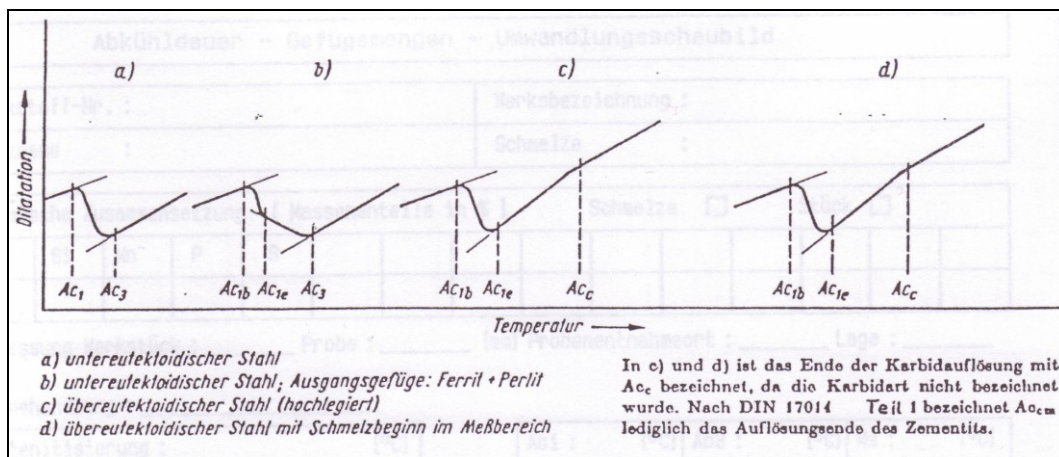


Abb. 2.2: Dilatometerkurven unterschiedlicher Stähle [3]

Abbildung 2.2 zeigt wiederum Dilatometerkurven für verschiedene Stähle mit deren Hilfe Umwandlungstemperaturen für die Erstellung von ZTU-Schaubildern bestimmt werden

können. Das erste Abweichen der Längenänderungs-Temperaturkurve von einer Geraden kennzeichnet den Beginn eines Umwandlungsbereiches. Läuft die Kurve wieder in eine Gerade ein, ist die Umwandlung in diesem Bereich beendet. In Abbildung 2.2 a) startet die Bildung von Austenit demnach bei der Temperatur Ac_1 und endet bei Ac_3 .

Erfolgt unmittelbar nacheinander die Bildung von unterschiedlichen Gefügebestandteilen, so ist der Wendepunkt der Kurve als Grenze zwischen den Umwandlungsbereichen anzusehen, siehe auch Abbildung 2.4. Anzumerken ist hier, dass ein Werkstoff einen umwandlungsfreien Bereich zwischen einzelnen Umwandlungsbereichen aufweisen kann, wenn die Längenänderungs-Temperaturkurve über einen Bereich von mindestens 50K eine Gerade bildet. Die Temperatur Ac_{1b} in Abbildung 2.2 b) kennzeichnet den Übergang in das Dreiphasengebiet mit Ferrit, Perlit und Austenit. Läuft die Kurve in weiterer Folge wieder in eine Gerade ein, ist die Umwandlung des Perlits abgeschlossen. Bei dieser Temperatur, Ac_{1e} , erfolgt somit der Übergang in das Zweiphasengebiet Austenit und Ferrit bzw. bei weiterer Erhöhung der Temperatur die vollständige Umwandlung des Ferrits in Austenit. Über der Temperatur Ac_3 liegt nur mehr Austenit als einziger Gefügebestandteil vor [4].

2.1 Aufbau und Auswertung im Allgemeinen

In der Regel wird die Dilatometerprobe in einem kleinen Ofen oder durch einen Induktor erhitzt. Die eigentliche Längenänderung der Probe während des Versuchs wird über Schubstangen an ein Längenmesssystem übertragen. Je nach Temperaturbereich verwendet man unterschiedliche Materialien für diese Schubstangen. Bis 1100°C wird Quarz und für Temperaturen bis 1500°C Al_2O_3 eingesetzt [2].

Es gibt verschiedene Messsysteme, die für die Messung der Längenänderung verwendet werden können. Das gängigste System ist ein induktiver Wegaufnehmer (LVDT), dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei miteinander verbundenen Spulen und basiert auf der physikalischen Tatsache, dass sich die Induktivität einer Spule ändert, wenn die magnetische Permeabilität in der Spule variiert. Da diese Spulen dicht in einem Metallzylinder eingegossen sind, können Einflüsse durch Vibration vermieden werden. Die Längsachse des Metallzylinders und die Bewegungsrichtung der Dilatometerprobe müssen parallel zueinander verlaufen. Durch den Zylinder wird ein Stößel mit einem beweglich gelagerten Kern geführt. Es besteht aber auch die Möglichkeit eines beweglichen Metallzylinders und eines feststehenden Stößels. Durch die Bewegung der Schubstangen, hervorgerufen durch die Längenänderung der Probe, kommt es nun zu einer Induktivitätsänderung, welche durch eine elektronische Schaltung registriert und beispielsweise in ein Spannungssignal umgewandelt werden kann. Der Kern und der Metallzylinder bestehen aus einem Material mit großer magnetischer Permeabilität, dies ermöglicht große Induktivitätsänderungen schon bei sehr geringen Auslenkungen [5].

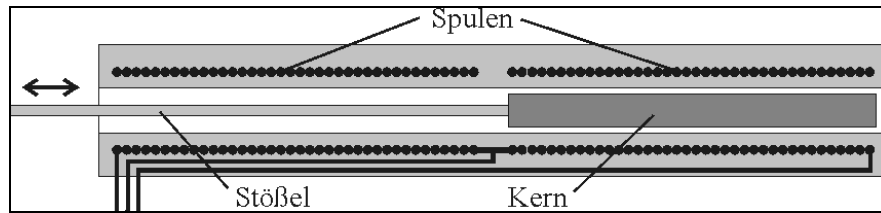


Abb. 2.3: Prinzip eines induktiven Wegaufnehmers [5]

Folgende Anforderungen werden an ein Messsystem gestellt:

- Leichtes Auswechseln der Proben ohne aufwendige Justierung des Längenmesssystems.
- Es muss gewährleistet sein, dass sich die Probe ungehindert ausdehnen kann (es gilt minimale Reibungskräfte von Probe und mechanischen Übertragungssystem zu überwinden).
- Die Rückstellkräfte des Messsystems müssen klein gegenüber den elastischen Kräften der Probe sein. Dies wird in den meisten Systemen durch kleine Federn realisiert.
- Die Probe muss sich während des Versuchs über ihre ganze Länge auf konstanter Temperatur befinden, hierzu muss der Temperaturmessung besondere Sorgfalt gewidmet werden. Als Temperaturfühler werden wegen ihrer geringen Ausdehnung fast ausschließlich Thermoelemente verwendet, für tiefe Temperaturen Cu/Cu-Ni und für höhere Temperaturen Pt/Rh(10)-Pt. Die Sicherstellung eines guten Kontaktes zwischen Thermoelement und Probe sowie die regelmäßige Überprüfung und Kalibrierung dieser ist unerlässlich [2].

Vorrangig werden Dilatometer für die Erstellung von ZTU-Schaubildern verwendet, die vor allem bei der Wärmebehandlung von Stählen eine wichtige Rolle spielen. Die Auftragung der Dilatation über der Temperatur ermöglicht einerseits die Bestimmung von Beginn und Ende einer Phasenumwandlung und andererseits eine schnelle quantitative Auswertung der auftretenden Phasenanteile. Die Gefügebeurteilung sollte aber zusätzlich auch über metallografische Schliffe abgesichert werden.

Für den Fall einer kontinuierlichen Abkühlung werden an die umwandlungsfreien Bereiche der Dilatometerkurven Tangenten gelegt. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.4 dargestellt, hier erfolgt beim Abkühlen die Umwandlung der Phase γ in die beiden Phasen α und β . Die Phasenumwandlung beginnt wie eingangs erklärt beim ersten Abweichen der Längenänderungs-Temperaturkurve von einer Geraden (1) und ist schließlich beim erneuten Einlaufen in eine Gerade beendet (2). Unter der Voraussetzung einer Trennung der Bildungsbereiche der Phasen α und β durch den Wendepunkt (W) der Kurve werden die beiden Strecken u und v , wie in Abbildung 2.4 dargestellt, ermittelt.

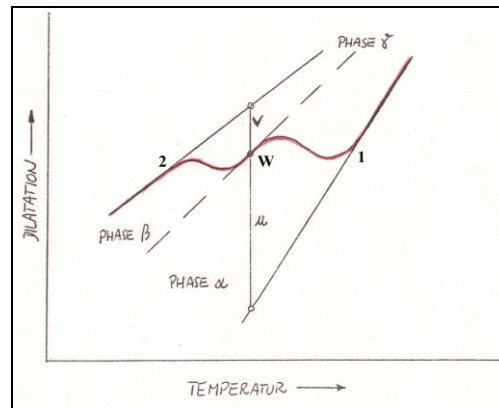


Abb. 2.4: Dilatometerkurve mit angelegten Tangenten zur Bestimmung der Gefügeanteile [6]

Die aus der Phase γ entstehenden Gefügeanteile der Phasen α und β können damit mittels Gleichung 2.1 berechnet werden.

$$\frac{X_D}{Y_D} = \frac{u}{v}, \quad (2.1)$$

wobei X_D bzw. Y_D die dilatometrisch bestimmten Gefügeanteile der Phasen α und β sind. Unter Verwendung der Randbedingung $X_D + Y_D = 1$ kann die obige Gleichung umgeformt und somit der Gefügeanteil der Phase β nach Gleichung 2.2 berechnet werden [6].

$$\frac{u}{v} = \frac{1 - Y_D}{Y_D} \quad (2.2)$$

2.2 Aufbau und Anwendung des Bähr 805 A/D/T

Das für die Diplomarbeit verwendete Dilatometer ist ein Gerät der Firma Bähr Thermoanalyse GmbH. Das Dilatometer vom Typ 805 A/D ist ein Abschreck- und Deformationsdilatometer. Es kann zur Bestimmung von Phasen- und Gefügeumwandlungen verwendet werden. Die aus den Versuchen ermittelten Messwerte können in weiterer Folge für die Bestimmung von ZTU-, Umform-ZTU und Zeit-Temperatur-Austenitisierungsschaubildern oder aber auch für die Erstellung von Fließkurven verwendet werden. Es besteht auch die Möglichkeit Tieftemperaturversuche (bis -160°C) durchzuführen sowie einen speziellen Alpha-Messkopf für hochgenaue Ausdehnungsmessungen einzusetzen. Die Daten solcher Messungen dienen zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten [7].

Hohe Aufheizgeschwindigkeiten von bis zu 4000K/s und Abkühlgeschwindigkeiten von 2500K/s sowie Umformgeschwindigkeiten von $0,01$ bis 125mm/s sind wesentliche Merkmale. Die gesamte Elektronik arbeitet digital und mit eigenen Prozessorsystemen zur Steuerung und Regelung des HF Generators, Hydrauliksystems, Messdatenerfassung, Gasversorgung, Vakuumeinheit und Sicherheitseinrichtungen.



Abb. 2.5: Gesamtansicht des Bähr 805

Da Dilatometerversuche zumeist unter Vakuum durchgeführt werden, sind weitere wichtige Elemente die meist am Boden positionierte Vorpumpe, siehe Abbildung 2.5, die ihrerseits mit einer Turbomolekularpumpe verbunden ist. Die Turbomolekularpumpe selbst und das darauf sitzende Eckventil sind seitlich an die Messkammer angeflanscht. Die Probengeometrie für Abschreckversuche ist zylindrisch, meist mit einem Durchmesser $d=4\text{mm}$ und einer Länge $l=10\text{mm}$. Für Versuche mit dem Umformmodul werden Proben mit einem Durchmesser von 5mm eingesetzt [7].

Es besteht die Möglichkeit, drei Thermoelemente gleichzeitig zu verwenden, wobei der oberste der drei hintereinander angeordneten Steckplätze für das Thermoelement, welches die Regelung des Temperaturprogramms übernimmt, benutzt wird. Durch Verwendung von zusätzlichen Thermoelementen können bspw. Temperaturgradienten über die Probengeometrie ermittelt werden.

Der Induktor besteht aus zwei Spulen. Darin wird die Probe erhitzt und wenn erforderlich mit Gas abgeschreckt. Das verwendete Gas strömt durch kleine Bohrungen an der Innenseite der inneren Spule auf die Probe, das erlaubt die Realisierung hoher Abkühlgeschwindigkeiten. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der Verwendung unterschiedlicher Ventile, die je nach erforderlicher Abkühlleistung verwendet werden können. Es kann auch während einer Messung zwischen den Ventilen umgeschaltet werden.

2.2.1 Anwendung der Abschreckeinheit (Bähr 805 A)

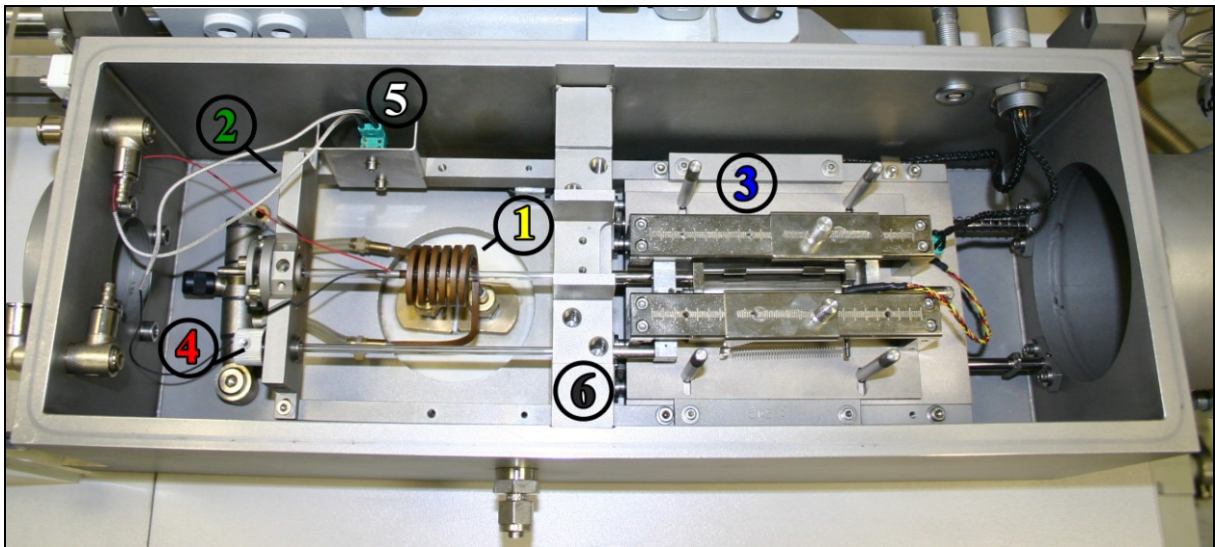


Abb. 2.6: Messkammer mit den unterschiedlichen Komponenten des Bähr 805 A

In Abbildung 2.6 ist die Messkammer eines Bähr 805 A dargestellt. Die Probe befindet sich während des Versuchs zwischen den beiden hinteren Schubstangen. Die hintere linke kurze Schubstange, der so genannte Gegenhalter, ist in einer Quertraverse (2) befestigt, während die hintere rechte Schubstange im induktiven Wegaufnehmer (3) festgeschraubt ist. Mit Hilfe der Mikrometerschraube (4) und der einer dritten vorderen langen Schubstange, wird vor Versuchsbeginn die Differenz der Messlängen auf Null kalibriert. Die Anschlüsse für die Thermoelemente (5) befinden sich hinter einer kleinen Abschirmung.

Der induktive Wegaufnehmer selbst ist auf einem mit Federn versehenen Schlitten fest angeschraubt. Für den Probeneinbau ist es daher nur erforderlich den Schlitten nach links fahren zu lassen, die Probe mit angeschweißtem Thermoelement vorsichtig zwischen den beiden für die Probenhalterung verwendeten Schubstangen zu positionieren und mit Hilfe der Mikrometerschraube und der Anzeige am Bedienpult die Messlänge abzugleichen. Schließlich kann der Schlitten wieder langsam bis zum Anschlag nach rechts gefahren und fixiert werden. In dieser Schlittenposition ist die Dilatometerprobe im Induktor (1 in Abbildung 2.6) zentriert. Schlussendlich wird das Thermoelement eingesteckt, der Deckel geschlossen und der Versuch kann gestartet werden.

2.2.2 Anwendung des Umformmoduls (Bähr 805 D)

Beim Umformdilatometer wird eine Probe bei einer beliebigen Temperatur mit unterschiedlichsten Umformprogrammen, z.B. linear, mehrstufig, mit einer konstanten Umformrate oder aber auch mit konstanter Kraft, gestaucht.

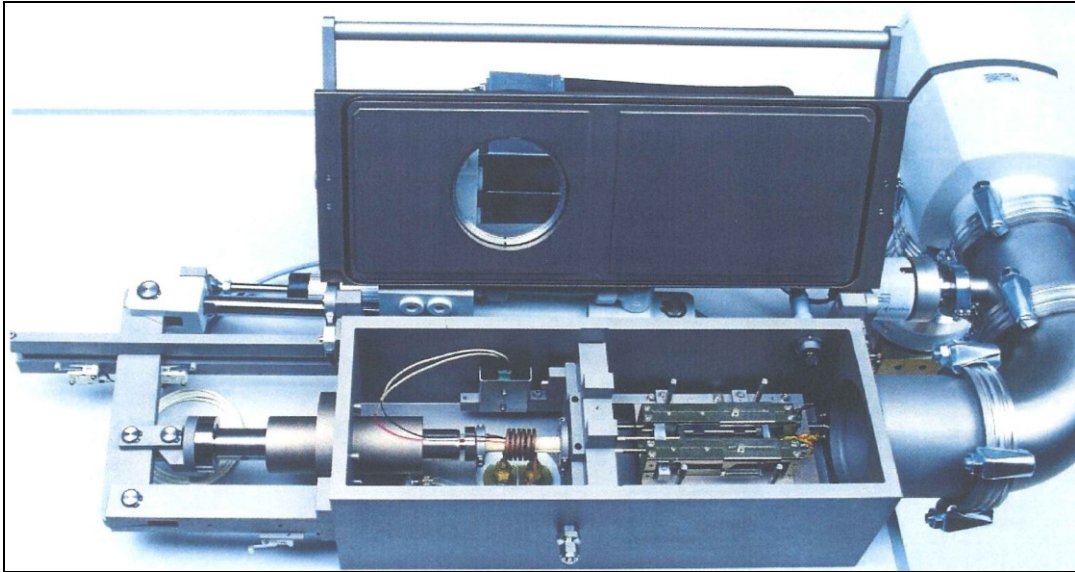


Abb. 2.7: Übersichtsaufnahme des Bähr 805 D [7]

Die Bestimmung der Phasenumwandlungen während der nachfolgenden gezielten Abkühlung ermöglicht dann die Erstellung eines Umform-ZTU-Schaubildes. Es besteht außerdem die Möglichkeit Kriech- bzw. Relaxationsvorgänge zu untersuchen. Abbildung 2.7 zeigt eine Übersichtsaufnahme des Bähr 805 D [8].

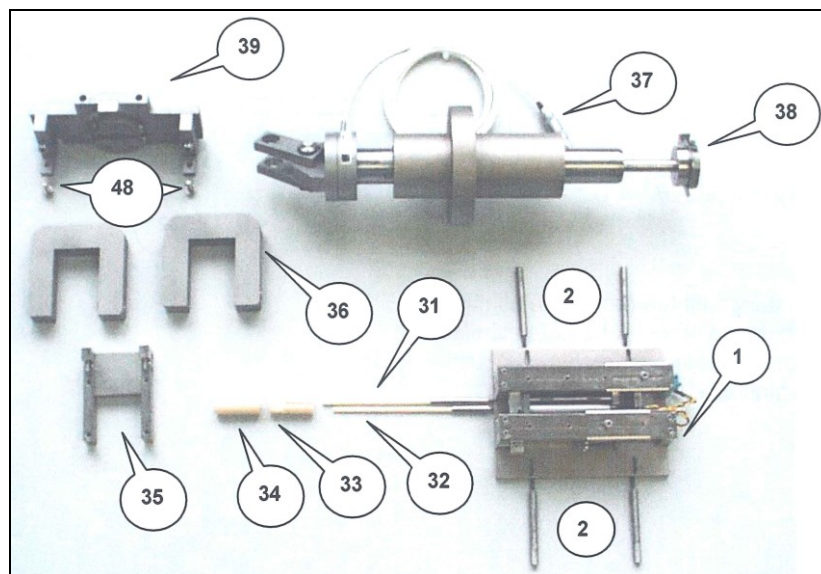


Abb. 2.8: Wichtige Komponenten des Bähr 805 D [7]

In Abbildung 2.8 sind wichtige Komponenten für die Anwendung des Umformdilatometers dargestellt. Die hintere lange (31) und die vordere kurze Schubstange (32) werden wie im Abschreckmodus am induktiven Wegaufnehmer (1) festgeschraubt. Die Probe befindet sich zwischen dem rechten (33) und dem linken Deformationsstempel (34) [7]. Die dazugehörige Anordnung ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

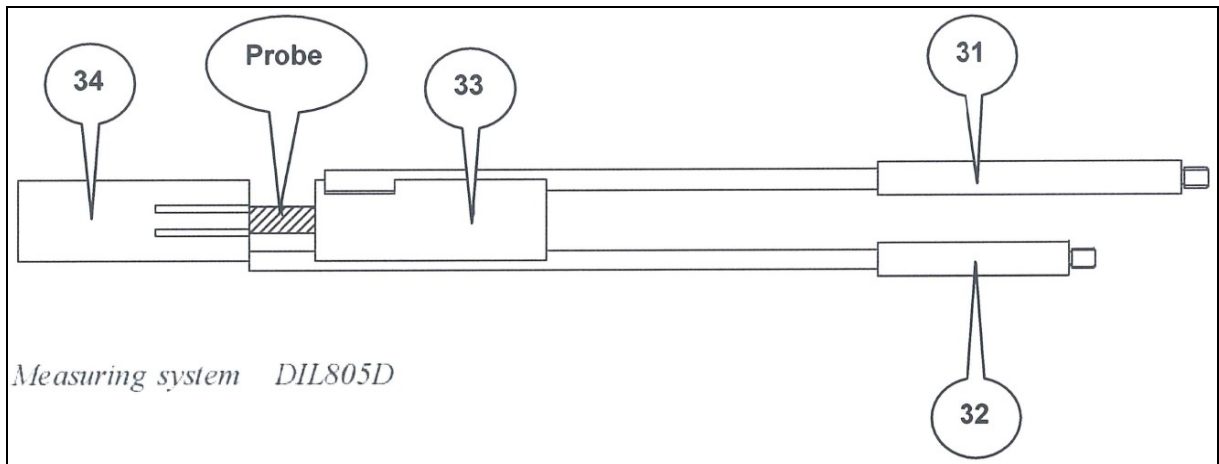


Abb. 2.9: Anordnung der Stempel, Probe und Schubstangen des Bähr 805 D [7]

Weitere Komponenten in Abbildung 2.8 sind eine Montagehilfe zum Einbau der Probe (35) und zwei Klemmbacken (36). Um ein Federn des Schlittens während des Versuches zu verhindern werden diese beiden Klemmbacken nach dem Probeneinbau auf die Trennwand gehängt und festgeschraubt. Zusätzlich ist die Deformationseinheit selbst (37) mit dem darauf sitzenden Stempelhalter (38) sowie der Druckplatte (39) dargestellt [7]. Abbildung 2.10 zeigt die Messkammer mit der angeschraubten Deformationseinheit und Druckplatte.

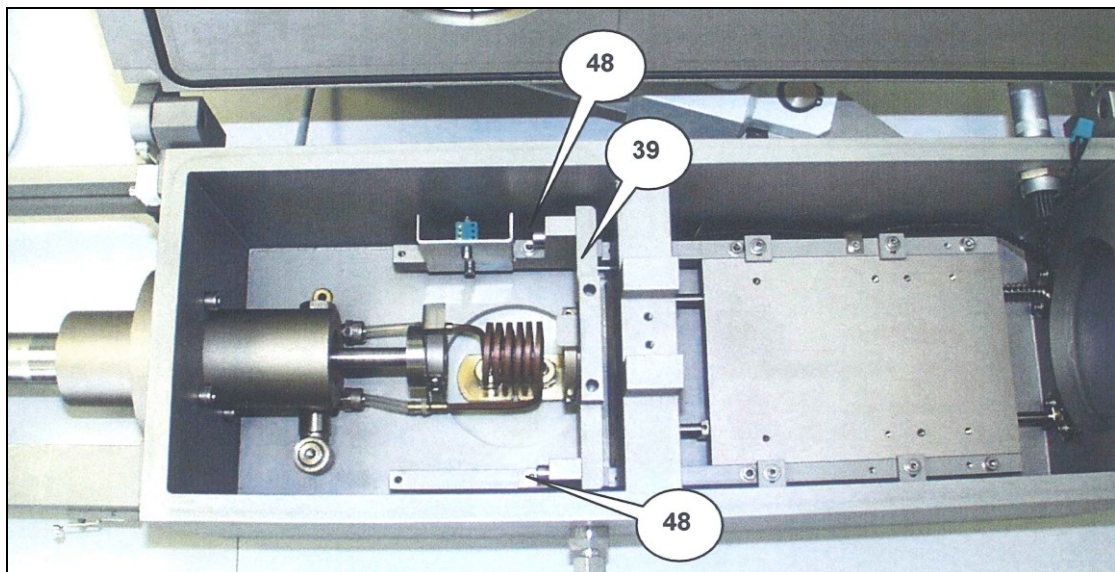


Abb. 2.10: Messkammer des Bähr 805 D mit eingebauter Druckplatte [7]

Abbildung 2.11 zeigt die Messkammer mit einer eingebauten Probe. Diese befindet sich zwischen den Stempeln innerhalb des Induktors.

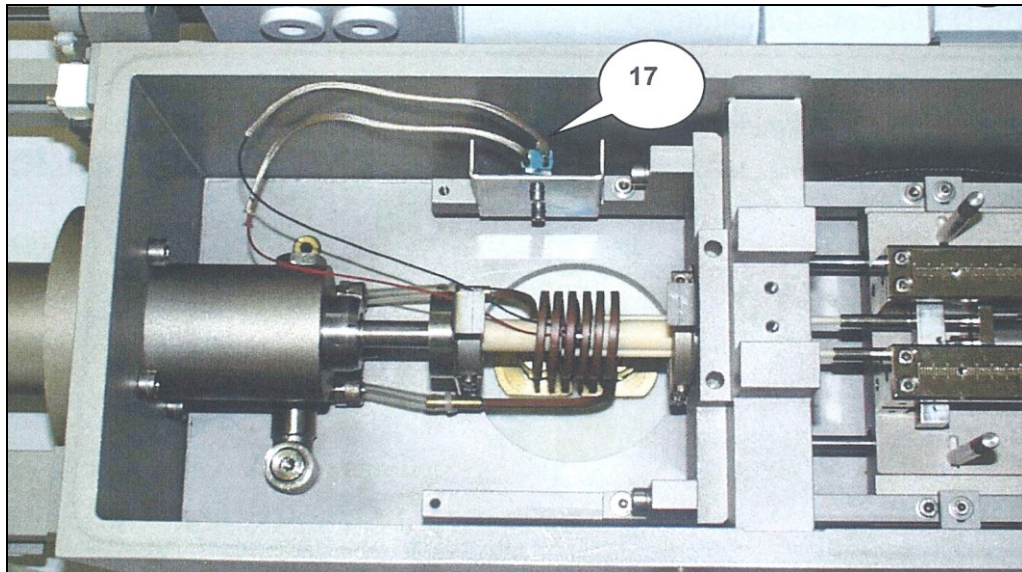


Abb. 2.11: Messkammer des Bähr 805 D mit eingebauter Probe [7]

2.2.3 Anwendung des Zug-/Druckadapters (Bähr 805 T)

Die Verwendung eines Zug-/Druckadapters ermöglicht die Ausführung von Versuchen mit Wechsellast. Während des Heiz- bzw. Kühlvorgangs kann sich die Probe frei ausdehnen. Für die Durchführung solcher Versuche wird eine besondere Probengeometrie benötigt, die in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Es kann eine Zug- und Druckkraft von bis zu 8kN aufgebracht werden. Die Umformgeschwindigkeit beträgt max. 20mm/s und die Probe kann max. ± 5 mm verformt werden. Die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit kann max. 100K/s betragen.

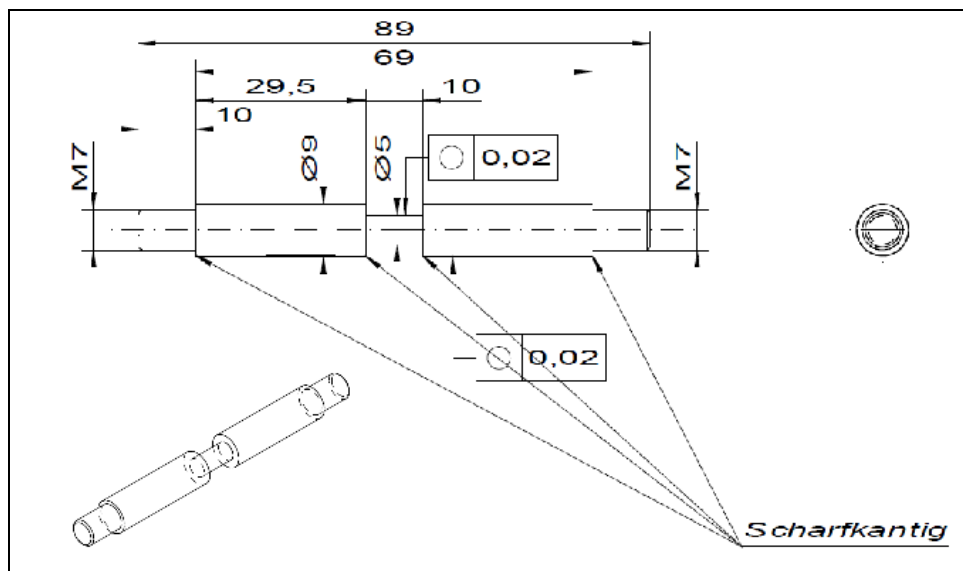


Abb. 2.12: Abmessungen der für den Adapter benötigten Zugproben [9]

In Abbildung 2.13 ist das Dilatometer mit angeschlossenem Zug-/Druckadapter dargestellt. Die Adaptereinheit (1) selbst ist auf Rollen gelagert und kann dadurch leicht in die benötigte Position gebracht werden. Wenn der Adapter nicht benötigt wird, befindet er sich in einer

gesicherten Parkposition. Eine Detailaufnahme des linken Teils der Messkammer (2) zeigt Abbildung 2.14.

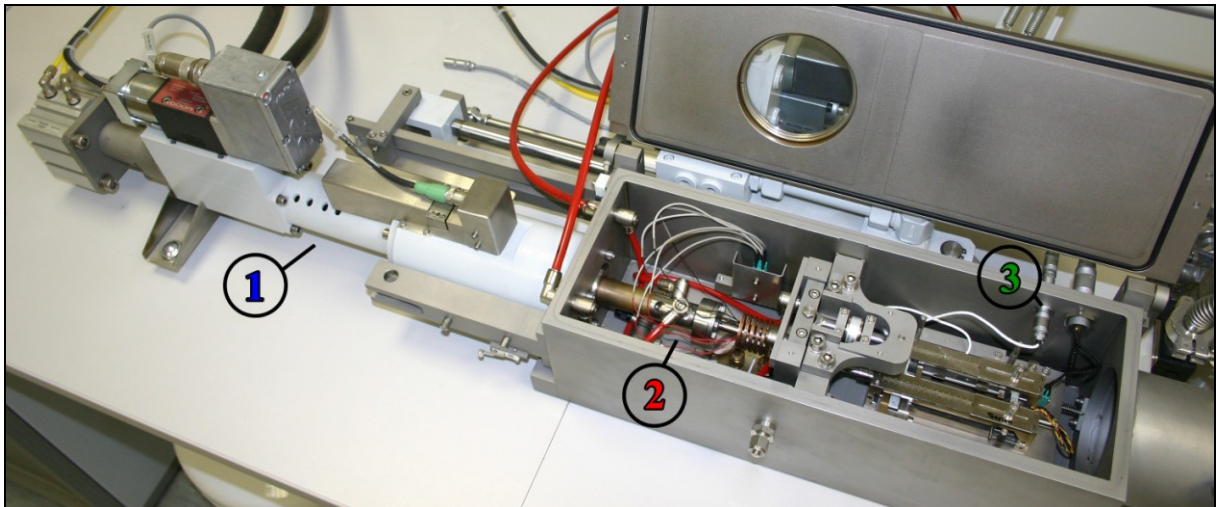


Abb. 2.13: Übersichtsaufnahme des Bähr 805 T

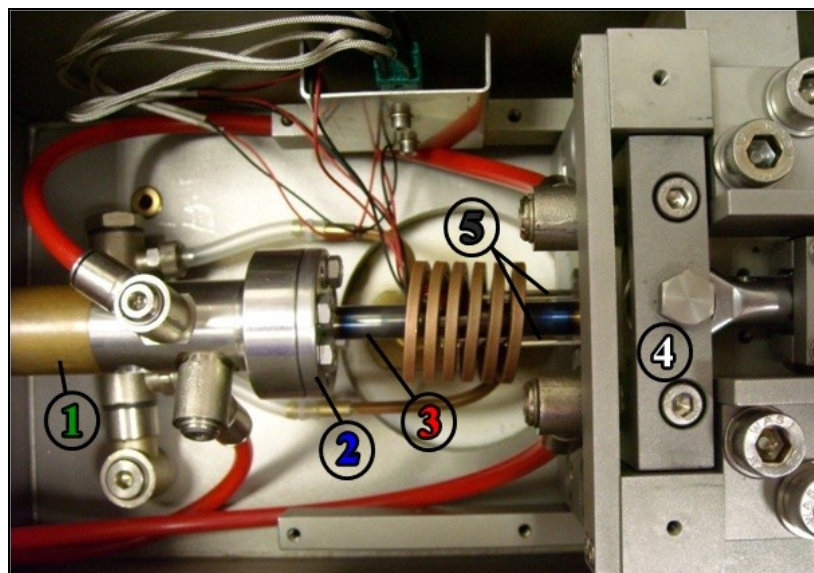


Abb. 2.14: Detailaufnahme des linken Teils der Messkammer des Bähr 805 T

In Abbildung 2.14 kann man die Klemmachse des Adapters (1) mit festgeschraubter Probenaufnahme (2), in der auch die Zugprobe (3) eingeschraubt ist, erkennen. Die Klemmachse kann vollständig aus dem Adapter gezogen werden, wodurch der Anbau des Adapters an die Messkammer erst ermöglicht wird. Auf der rechten Seite ist die Zugprobe in die Kraftmesseinrichtung (4) eingeschraubt, siehe auch Abbildung 2.17. Die Kraftmesseinrichtung selbst ist auf der Trennwand (6 in Abbildung 2.6) befestigt. Der dazugehörige Anschluss befindet sich im rechten Teil der Messkammer (3 in Abb. 2.13).

Die roten Schläuche in Abbildung 2.14 bilden den Kühlkreislauf, die Kühlung erfolgt mit Wasser. Außerhalb der Kammer befinden sich die Anschlüsse für Zu- und Abfluss. In der

Kammer läuft das Wasser zuerst zur Kraftmeseinrichtung, von dort zur Klemmachse und dann wieder aus der Kammer hinaus. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Kühlung der für die Probenfixierung verantwortlichen Elemente.

Abbildung 2.14 zeigt ebenfalls die direkt an der Probe platzierten Schubstangen (5) zur Messung der Längenänderung. Beide Schubstangen werden für Versuche mit dem Zug-/Druckadapter am modifizierten induktiven Wegaufnehmer fixiert.

In Abbildung 2.15 sind der induktive Wegaufnehmer für den Abschreckmodus (5) und die einzelnen Komponenten dargestellt. Die Modifizierung beinhaltet einen Austausch der Federn (3), einen Wechsel des vorderen Halteblechs (4) und den Einbau einer Führungsleiste (2), auf der die Aufnahmehülsen (1) für die Schubstangen angeschraubt werden. Der im Abschreckmodus verwendete Wegaufnehmer ist so eingestellt, dass die Rückstellkraft der Schubstange für die Längenänderungsmessung der Probe und die Rückstellkraft der Schubstange für den Abgleich der Messlänge in die gleiche Richtung zeigen.

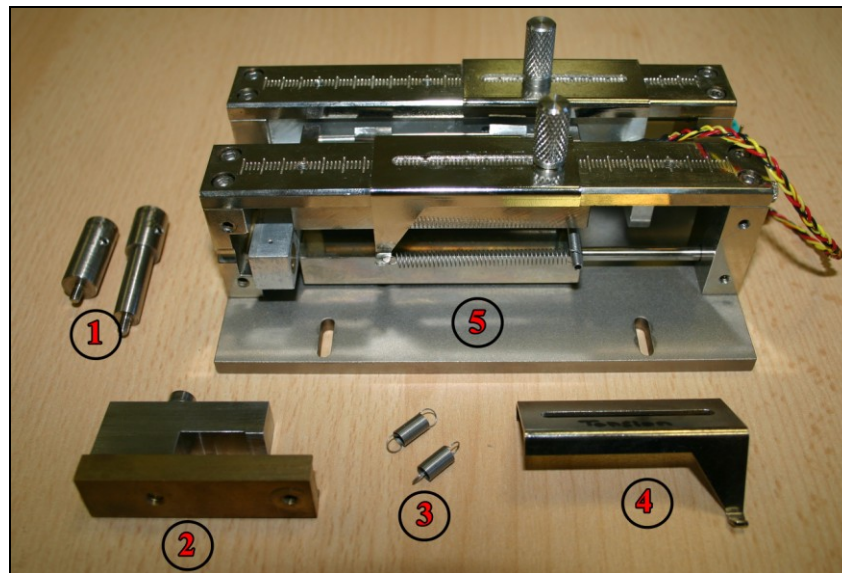


Abb. 2.15: Induktiver Wegaufnehmer im Abschreckmodus mit Komponenten für Umbau

Abbildung 2.16 zeigt den umgebauten Wegaufnehmer. Durch den Wechsel des vorderen Halteblechs wird die Richtung der Rückstellkraft der hinteren Schubstange umgekehrt. Nur durch diese Modifizierung ist die Längenänderungsmessung der Zugproben überhaupt möglich.

Je nach Position der Haltebleche auf der Führungsleiste des induktiven Wegaufnehmers ist die Vorspannung der Federn höher oder niedriger. Die Federn haben einen größeren Außendurchmesser und eine höhere Drahtstärke als jene, die bei Abschreckversuchen verwendet werden, das entspricht einer höheren Federkonstante und damit einer höheren Federkraft. Dieser Wechsel ist notwendig, da bei Abschreckversuchen keine Umformung

erfolgt. Die Umformversuche verlangen eine höhere Federkraft, dies gilt sowohl für den Zug-/Druckadapter als auch für das Standard Umformdilatometer.

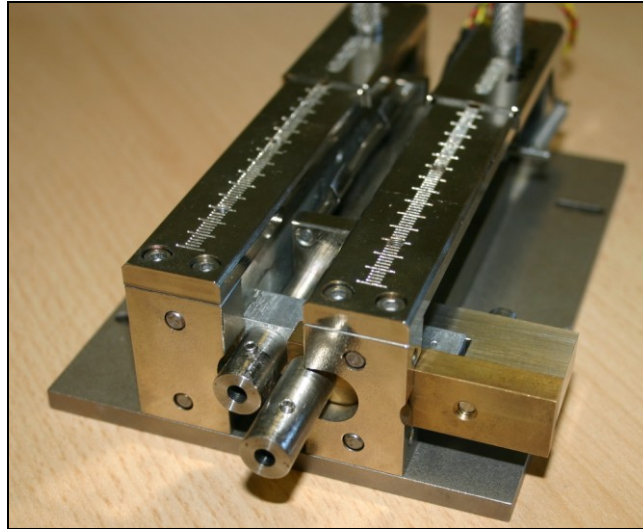


Abb. 2.16: Modifizierter induktiver Wegaufnehmer für Zug-/Druckadapter

Die verwendeten Schubstangen besitzen beide die gleiche Länge und eine Freinehmung im mittleren Bereich. Abbildung 2.17 zeigt eine in die Kraftmesseinrichtung eingeschraubte Probe mit den in Position gebrachten Schubstangen (Al_2O_3), jedoch ohne eingebaute Spule.

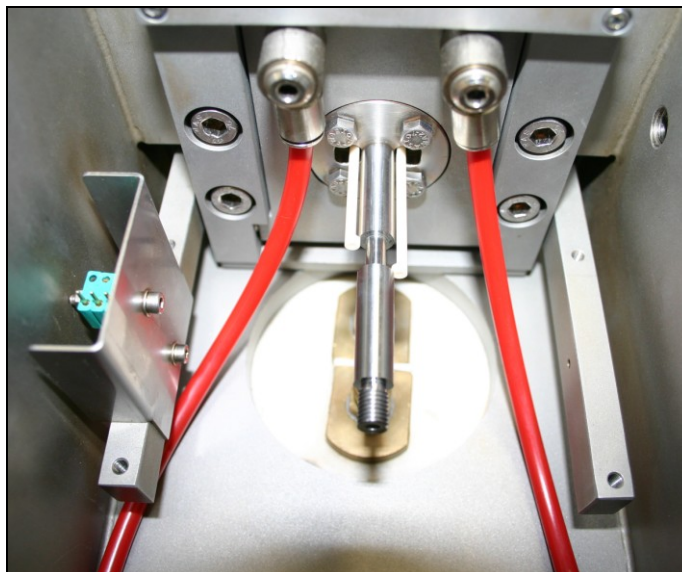


Abb. 2.17: Eingebaute Probe ohne Spule

Beim Probeneinbau wird die Zugprobe zuerst in der linken Messkammer in die Kraftmesseinrichtung eingeschraubt. In dieser Position wird sie im rechten Winkel zum Boden der Messkammer am aus der Spule ragenden dickeren Querschnitt markiert und anschließend wieder ausgeschraubt. Abbildung 2.18 zeigt die eingeschraubte Probe mit Markierung.

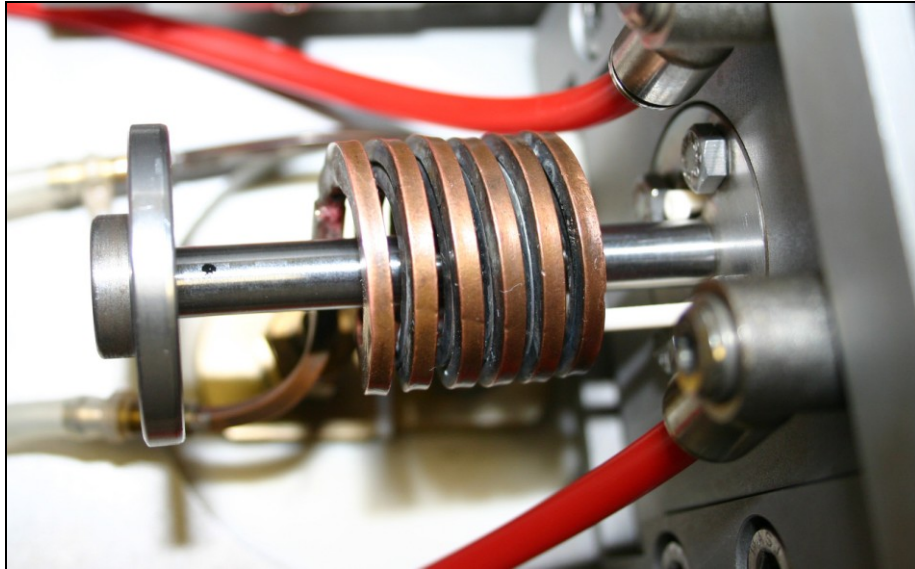


Abb. 2.18: Eingeschraubte Probe mit Markierung

Anschließend erfolgt die Markierung der Position der Thermoelemente am Prüfquerschnitt. In Abbildung 2.19 ist eine markierte Probe dargestellt. Gut zu sehen ist, dass die Markierungen für die Thermoelemente in einer Ebene mit der Markierung am dicken Querschnitt liegen. Nur so ist gewährleistet, dass es bei der Justierung der Schubstangen zu keinen Problemen bezüglich der Lage der angeschweißten Thermoelementdrähte kommt.

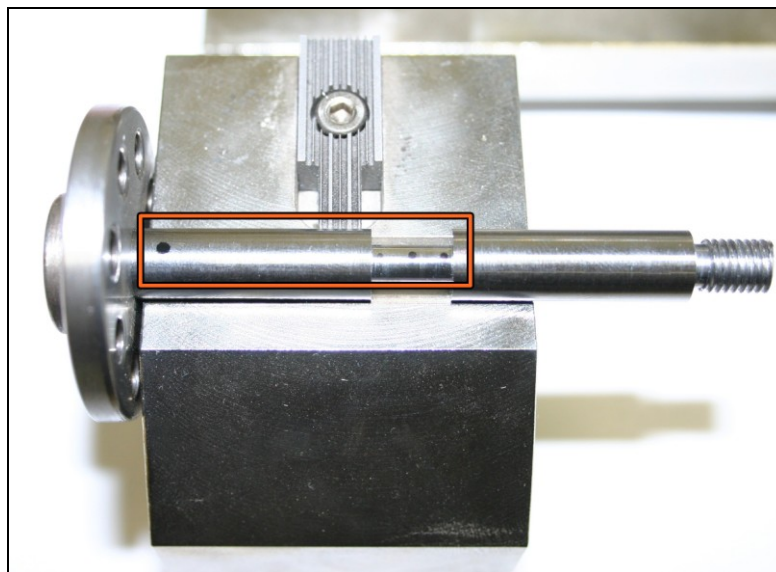


Abb. 2.19: Probe mit Markierungen für das Anschweißen der Thermoelemente

Der Einbau der Zugprobe mit angeschweißten Thermoelementen wird erleichtert, wenn die Thermoelementdrähte mit einem Klebstreifen, wie in Abbildung 2.20 dargestellt, fixiert werden.

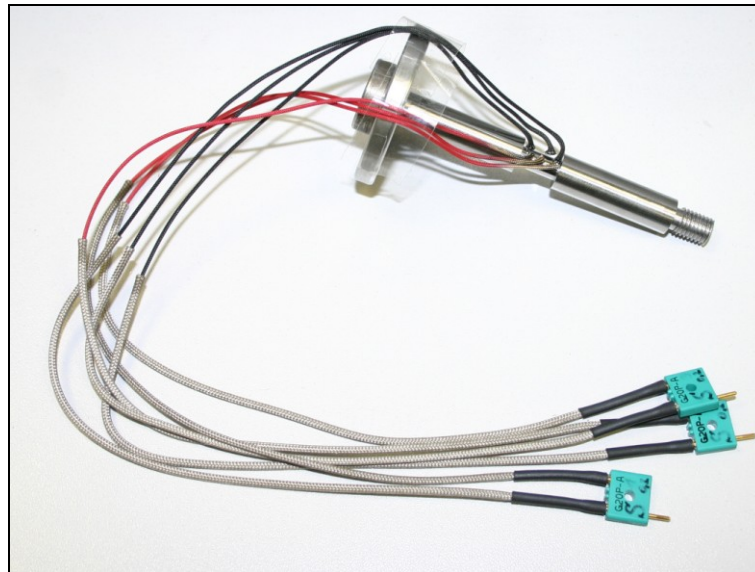


Abb. 2.20: Zugprobe vor Einbau

Zu Beginn des Probeneinbaus befindet sich der induktive Wegaufnehmer weiter rechts auf dem Schlitten, in dieser Position sind die Schubstangen geschützt. Ist die Zugprobe in der Kraftmesseinrichtung eingeschraubt, kann mit einer Pinzette der Klebstreifen entfernt und die Thermoelementdrähte, wie in Abbildung 2.21 dargestellt, nach rechts über die Kraftmesseinrichtung gelegt werden.

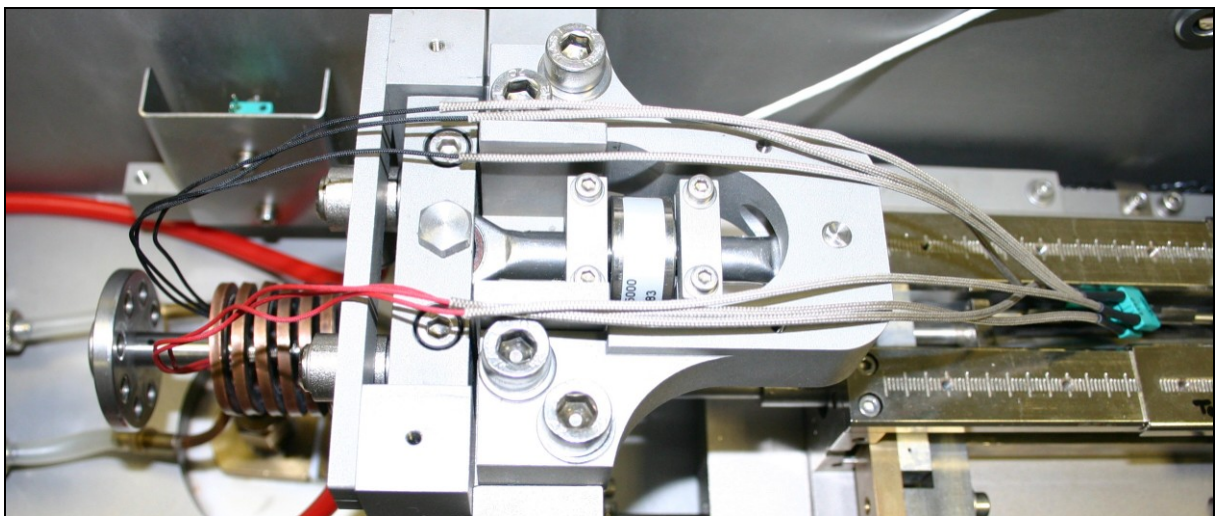


Abb. 2.21: Eingeschraubte Zugprobe mit gesicherten Thermoelementen

Nun erfolgt die Fixierung an der Klemmachse. Zuerst werden die vier dazu benötigten Schrauben angesetzt und leicht angezogen. Am Bedienpult wird daraufhin die Klemmung aktiviert und die Schrauben fest angezogen. Es ist unbedingt notwendig, die Klemmung anschließend wieder zu deaktivieren. Die zuvor nach rechts gelegten Thermoelemente können nun eingesteckt werden. Abbildung 2.22 zeigt die fixierte Zugprobe.

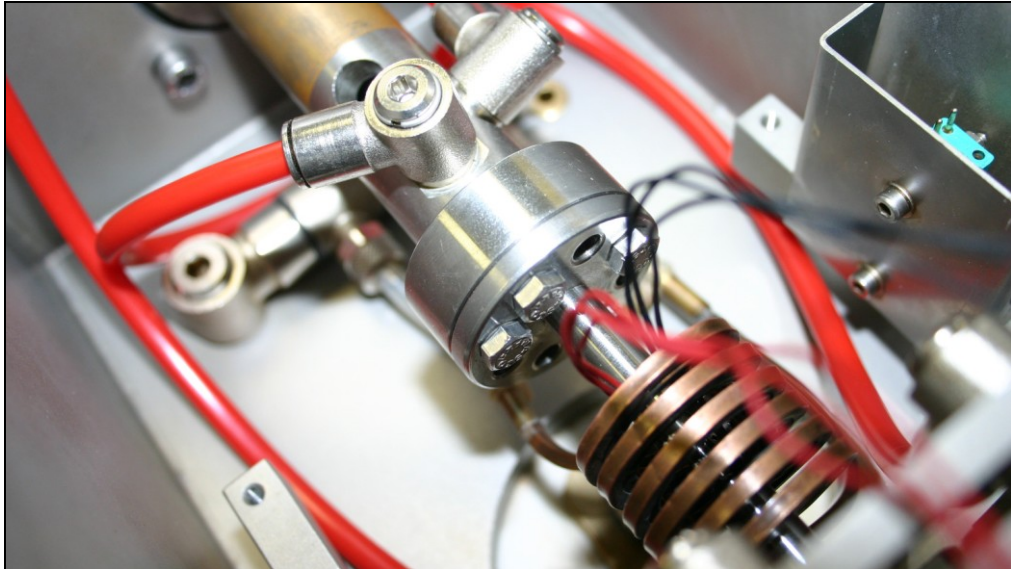


Abb. 2.22: An der Klemmachse fixierte Zugprobe

Der Schlitten im rechten Teil der Messkammer befindet sich bei der Verwendung des Adapters in einer festgelegten Position, diese wird mittels eines genormten Distanzbleches gefunden. Im Gegensatz zum Abschreckmodus wird der induktive Wegaufnehmer an einer anderen Stelle am Schlitten fixiert, auch hier wird zur Positionierung ein Distanzblech (1 in Abbildung 2.23) benötigt. Ist der induktive Wegaufnehmer an der für ihn vorgesehenen Position fest geschraubt, ist automatisch auch die hintere Schubstange in der richtigen Stellung für die Längenänderungsmessung. Die korrekte Position der vorderen Schubstange ist mit Hilfe der verstellbaren Führungsleiste am induktiven Wegaufnehmer (2 in Abbildung 2.23) zu finden. Jetzt können auch die beiden Haltebleche an der für den Versuch vorgesehenen Stelle fixiert, der Deckel geschlossen und der Versuch gestartet werden.

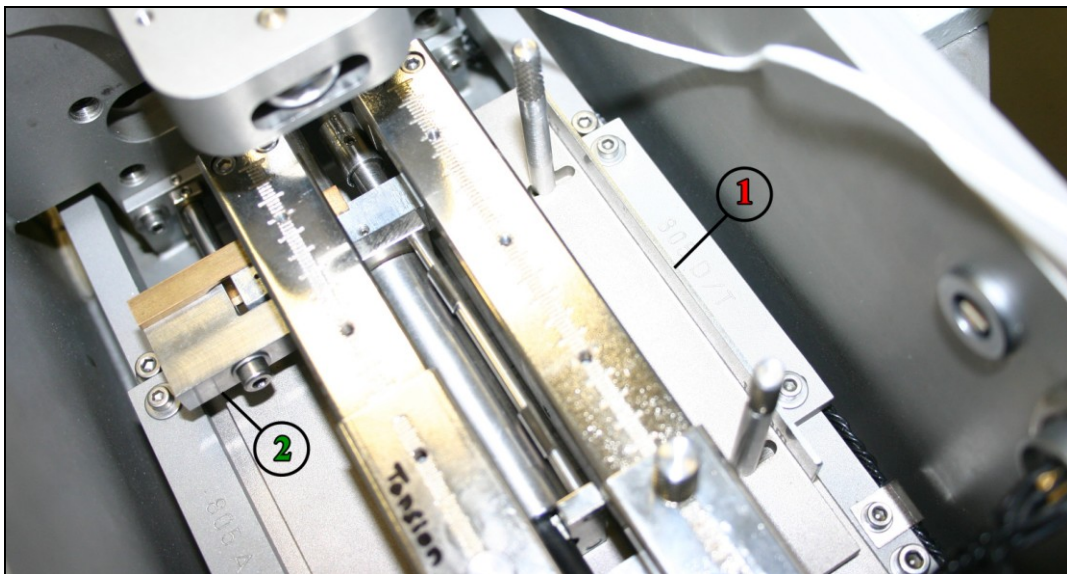


Abb. 2.23: Rechter Teil der Messkammer mit induktivem Wegaufnehmer bei Bähr 805 T

2.2.4 Software und Bedienung

Für die Datenaufzeichnung steht, je nach Verwendung des Zug-/Druckadapters, des Abschreck- und Umformdilatometers eine eigene Software zur Verfügung. Beide Software-Pakete, DIL805T und DIL805D, werden über ein eigenes Programmsymbol gestartet. Es kann jedoch immer nur eines der beiden Programme aktiv sein. Der Start der Versuche erfolgt über die Oberfläche der Software. Das Programm geht selbständig eine Checkliste durch und startet erst dann die Evakuierung bzw. die Datenaufzeichnung, wenn alle Parameter in Ordnung sind.

Das Bedienpult des Dilatometers besitzt ein Display und sechs Taster, die je nach Betriebszustand unterschiedliche Funktionen besitzen. Die aktuelle Funktion wird im Display angezeigt.

3 Grundlagen zur Bestimmung von Fließkurven

Um das Umformverhalten von Materialien bewerten zu können, sind Fließkurven von großer Bedeutung, da sie, wie bei den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen, den Widerstand des Materials gegen plastische Verformung unter einachsiger Beanspruchung beschreiben.

3.1 Definition der Fließkurve

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm, das üblicherweise im Zugversuch aufgenommen wird, bildet die Grundlage für das Erfassen von Werkstoffkennwerten, wie bspw. dem Elastizitätsmodul und der Zugfestigkeit. Die Kraft F wird dabei auf den Ausgangsquerschnitt S_0 der Probe bezogen, hier werden nicht die wahren Spannungen ermittelt, da sich der Prüfquerschnitt während des Versuchs laufend ändert.

Um bei einer Umformung das plastische Fließen der Probe in der Umformzone zu bewirken und in weiterer Folge aufrechtzuerhalten, müssen die tatsächlich wirkenden Spannungen eine bestimmte Größe erreichen. Im einachsigen Zugversuch ist dies die Streckgrenze, bei Druckversuchen die Stauchgrenze. Diese Werkstoffkennwerte können dadurch bestimmt werden, dass die wirkende Kraft F auf die tatsächliche Fläche S bezogen wird (Glg. 3.1).

$$k_f = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

Die Spannung k_f (laut Glg. 3.1) heißt im Bereich des plastischen Fließens, Fließspannung. Die tatsächliche Fläche bzw. der momentane Querschnitt S werden für die Zug-/Druckadapter Versuche nach Gleichung 3.2 berechnet, wobei L_0 für die Ausgangslänge, L_1 für die aktuelle Länge und d_0 für den Anfangsdurchmesser der Probe stehen.

$$S = \frac{\pi * d_0^2 * L_0}{L_1 * 4} \quad (3.2)$$

Der Umformvorgang selbst kann einerseits über die Quertraversengeschwindigkeit mit einer definierten Umformlänge gesteuert werden. Andererseits erlaubt der Adapter die Umformung durch Angabe des logarithmischen Umformgrades φ , definiert durch Gleichung 3.3, der in der Praxis eine anschauliche Größe darstellt, da er für die gängigsten Verfahren wie Walzen und Strangpressen verwendet wird. Bei mehrstufigen Umformungen können die Einzelumformgrade zu einem Gesamtumformgrad aufaddiert werden.

$$\varphi = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad (3.3)$$

Die konstante Dehngeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ (laut Glg. 3.4 mit Δt als Zeitdifferenz) ist ein wichtiger Parameter von Warmbandsträßen und fürs Drahtziehen.

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Die Darstellung k_f über Umformgrad φ wird als Fließkurve bezeichnet und stellt die Spannung dar, die im einachsigen Zustand notwendig ist, um bei dem momentanen Umformgrad plastisches Fließen einzuleiten bzw. aufrechtzuerhalten [10].

Bei der Umformung metallischer Werkstoffe bei Raumtemperatur (Kaltumformung) nimmt die Fließspannung mit steigendem Umformgrad zu. Grund hierfür ist, dass das Gleiten von Atomschichten im Kristall durch Versetzungsbewegung behindert wird und mit zunehmender Formänderung wiederum die Versetzungsdichte ansteigt. Abbildung 3.1 zeigt Fließkurven einiger Metalle bei Raumtemperatur.

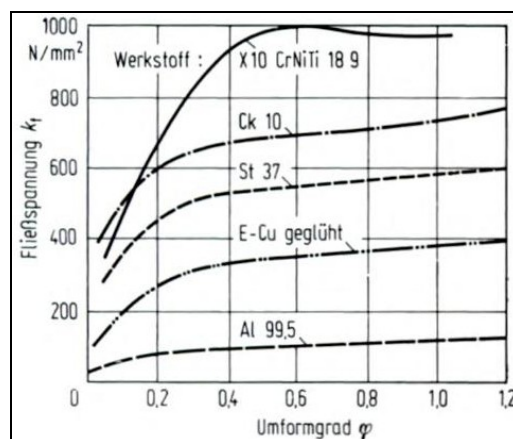


Abb. 3.1: Fließkurven einiger Metalle bei Raumtemperatur [10]

Während der Umformung bei höheren Temperaturen können thermisch aktivierte Vorgänge stattfinden, wodurch es zu Ver- und Entfestigungsvorgängen kommen kann. Die Fließspannung steigt zunächst durch die Zunahme der Versetzungsdichte an, sinkt dann aber bei höheren Umformgraden durch Abnahme der Versetzungsdichte wieder ab, oder aber erreicht ein niedrigeres konstantes Niveau.

Die beiden wichtigsten Vorgänge, die für die Abnahme der Versetzungsdichte verantwortlich sind, sind die Kristallerholung und die Rekristallisation. Während es bei der Erholung durch Auslöschung und Umordnung von Versetzungen zum Abbau von Spannungen ohne Gefüge Neubildung kommt, erfolgt diese bei Rekristallisationsvorgängen auf Grund von Keimbildung und Kornwachstum. Rekristallisationsvorgänge treten erst auf, wenn ein Mindestwert der Umformung, der so genannte kritische Umformgrad, und die Rekristallisationstemperatur erreicht werden. Erst ab Temperaturen von $0,4$ bis $0,5 \cdot T_m$ [K]

können Rekristallisationsvorgänge auftreten. Der kritische Umformgrad ist abhängig von der Reinheit und der Zusammensetzung des Materials selbst.

Von dynamischer Erholung und Rekristallisation spricht man wenn diese Vorgänge während der Umformung auftreten. Inwiefern sie den Verlauf der Fließkurve beeinflussen zeigt Abbildung 3.2. Kommt es zur dynamischen Erholung stellt sich ein maximaler Fließspannungswert ein. Tritt jedoch zusätzlich dynamische Rekristallisation auf, fällt die Fließkurve nach Erreichen eines Höchstwertes auf ein niedriger liegendes konstantes Niveau.

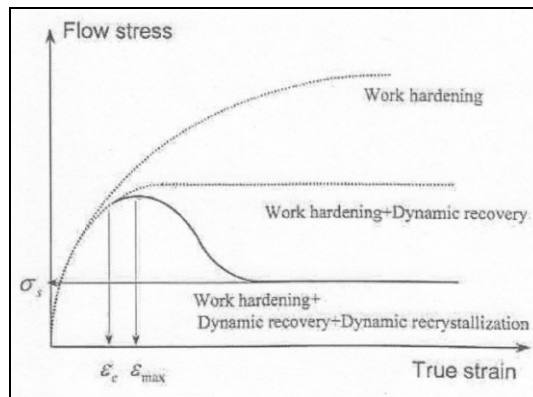


Abb. 3.2: Einfluss auf Fließkurve durch dynamische Erholung und Rekristallisation [11]

Da thermisch aktivierte Vorgänge mit einer endlichen Geschwindigkeit ablaufen, ist die Fließspannung bei hohen Temperaturen, zusätzlich zu Umformgrad und Temperatur, sehr stark von der Umformgeschwindigkeit abhängig. Grundsätzlich nimmt die Fließspannung mit zunehmendem Umformgrad und höherer Umformgeschwindigkeit zu, sinkt jedoch mit steigender Temperatur. Bei höheren Umformgeschwindigkeiten erfolgt eine noch schnellere Zunahme der Versetzungsdichte pro Zeiteinheit, damit steigt die verfestigende Wirkung gegenüber den entfestigenden Vorgängen. Abbildung 3.3 und 3.4 zeigen Fließkurven in Abhängigkeit der Umformgeschwindigkeit und der Umformtemperatur.

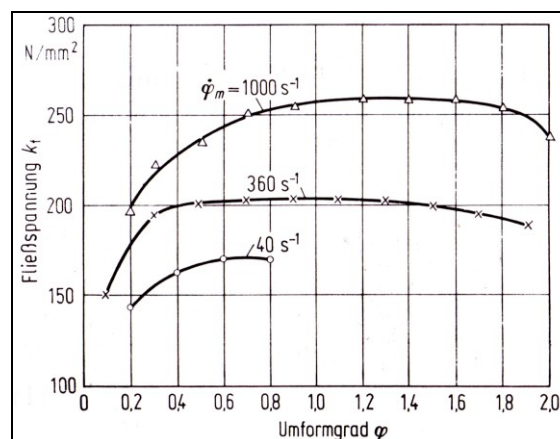


Abb. 3.3: Fließkurven von C15 Stahl, umgeformt bei 1373 K mit unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten [10]

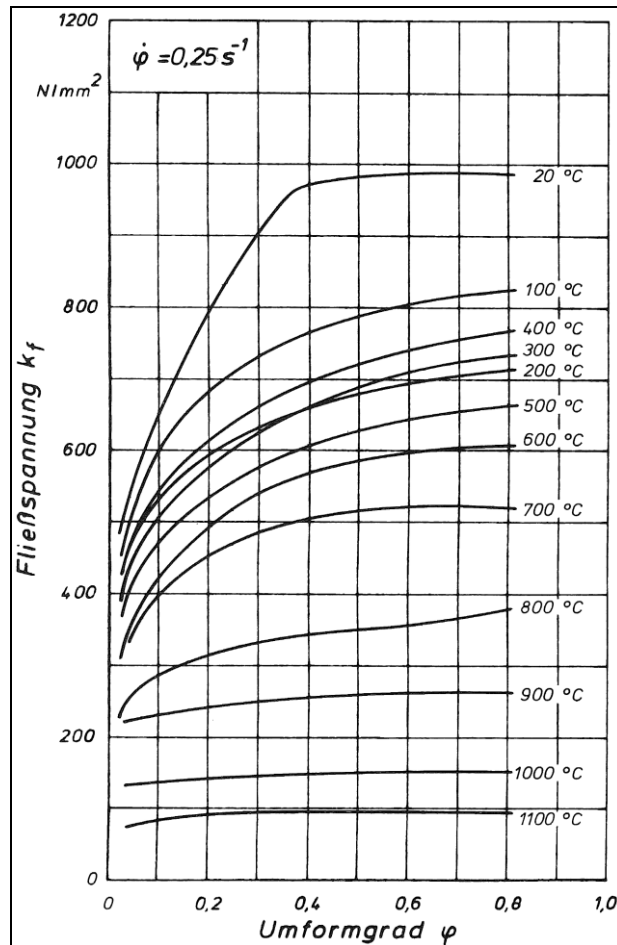


Abb. 3.4: Fließkurven von X5CrNiMo1810 bei verschiedenen Umformtemperaturen [12]

Während der Aufnahme von Fließkurven sind Temperatur und Umformgeschwindigkeit möglichst konstant zu halten. Eine Wärmeabfuhr an die Umgebung oder eine Wärmezufuhr von außen in das System kann bei der Durchführung des Versuchs durch die Verwendung eines Wärmeschutzbehälters vermieden werden [10].

3.2 Geräte, Messprinzip und Unterschiede

Es gibt eine Vielzahl an Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven, sie unterliegen allesamt der Forderung nach exakter Reproduzierbarkeit der Spannungs- und Bewegungsverhältnisse in der Umformzone. Weitere wichtige Anforderungen an das Aufnahmeverfahren sind einerseits der Faktor der Wirtschaftlichkeit, aber auch, dass die Fließspannung in einem sehr weiten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich und bei möglichst hohen Umformgraden bestimmt werden kann. Die meisten Fehler, die bei Fließkurvenversuchen auftreten, ergeben sich durch Reibungs- und Temperatureinflüsse [10].

Die drei Grundverfahren sind der Zug-, der Stauch- und der Torsionsversuch. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht über die Verfahren bzw. deren Vor- und Nachteile.

Tab. 3.1: Übersicht der Grundverfahren für die Fließkurvenaufnahme [10]

	<u>Zugversuch</u>	<u>Stauchversuch</u>	<u>Torsionsversuch</u>
<u>Vorteile</u>	Homogene Umformung, reibungsfrei, einachsiger Spannungszustand, einfache Versuchsdurchführung, Möglichkeit gleichzeitig den r-Wert (Anisotropie-Kennwert) zu ermitteln	Einfache Durchführung, höhere Umformgrade im Stufenstauchversuch erreichbar	Kein Reibungseinfluss, einfache Einstellung der Umformgeschwindigkeit da Probengeometrie praktisch unverändert bleibt
<u>Nachteile</u>	Nur im Bereich der Gleichmaßdehnung	Sehr gute Schmierung zur Vermeidung eines dreiachsigen, inhomogenen Formänderungszustands erforderlich	Verformung inhomogen, leichte Variation von Umformgrad, Versuchseinrichtung aufwendig, komplizierte Versuchsauswertung, Theorie noch unvollständig
<u>Spezielle Verfahren</u>	Zugversuch nach Siebel und Schwaigerer (größerer Versuchsaufwand notwendig), Zugversuch nach Reihle (sehr genaue Proben erforderlich), für Blechwerkstoffe eignet sich der Flachzugversuch	Zylinderstauchversuch nach Rastegaev (praktisch reibungsfreie, streng homogene einachsige Verformung), Flachstauchversuch (keine homogene Verformung, Fehler durch Reibung und Seitenversatz der Werkzeuge)	

Repräsentativ für die Vielzahl an Geräten, die für die Fließkurvenaufnahme verwendet werden können, seien hier die „Gleeble 3500“ der Firma DSI und der „Thermo-Mechanical Treatment Simulator (TMTS)“ von Servotest erwähnt.

Die „Gleeble 3500“ ist ein servohydraulisches Umformdilatometer für hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten. Mit dieser Prüfeinrichtung ist es möglich, metallische Proben einer Zug- oder Druckbelastung zu unterziehen, während sie erhitzt und abgekühlt wird. Die Steuerung kann kraft- oder dehnungsgeregelt erfolgen, es besteht auch die Möglichkeit während eines Versuches die Regelungsart zu wechseln. Die Messdaten werden über acht Kanäle aufgezeichnet. Das thermische System der „Gleeble 3500“ erlaubt Aufheizgeschwindigkeiten bis 10000K/s. Durch Abschrecken mit Gas am Umfang oder eine Innenabschreckung mit Wasser oder Gas können Abkühlgeschwindigkeiten von bis zu 2000K/s erreicht werden. Mit dem mechanischen System, einem servohydraulischen

Zug-/Druckzylinder, sind Kräfte bis 100kN, Umformwege bis $\pm 50\text{mm}$ und Kolbengeschwindigkeiten bis 1m/s möglich. Die Temperatur kann mit bis zu vier Thermoelementen gleichzeitig oder einem Strahlungsthermometer (Pyrometer) bestimmt werden. Für die Kraftmessung stehen (je nach Kraftbereich) drei verschiedene Messdosen zur Verfügung. Weiters besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Kolben- und Traversenwegaufnehmers. Die Dehnung kann mit einem Laserextensiometer gemessen werden [13]. Ein großer Vorteil der „Gleeble 3500“ ist ihr breites Anwendungsspektrum. In erster Linie können Zug- und Druckversuche in verschiedenen Temperaturbereichen durchgeführt werden. Es können aber auch mechanische Werkstoffkennwerte, ähnlich dem Zugversuch, ermittelt und Walz- oder Schmiedeprozesse simuliert werden. Natürlich besteht auch die Möglichkeit ZTU-Schaubilder und Kriechkurven zu erstellen. Die Probengeometrie ist zylindrisch, meist mit einem Durchmesser von $d=5\text{-}16\text{mm}$ und einer Länge l bis 140mm [14].



Abb. 3.5: Übersichtsaufnahme einer Gleeble 3500 [13]

Der „Thermo-Mechanical Treatment Simulator (TMTS)“ der Firma Servotest ermöglicht die Aufnahme von Kalt- und Warmfließkurven. Die Maschine erlaubt eine maximale Stauchkraft von 500kN und eine maximale Werkzeuggeschwindigkeit von 1m/s (bei Vollast) bei maximalen Prüftemperaturen von bis zu 1100°C. Es können Flachstauch- und Zylinderstauchversuche durchgeführt werden. Verschiedene Aufheiz-, Halte-, Abkühl- und Umformschritte können kombiniert werden, auch mehrfache Umformungen sind möglich. Die Umformung erfolgt in einem Ofen mit temperierten Werkzeugen, also unter isothermen Bedingungen. Die Umformgeschwindigkeit kann während des Versuches konstant gehalten werden. Je nach Probengröße sind Umformgeschwindigkeiten von 0,0001 bis zu 100s^{-1} möglich. Das Aufwärmen und Abkühlen der Probe erfolgt in der FTU (Fast Thermal Treatment Unit). Es wird induktiv aufgeheizt und mit Luftstrom, Wasserdampf oder Wasserstrahl abgekühlt. Sowohl die Aufheiz- als auch die Kühlraten können nahezu beliebig variiert werden. Am Ende des Versuches ist auch ein Abschrecken der Probe im Wasserbad

möglich. Um die Auswirkung der thermomechanischen Behandlung auf das Gefüge des Werkstoffes zu untersuchen, kann eine metallografische Auswertung nach dem Versuch erfolgen. Als Proben können beispielsweise zylindrische Stauchproben, mit einem Durchmesser von $d=16\text{mm}$ und einer Länge $l=24\text{mm}$, verwendet werden [15].



Abb. 3.6: Übersichtsaufnahme einer TMTS Servotest [15]

3.3 Einflussgrößen

Außer von den in Abschnitt 3.1 erwähnten Einflussgrößen wie Umformgrad, Umformgeschwindigkeit und Temperatur gibt es noch weitere Größen, die man bei der Ermittlung von Fließkurven berücksichtigen sollte und auf die in den nächsten Abschnitten näher eingegangen wird.

3.3.1 Werkstoff

Werkstoffmerkmale wie chemische Zusammensetzung, Reinheitsgrad, Kristallstruktur, Phasenaufbau und Gefügestand haben großen Einfluss auf die Höhe der Fließspannung und ihre Veränderung in Abhängigkeit der Umformparameter.

Bei der Kaltumformung ist die Kristallstruktur von großer Bedeutung, da sie einen großen Einfluss auf das Verfestigungsverhalten hat. Bei größeren plastischen Verformungen gleiten Atomverbände durch Versetzungsbewegung aneinander ab. Dieses Gleiten, oder auch Translation genannt, findet an Gleitebenen statt. Zur Kaltverformung geeignet sind Raumgittertypen mit vielen Gleitebenen, wie z.B. das kubisch-flächenzentrierte Gitter. Legierungselemente, wie beispielsweise Kohlenstoff in Stählen, erhöhen durchwegs die Fließspannung. Diese Fremdatome blockieren die Gleitebenen und erschweren so die Umformung.

Die in Abhängigkeit von der Temperatur vorliegenden Phasenanteile können ebenfalls die Fließspannung bei mehrphasigen Werkstoffen entscheidend beeinflussen, da diese mehr oder

weniger stark mit Versetzungen wechselwirken und so ebenfalls die Verformung erschweren können. Weiters nimmt die Fließspannung mit abnehmender Korngröße zu. Korngrenzen sind Barrieren für Versetzungen, an diesen stauen sie sich auf und es kommt zu einer Festigkeitssteigerung. Der Korngrenzenanteil hat daher erheblichen Einfluss auf die Festigkeit des Materials [16].

3.3.2 Adiabatische Erwärmung

Die Verformung von Metallen mit hohen Umformgeschwindigkeiten führt im Allgemeinen zu einem Temperaturanstieg des Werkstücks, da es wegen der kurzen Zeitspanne der Verformung zu keinem signifikanten Wärmeaustausch mit der Umgebung kommen kann. Dieser Vorgang wird als adiabatische Erwärmung bezeichnet. Ein völliger Temperatúrausgleich ist nur dann zu erreichen, wenn der Versuch oft genug unterbrochen wird, dadurch kann eine „isotherme Fließkurve“ ermittelt werden. Je höher die Umformgeschwindigkeit, desto größer ist die Abweichung der gemessenen zur isothermen Fließkurve. Im Grenzfall einer unendlich hohen Umformgeschwindigkeit wird also die „adiabatische Fließkurve“ ermittelt [10].

Eine Möglichkeit die adiabatische Temperaturerhöhung ΔT_u in der Umformzone abzuschätzen, liefert Gleichung 3.5:

$$\Delta T_u = \frac{\beta W}{\rho c V} \quad (3.5)$$

Dabei ist β (typisch $\beta=0.95$) der Anteil der mechanischen Energie, der in Wärme umgewandelt und nicht in Form von Gitterbaufehlern im Werkstoff gespeichert wird. c ist die spezifische Wärme, ρ die Dichte, W die Umformarbeit und V das Volumen. ΔT_u kann je nach Reibungsverhältnissen und Fließspannung des Werkstoffs sehr unterschiedliche Werte annehmen, übliche Werte liegen zwischen 30°C und 50°C [17].

Untersuchungen bestätigen, dass die adiabatische Erwärmung einen enormen Einfluss während einer High-Speed Verformung ($\dot{\phi}=1000\text{-}2000\text{s}^{-1}$) besitzt, wie das Auftreten einer Phasenumwandlung in perlitischen Stahlproben zeigt [18].

3.3.3 Stauchversuche und Reibung

Stauchversuche werden eingesetzt wenn möglichst hohe Umformgrade erreicht werden sollen, dabei wird ein zylindrischer Probekörper zwischen ebenen parallelen Stauchbahnen zusammengedrückt. Aus der gemessenen Last-Weg-Kurve lassen sich Umformgrad und Fließspannung berechnen [10].

Bei Stauchversuchen spielt die Reibung eine besondere Rolle. Sie macht einerseits eine zusätzliche Kraft zum Erreichen eines gegebenen Umformgrades erforderlich und behindert andererseits die radiale Ausbreitung der Probe, so dass es zu einer tonnenförmigen

Ausbuchtung kommt. Im schlimmsten Fall legen sich Teile der Mantelfläche an die Stauchbahnen an, in diesem Fall ist eine sinnvolle Versuchsauswertung nicht mehr möglich. Der Einfluss der Reibung kann durch die Verwendung eines geeigneten Schmierstoffes (z.B.: Teflon oder Molybdändisulfid) verringert werden.

In der Regel werden Stauchversuche kontinuierlich durchgeführt. Die Probe kann sich aber auch hier erwärmen und das Ergebnis verfälschen. Daher ist die adiabatische Erwärmung zu berücksichtigen. Bei wachsendem Umformgrad wird die Schmierung zunehmend schlechter, da sich die Stirnfläche der Probe vergrößert und dadurch der Schmierstofffilm dünner wird. Der Stauchversuch wird aus diesem Grund in manchen Fällen diskontinuierlich durchgeführt. Wird der Stauchvorgang unterbrochen, wird die Probe auf den anfänglichen Schlankheitsgrad abgedreht und neu geschmiert. Dadurch kann die Reibung und eine Abweichung der Probe von der Zylinderform durch Ausbauchen unterdrückt werden. Gleichzeitig kann die Probe während der Unterbrechung abkühlen, sodass die isotherme Fließkurve besser angenähert wird [10].

Wie in Tab. 3.1 angeführt, ist ein großer Vorteil des Stauchversuchs nach Rastegaev, dass die Verformung über das Probenvolumen selbst bei hohen Umformgraden homogen ist. Erreicht wird dies durch die spezielle Probenform mit einer Topfbohrung an den Stirnflächen, siehe Abbildung 3.7. Als Schmiermittel wird Paraffin in die Ausdrehungen gefüllt.

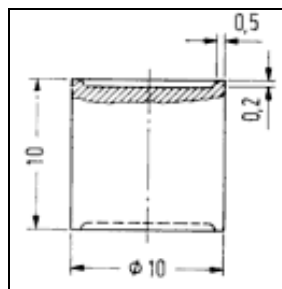


Abb. 3.7: Zylinderstauchprobe nach Rastegaev [10]

Ein Nachteil der Versuche ist, dass die gute Schmierung die Genauigkeit, mit welcher der Stauchweg gemessen wird, verringert. Die Stirnflächen der Probe bleiben nicht eben. Somit wird im Rastegaev Versuch die Fließkurve mit wachsendem Umformgrad immer ungenauer ermittelt. Es gibt eine Grenze bis zu welcher der Versuch sinnvoll ist ($\varphi=1,2\dots1,5$) [10].

4 Experimenteller Teil

4.1 Werkstoff

Der für die Dilatometerversuche verwendete Werkstoff besitzt die Bezeichnung S550MC (nach DIN EN 10149/2 1995). Tabelle 4.1 zeigt die genaue chemische Zusammensetzung.

Tab. 4.1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs (Masse %) [19]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	V	N ₂
0.08	0.38	1.54	0.009	0.01	0.03	0.02	0.02	0.034	0.0126	0.0455	0.048	0.0065

Dieser mikrolegierte, perlitarne Feinkornbaustahl kommt aus dem Flachstahlbereich und wird größtenteils für kaltumgeformte Bauteile verschiedenster Konstruktionen eingesetzt. Diese Stahlsorte dient vor allem zur Herstellung von Längsträgern, Rahmenkonstruktionen, Kaltpressteilen, Kaltprofilen und Konstruktionsrohren [20]. Die durch die chemische Zusammensetzung und thermomechanische Behandlung erzielte feinkörnige Gefügeausbildung ergibt hohe Streckgrenzenwerte bei sehr guter Kaltumformbarkeit. Aus niedrigen Kohlenstoff- und Mikrolegierungselementgehalten resultiert ein niedriges Kohlenstoffäquivalent und daher eine gute Schweißbarkeit [21].

Abbildung 4.1 zeigt lichtmikroskopische Gefügaufnahmen des Versuchsmaterials bei unterschiedlichen Vergrößerungen nach einer Nitalätzung. Die Zeiligkeit des Gefüges ist durch Seigerung während der Erstarrung und anschließendes Walzen zu erklären. In Abbildung 4.1 b) ist das ferritische (F)/perlitische (P) Gefüge zu erkennen.

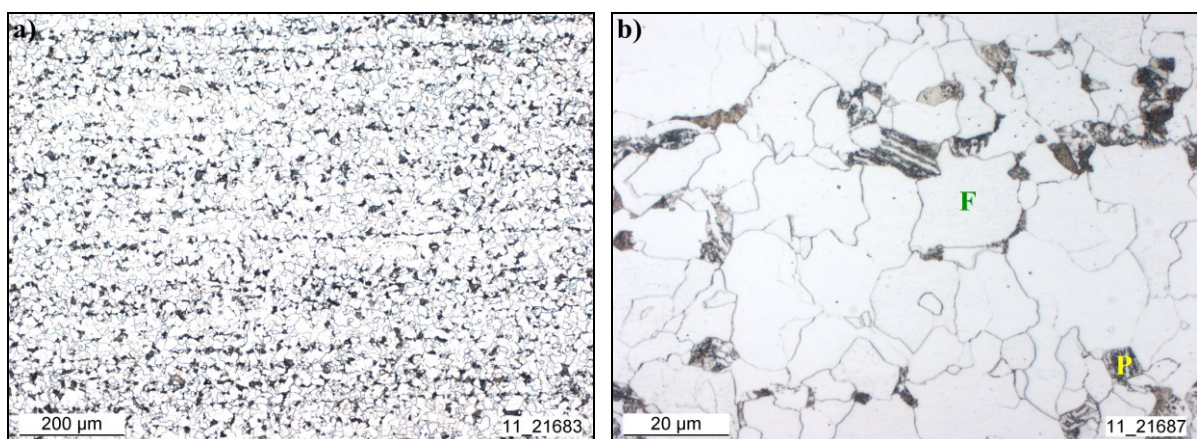
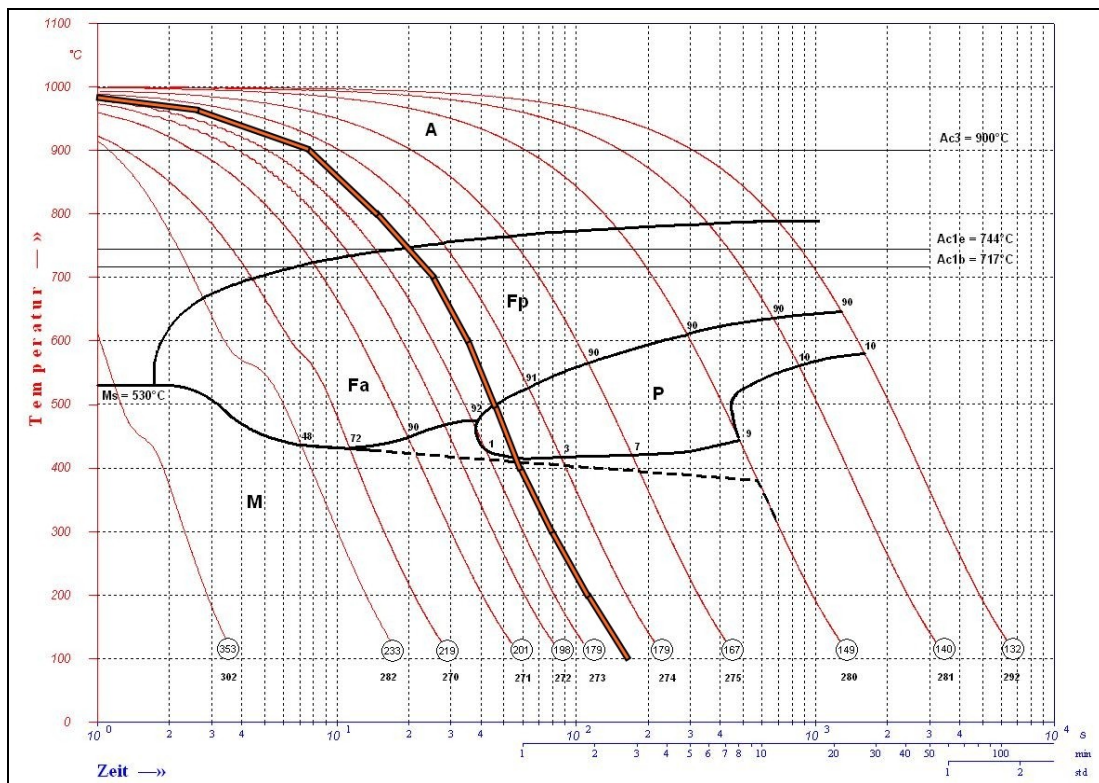


Abb. 4.1: Gefüge PK9FL Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x

Abbildung 4.2 zeigt ein kontinuierliches ZTU-Schaubild für die angegebenen Randbedingungen. Die im ZTU-Schaubild eingezeichnete orange Abkühlkurve entspricht

einer Abkühlzeit $t_{8/5}$ von 40s. Diese Abkühlzeit wurde für alle in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Dilatometerversuche verwendet. Dem Verlauf der orangen Abkühlkurve in Abbildung 4.2 nach ist ein ferritisch/perlitisch/martensitisches Endgefüge zu erwarten. Die ermittelten Härtewerte an den verformten Proben dienen ebenfalls als mögliche Anhaltspunkte für den Einfluss der Umformung.

Austenitisierungstemperatur:	1000°C	Ac1b-Temperatur:	717°C	Ac1e-Temperatur:	744°C
Haltezeit:	15 min	Ac3-Temperatur:	900°C		
Austenitkorngröße (DIN 50601)	10	Ms-Temperatur:	530°C		



A: Austenit	Ms-Temp.: Martensitstarttemperatur
M: Martensit	Ac₃-Temp.: Ab dieser T, nur mehr Austenit
P: Perlit	Ac_{1b}-Temp.: Temperatur für Eintritt in Dreiphasenraum
Fa: Acicularer Ferrit	Ac_{1e}-Temp.: Temperatur für Eintritt den Zweiphasenraum
Fp: Polygonaler Ferrit	

Abb. 4.2: Kontinuierliches ZTU-Schaubild und Erklärung der Kurzzeichen [22]

4.2 Dilatometerversuche

Ziel der durchgeführten Zug-/Druckversuchsreihen war es unter anderem, die Reproduzierbarkeit der Dilatometerversuche zu bewerten. Für jede Umformtemperatur wurde eine Serie mit je drei Versuchen durchgeführt. Während bei den Zug-/Druckversuchen nur die

Umformtemperatur variiert wurde, wurde bei einer finalen dritten Versuchsreihe zusätzlich die Umformgeschwindigkeit verändert. Es wurde jedoch nur ein Versuch pro Umformtemperatur und Umformgeschwindigkeit durchgeführt. Die aus den ersten beiden Versuchsserien gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Bewertung der dritten hinsichtlich ihrer Genauigkeit und fehlerfreien Durchführung ein.

4.2.1 Anordnung der verwendeten Thermoelemente

Bei jedem Versuch wurden drei Thermoelemente verwendet. Das Thermoelement in der Mitte der Probe dient zur Regelung des Temperaturprogramms, die beiden äußeren zeigen an, ob sich ein Temperaturgradient ausbildet. T1 bezeichnet das Thermoelement in der Mitte, T3 das Thermoelement rechts auf der Seite der Kraftmessenrichtung und T2 das Thermoelement links auf der Seite des Zug-/Druckadapters. Als Standardthermoelement wird ein Typ S Element benutzt (Platin - Platin/Rhodium 10%). Typ S Thermoelemente sind in einem Temperaturbereich von 20 bis 1550°C einsetzbar [8]. Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Anordnung der Thermoelemente an der Dilatometerprobe.

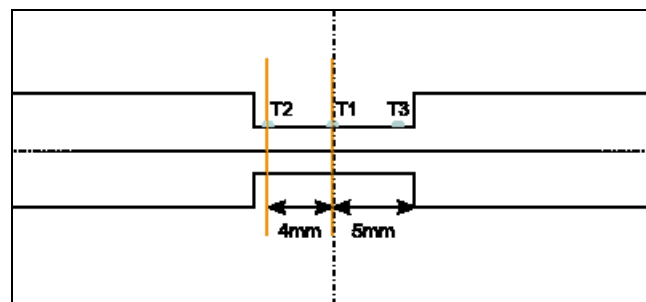


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Anordnung der Thermoelemente

4.2.2 Erstellung der Temperaturprofile mit der Dilatometer Software

Die Programmierung der Temperaturprofile erfolgt in einem Eingabefenster der mitgelieferten Software. Jedes Temperaturprofil besteht aus Segmenten, die der Nutzer einzeln bearbeiten kann. Die Profile selbst können einzeln abgespeichert und zu Beginn der Datenaufnahme ausgewählt werden. Abbildung 4.4 zeigt das Eingabefenster für Temperaturprofile, hier beispielsweise für einen Zugversuch bei einer Umformtemperatur von 800°C.

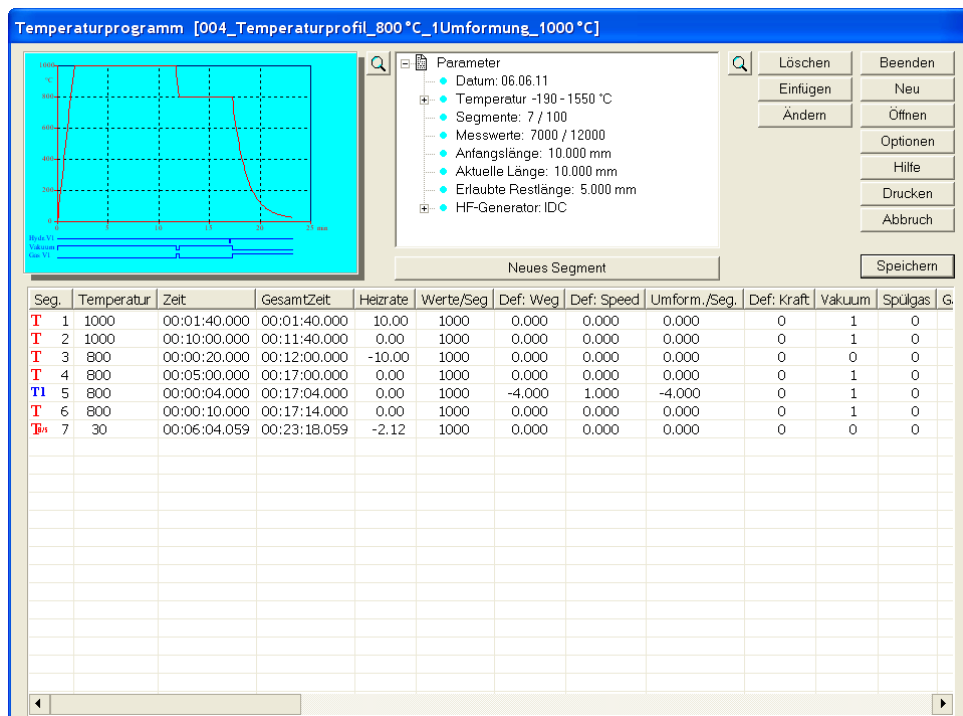


Abb. 4.4: Eingabefenster für Temperaturprofile

Dieses Profil besteht aus 7 Segmenten, maximal können 100 Segmente programmiert werden. In der ersten Spalte steht die jeweilige Segmentnummer mit einer Angabe zur jeweiligen Art des Segments. „T“ steht für ein lineares Temperatursegment, indem entweder geheizt, gekühlt oder die Temperatur gehalten wird. Segment 5 ist das Umformsegment, auf das später noch genauer eingegangen wird. Segment 7 ist das Abkühlsegment für $t_{8/5} = 40\text{s}$. Die zweite Spalte gibt Auskunft über die jeweilige Soll- bzw. Endtemperatur der Probe während bzw. am Ende des jeweiligen Abschnitts. In der dritten und vierten Spalte werden die entsprechenden Zeiten dargestellt, für das Segment im Einzelnen sowie für die Gesamtzeit des Versuchs. In der fünften Spalte stehen Heiz- bzw. Abkühlraten. In der nächsten Spalte folgen die Anzahl der pro Segment aufgezeichneten Messwerte, wobei maximal 12000 Messwerte pro Versuch aufgezeichnet werden können. Die Spalten 7-9 geben die Umformparameter wieder. Hier ist wichtig anzumerken, dass das Programm Zugversuche in negative Richtung auswertet, Umformwege für Druckversuche besitzen dagegen ein positives Vorzeichen. Das wirkt sich unmittelbar auf die Achsenbeschriftung der Fließkurven auf, worauf in Kapitel 5.3.3 näher eingegangen wird. Die letzte für die Versuche relevante Spalte ist jene, in der angezeigt wird, ob das Segment unter Vakuum läuft „1“ oder ob ein Ventil geöffnet ist und ein Kühlvorgang stattfindet, „0“.

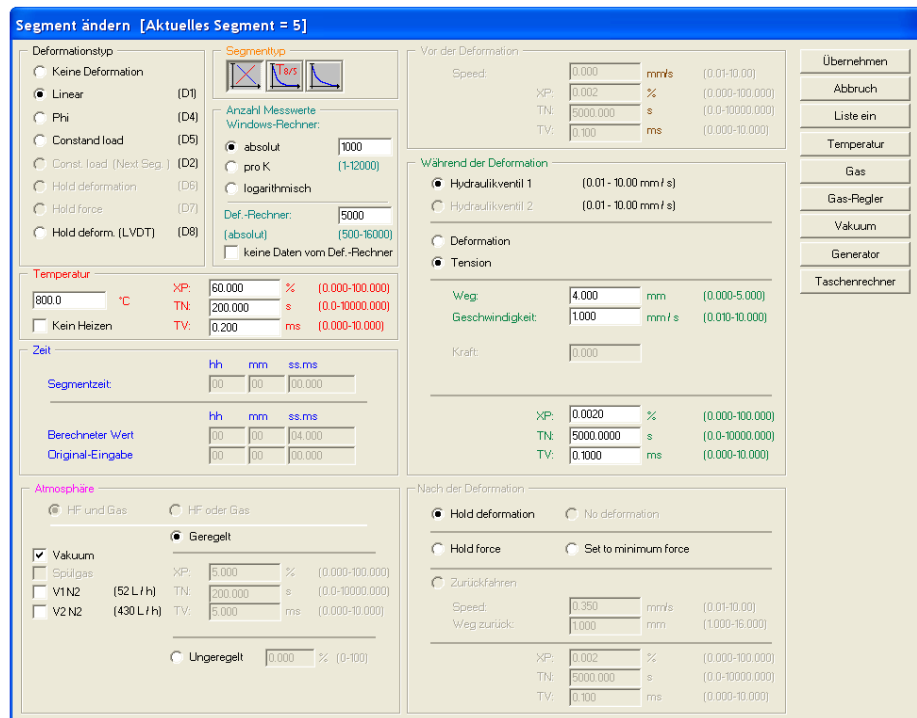


Abb. 4.5: Segmentfenster, Segment 5 Zug 800°C

Abbildung 4.5 zeigt das geöffnete Segmentfenster für das Umformsegment 5 in Abbildung 4.4. In diesem Fenster ist es möglich, für ein Segment den Deformationstyp, die Anzahl der Messwerte, die Regeltemperatur/-zeit, das Vakuum und die Umformparameter einzustellen.

Der Deformationstyp ist linear und die Umformtemperatur beträgt 800°C, gleichzeitig erfolgt die Umformung unter Vakuum. Das eingebaute Hydraulikventil ermöglicht eine maximale Umformgeschwindigkeit von 10mm/s. „Tension“ bedeutet Zugbelastung, mit den darunter stehenden Parametern. Für alle Versuche wurde die vorgegebene Einstellung „Hold deformation“ gewählt. Dabei wird der Umformweg nach erfolgter Deformation konstant gehalten.

Abbildung 4.6 zeigt das Segmentfenster für Segment 5 eines Druckversuches bei 800°C. Einziger Unterschied zu Abbildung 4.5 ist, dass hier die Option „Deformation“ ausgewählt ist.

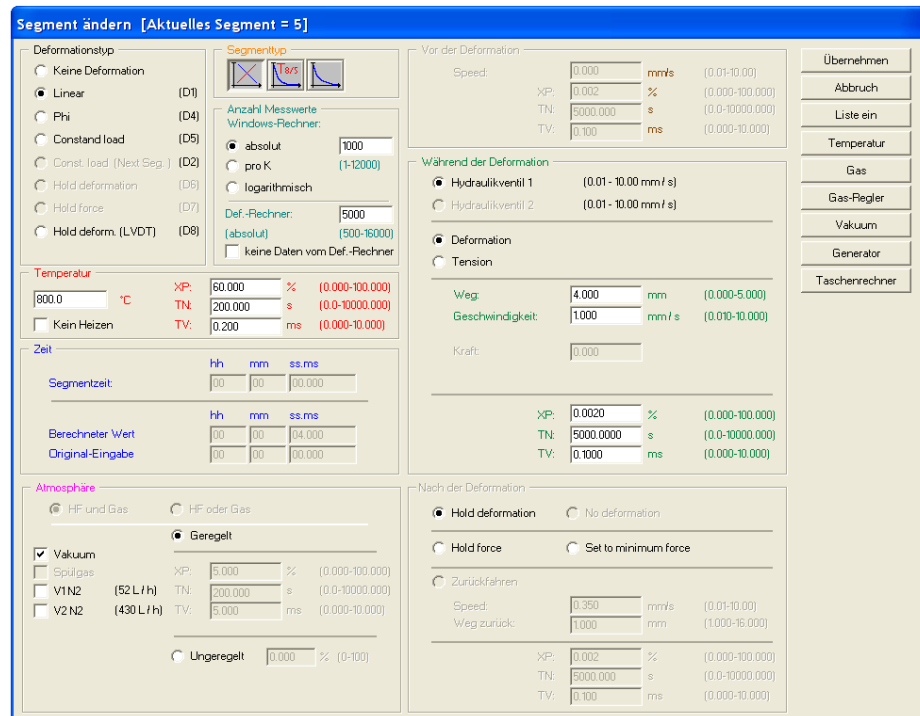


Abb. 4.6: Segmentfenster, Segment 5 Druck 800°C

4.2.3 Parameter der Zug-/Druckversuche

Der Umformweg betrug bei allen Versuchen 4mm. Die Umformtemperaturen wurden mit 800°C, 850°C und 900°C festgelegt, bei der Zugversuchsserie wurde zusätzlich ein Versuch bei 1000°C durchgeführt. Bei 850°C erfolgten außerdem Zugversuche mit zweistufiger Umformung, dabei wurde die Probe in zwei Umformschritten mit je 2mm umgeformt. Die Haltezeit zwischen den beiden Schritten lag bei 3min. Ebenfalls für 850°C wurde eine Serie ohne Umformung ausgewertet. Abschließend wurde eine Reihe von Zugversuchen mit den gleichen Umformparameter wie bei den vorangegangenen Versuchen durchgeführt. Einzig die Umformgeschwindigkeit wurde von 1mm/s auf 5 und 10mm/s erhöht. Tabelle 4.2 fasst die Umformparameter, Weg und Geschwindigkeit (UG) bei den entsprechenden Umformtemperaturen für die Zug- und Druckversuche zusammen.

Tab. 4.2: Umformparameter der durchgeführten Versuche

		800°C	850°C	900°C	1000°C
Zug	Weg	4mm	4mm	4mm	4mm
	UG	1mm/s, 5mm/s und 10mm/s	1mm/s, 5mm/s und 10mm/s	1mm/s, 5mm/s und 10mm/s	1mm/s, 5mm/s und 10mm/s
Druck	Weg	4mm	4mm	4mm	
	UG	1mm/s	1mm/s	1mm/s	

In Tabelle 4.3 sind die Versuchsnummern mit den dazu gehörigen Parametern und Probennummern aufgelistet. Die Vorversuche sowie die zur Überprüfung der Spulenposition nach einem Umbau des Dilatometers durchgeführten Versuche sind nicht angeführt.

Tab. 4.3: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche

	<i>Umformtemperatur</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>Weg</i>	<i>Proben Nummer</i>	<i>Anmerkung</i>
Versuch 00734	-	-	-	14	
Versuch 00735	-	-	-	15	Systemabbruch
Versuch 00736	-	-	-	16	
Versuch 00737	-	-	-	17	
Versuch 00738	850°C	1mm/s	+4mm	18	
Versuch 00739	850°C	1mm/s	+4mm	19	Verformung Prüfbereich
Versuch 00740	850°C	1mm/s	+4mm	20	Einschnürung außermittig
Versuch 00741	850°C	1mm/s	+4mm	21	
Versuch 00742	850°C	1mm/s	+2*2mm	22	
Versuch 00743	850°C	1mm/s	+2*2mm	23	
Versuch 00744	850°C	1mm/s	+2*2mm	24	
Versuch 00745	850°C	1mm/s	+4mm	25	
Versuch 00746	800°C	1mm/s	+4mm	26	

	<i>Umformtemperatur</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>Weg</i>	<i>Proben Nummer</i>	<i>Anmerkung</i>
Versuch 00747	800°C	1mm/s	+4mm	27	
Versuch 00748	800°C	1mm/s	+4mm	28	
Versuch 00749	900°C	1mm/s	+4mm	29	
Versuch 00750	900°C	1mm/s	+4mm	30	
Versuch 00751	900°C	1mm/s	+4mm	31	
Versuch 00752	1000°C	1mm/s	+4mm	32	Einschnürung außermittig
Versuch 00753	1000°C	1mm/s	+4mm	33	
Versuch 00754	1000°C	1mm/s	+4mm	34	
Versuch 00755	1000°C	1mm/s	+4mm	35	
Versuch 00763	850°C	1mm/s	-4mm	37	
Versuch 00764	850°C	1mm/s	-4mm	38	Hohes ΔT
Versuch 00765	850°C	1mm/s	-4mm	39	
Versuch 00766	850°C	1mm/s	-4mm	40	
Versuch 00767	800°C	1mm/s	-4mm	41	
Versuch 00768	800°C	1mm/s	-4mm	42	

	<i>Umformtemperatur</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>Weg</i>	<i>Proben Nummer</i>	<i>Anmerkung</i>
Versuch 00769	800°C	1mm/s	-4mm	43	
Versuch 00770	900°C	1mm/s	-4mm	44	
Versuch 00771	900°C	1mm/s	-4mm	45	
Versuch 00772	900°C	1mm/s	-4mm	46	
Versuch 00774	850°C	10mm/s	+4mm	48	
Versuch 00775	800°C	10mm/s	+4mm	49	
Versuch 00776	900°C	10mm/s	+4mm	50	Verformung Prüfbereich
Versuch 00777	900°C	10mm/s	+4mm	52	
Versuch 00778	1000°C	10mm/s	+4mm	53	
Versuch 00779	850°C	5mm/s	+4mm	54	
Versuch 00780	800°C	5mm/s	+4mm	55	
Versuch 00781	900°C	5mm/s	+4mm	57	
Versuch 00782	1000°C	5mm/s	+4mm	58	

Auf die Anmerkungen wird in Abschnitt 5.1.1 näher eingegangen.

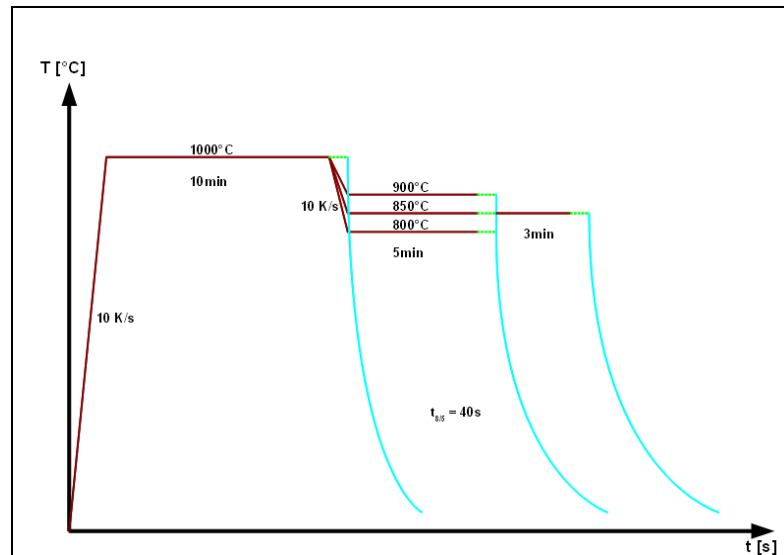


Abb. 4.7: Temperaturprofile

Abbildung 4.7 zeigt die verwendeten Temperaturprofile. Zu Beginn des Versuchs wurden die Proben mit einer Aufheizrate von 10K/s auf 1000°C aufgeheizt und dort 10min gehalten. Anschließend erfolgte eine Abkühlung mit 10K/s auf die jeweilige Umformtemperatur. Nach einer Haltezeit von 5min startete die Umformung, gefolgt von einer kurzen Haltezeit von 10s. Im Anschluss an dieses Segment begann der Abkühlvorgang. Für Umformungen bei Temperaturen von 1000°C wurde der Umformvorgang ohne vorangegangenes Abkühlsegment eingeleitet. Für alle Versuche wurde eine Abkühlzeit $t_{8/5}$ von 40s gewählt.

4.2.4 Darstellung der Dilatometerdaten

Prinzipiell erlaubt die Dilatometer Software die Darstellung der Daten eines einzelnen bzw. mehrerer Versuche gleichzeitig. Das Auswerteprogramm bietet in einer Mehrkurven Darstellung die Möglichkeit maximal 30 Versuche zu laden und zu bearbeiten.

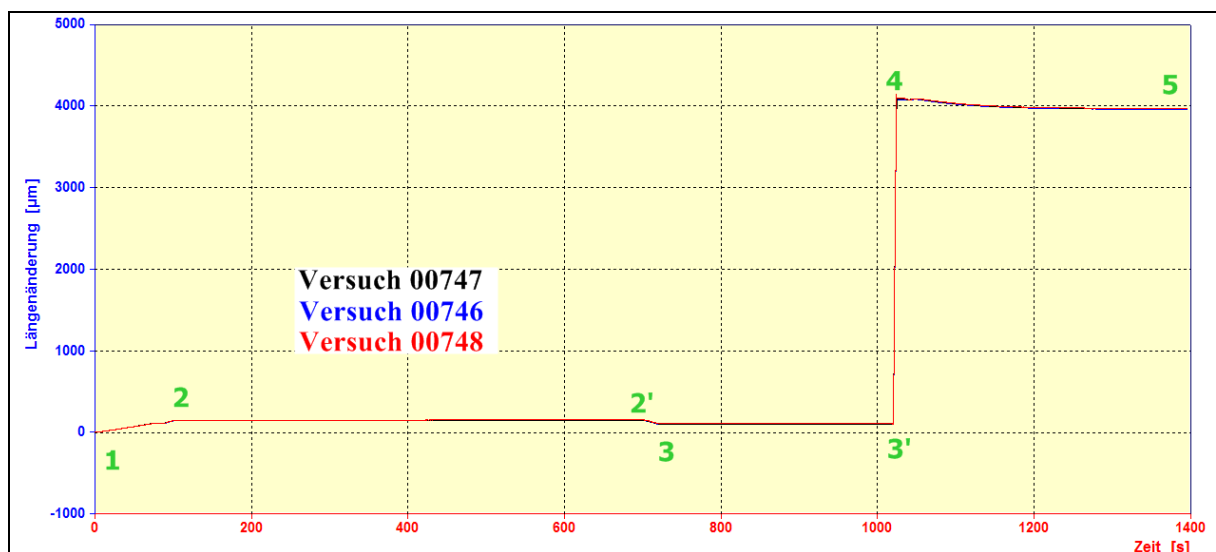


Abb. 4.8: Längenänderung der Probe [µm] vs. Zeit [s]; Zugversuche 800°C

Als Beispiel für eine Mehrkurven Darstellung ist in Abbildung 4.8 die Längenänderung der Probe in Abhängigkeit der Zeit für die Zugversuche 00746, 00747 und 00748 dargestellt. Der Versuch startet bei Punkt 1, demzufolge bei einer Längenänderung von Null. Der Aufheizvorgang auf 1000°C entspricht im Diagramm der Geraden von Punkt 1 bis Punkt 2. Bis zu diesem Punkt 2 erfolgt eine Zunahme der Längenänderung da sich die Probe mit steigender Temperatur ausdehnt. Während des zweiten Segments, dem Haltevorgang auf 1000°C, erfolgt nur eine minimale Zunahme der Probenlänge, die in Abbildung 5.2 aber kaum ersichtlich ist (Punkt 2 zu Punkt 2'). Im dritten Segment wird auf die Umformtemperatur abgekühlt, in diesem Fall auf 800°C. Dies entspricht einer Verringerung der Probenlänge und demnach einem Abfall der Geraden von 1000°C auf 800°C (Punkt 2' auf Punkt 3). Das vierte Segment, der Haltevorgang vor der Umformung (Punkt 3 zu Punkt 3'), ist ähnlich dem zweiten Segment. Schließlich erfolgt die Umformung der Probe (Punkt 3' zu Punkt 4). Der Abkühlvorgang von Umformtemperatur auf Raumtemperatur, ist schließlich das letzte Segment, bevor der Versuch im Punkt 5 endet.

Die Daten einzelner Versuche können in einer X-Y1-Y2-Y3 Darstellung ausgewertet werden. Das Programm bietet unterschiedlichste Möglichkeiten der Achsenzuordnung. In Abbildung 5.1 entspricht bspw. die X-Achse der Zeit und die Y-Achsen den gemessenen Temperaturen der drei Thermoelemente.

4.3 Metallographische Untersuchung und Härtemessung

Die Proben wurden nach den Versuchen ausgebaut und nach Entfernen der Thermolemente mit einer Schublehre hinsichtlich Längen- und Querschnittsveränderung vermessen. Schließlich wurden sie mit einer Trennmaschine (Discotom 2), wie in Abbildung 4.9 ersichtlich, für die weiteren Untersuchungen geteilt.

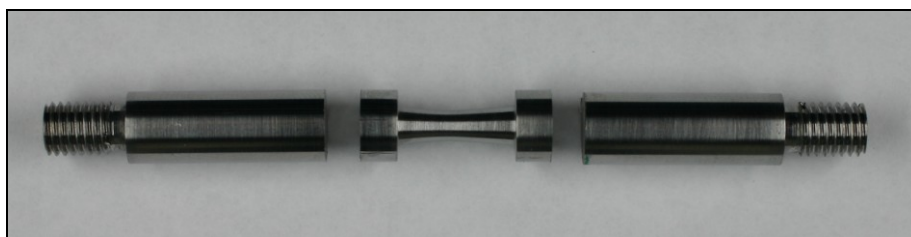


Abb. 4.9: Zugeschnittene Dilatometerprobe

Der äußere Durchmesser der Probe beträgt 9mm. Um die Mitte der eingebetteten Probe in Längsrichtung untersuchen zu können, wurden 4mm abgeschliffen und die Probe anschließend metallografisch präpariert. Der Schliff wurde parallel zur Verformungsrichtung hergestellt.

Vor dem Einbetten der Proben wurden sie am äußeren Durchmesser leicht angeschliffen (ca. 0,1mm). Nur so war gewährleistet, dass die Proben während des Einbettvorgangs die gewünschte Position beibehielten und nicht wegrollten.

Die Gefügeuntersuchung erfolgte mittels Lichtmikroskop, wobei zur Sichtbarmachung eine Nital- und Klemmätzung durchgeführt wurden. Nitalätzungen zählen zu den gängigsten Ätzmethoden für Kohlenstoffstähle. Die Ätzlösung ist eine 1-3 %ige alkoholische HNO_3 (Salpetersäure). Diese Ätzung dient zur Sichtbarmachung von Korn- und Phasengrenzen. Der Martensit verfärbt sich leicht bräunlich, wohingegen der Ferrit nicht angegriffen wird [23]. Die Klemmätzung erfolgt in einer Natriumthiosulfatlösung (Vorätzen: Nitalätzung). Die Farbätzung nach Klemm färbt Ferrit blau bis braun, Karbide, Zementit und Phosphide werden nicht gefärbt und bleiben weiß [24].

Mittels eines automatischen Bildanalysators wurden die Korngrößenkennzahl G , der Kornflächenmittelwert und die maximale bzw. minimale Korngröße nach der Norm ASTM E112 errechnet. In diesem Analysator wird ein Bild des Gefüges eingelesen und die Korngrenzen rot eingefärbt. Eine händische Korrektur bei Kratzern oder nicht detektierten Korngrenzen ist bei Bedarf möglich. Die Untersuchungen mit dem automatischen Bildanalysator erfolgten an den Schlifflinien mit Nitalätzung.

Abschließend wurde die Härte der Proben nach Vickers bestimmt. Dieses Verfahren wurde ausgewählt, da es auch bei der Erstellung des in Abbildung 4.3 dargestellten ZTU-Diagrammes verwendet wurde und damit die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Umformung miteinander verglichen werden können. Die Härtemessung stellt ein einfaches Maß zur Bestimmung der Raumtemperatureigenschaften dar und sollte den Einfluss der Zeit-Temperatur-Umformprofile auf die mechanischen Eigenschaften aufzeigen.

5 Versuchsauswertungen und Ergebnisse

5.1 Evaluierungen des Versuchsaufbaus

Bei der Verwendung des Zug-/Druckadapters wird, im Vergleich zu Abschreckversuchen, eine Induktionsspule mit größerem Durchmesser eingesetzt. Anzumerken ist hier, dass sich bei den Abschreckversuchen die Probe mit ihrem gesamten Volumen innerhalb der Induktionsspule befindet, dadurch erwärmt sich die Probe gleichmäßiger. Bei Zugproben kommt es aber aufgrund der Probengeometrie zu einer speziellen Situation der Wärmeabfuhr. Der Versuchsquerschnitt selbst befindet sich zwar ebenfalls mit seinem gesamten Volumen innerhalb der Induktionsspule, jedoch sind die Enden der Probe an gekühlten Halterungen festgeschraubt. Es konnte beobachtet werden, dass sich nach dem Einbau der Zugproben in das System und einer kurzen Wartezeit ein Temperaturgradient ausgebildet hat, welcher auf diese unterschiedliche Kühlung der Probe zurückzuführen ist. Die Klemmachse besitzt eine niedrigere Temperatur als die Kraftmesseinrichtung, dies wirkt sich direkt auf die Temperaturverteilung der Probe aus.

Aufgrund der Bewertung der Untersuchungsergebnisse früherer Versuche der voestalpine mit dem Zug-/Druckadapter wurde vorab definiert, dass es sich dann um einen gültigen Zugversuch handelt, wenn die Einschnürung der Probe in der Probenmitte liegt. Ist die Spule nicht zentral über dem Prüfquerschnitt platziert, kommt es zu einer ungleichmäßigen Probenerwärmung. Das hat zur Folge, dass sich der wärmste Punkt der Probe verschiebt, welcher im Idealfall mit der Position des Regelthermoelements T1 übereinstimmt, und die Einschnürung ist außermittig. Es empfiehlt sich daher, bei eingebauter Zugprobe die Spulenposition bezüglich der Probenposition zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren.

Ziel der durchgeführten Vorversuche war es, die Spule so zu justieren, dass die unterschiedliche Kühlung über die Probe ausgeglichen sowie ein Auftreten großer Temperaturunterschiede vermieden wird.

Abbildung 5.1 zeigt den Temperaturverlauf für einen der ersten Vorversuche. Im hier verwendeten Temperaturprofil wird die Probe innerhalb von 120s auf 1000°C aufgeheizt, 5min gehalten und danach auf Raumtemperatur abgekühlt. Der Temperaturunterschied zwischen der Regeltemperatur 1 und der Temperatur 3 beträgt am Ende des Haltesegments 118°C. Durch anschließende Justierung der Spule konnte dieser Wert immer weiter reduziert werden.

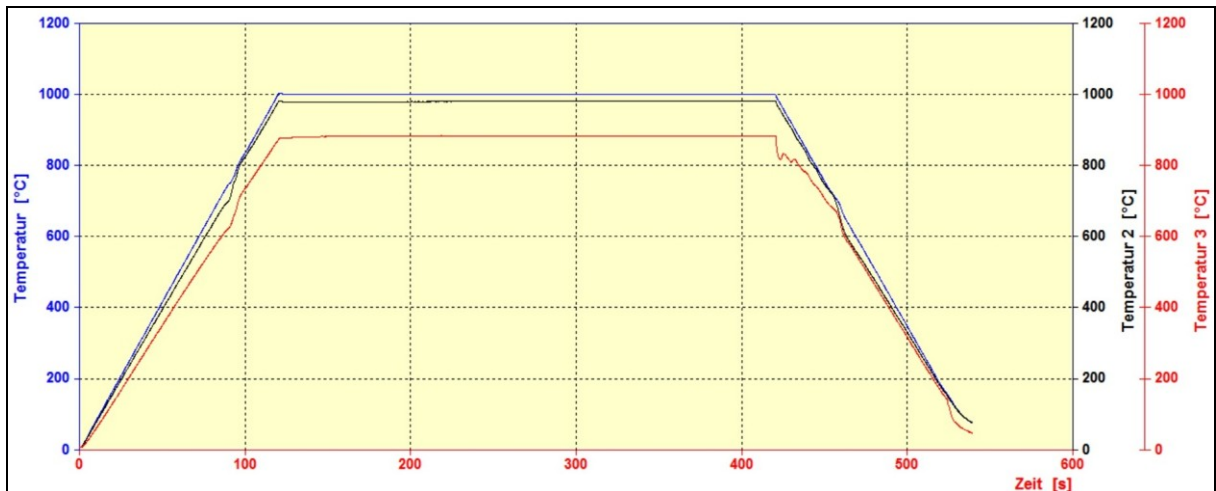


Abb. 5.1: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Vorversuch 7

Abbildung 5.2 zeigt den Temperaturverlauf eines später durchgeführten Versuchs mit einer an das Haltesegment anschließenden Umformung auf 1000°C. Der Temperaturgradient beträgt hier am Ende des Haltesegmentes nur mehr 95°C. In Abbildung 5.3 kann man erkennen, dass die Einschnürung leicht außermittig auftritt.

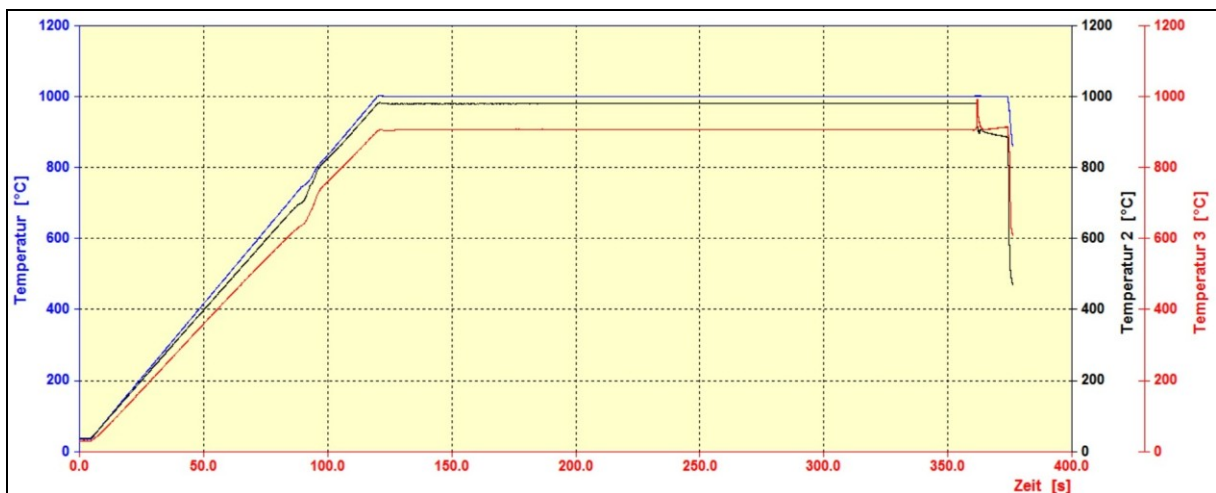


Abb. 5.2: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Vorversuch 10



Abb. 5.3: Umgeformte Zugprobe des Vorversuchs 10

Abbildung 5.4 zeigt den Temperaturverlauf von einem der letzten Vorversuche. Der Unterschied zwischen der Regeltemperatur 1 und Temperatur 3 für das Ende des Haltesegmentes konnte schließlich bis auf 7°C minimiert werden.

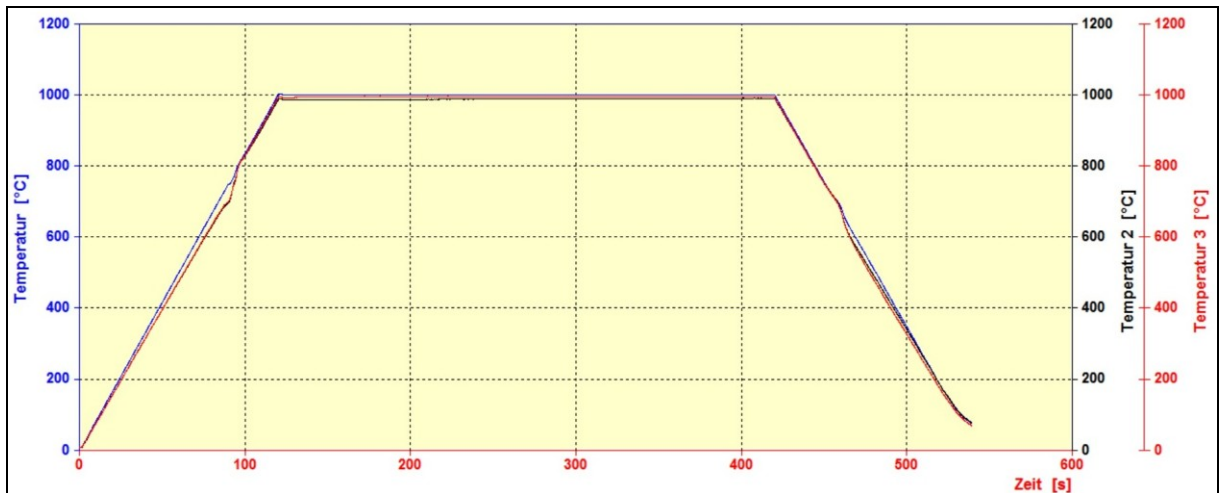


Abb. 5.4: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Vorversuch 11

Am Ende der Vorversuchsreihe wurden Versuche mit dem Temperaturprofil aus Abbildung 4.7 ohne eine Umformung für eine Temperatur von 850°C durchgeführt. Zusätzlich wurde für einige Versuche die Aufheizzeit von 100s auf 6min erhöht, um einen möglichen Einfluss dieser auf den Temperaturverlauf untersuchen zu können. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse eines Vorversuches mit dieser langsameren Aufheizgeschwindigkeit.

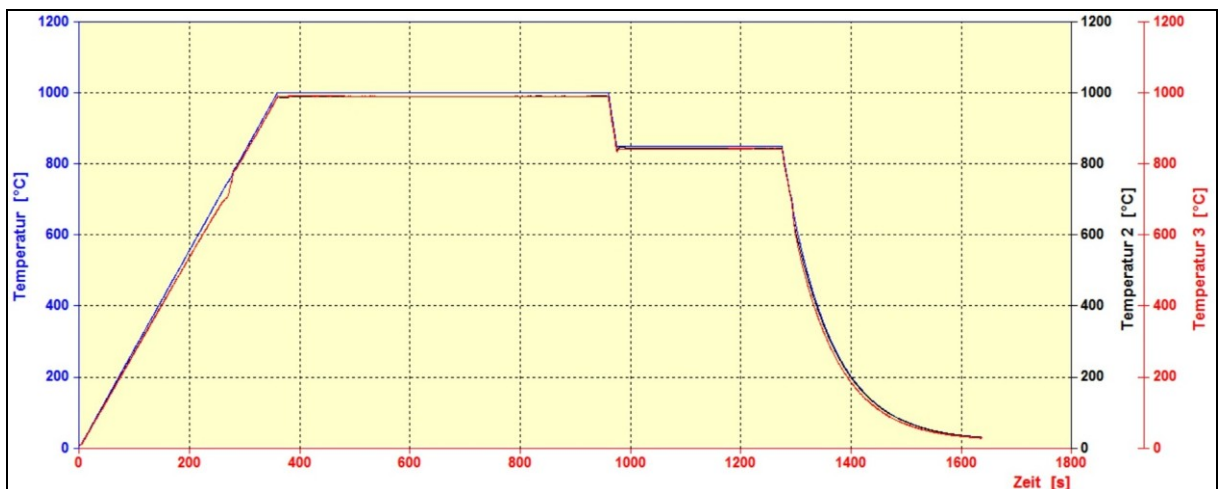


Abb. 5.5: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Vorversuch 15

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 5.6 den Temperaturverlauf eines Versuchs mit einer Aufheizzeit von 100s. In beiden Fällen kommt es zu einer gleichmäßigen Erwärmung der Probenmitte wie am Verlauf der aufgezeichneten Thermoelementdaten zu sehen ist. Während der Haltesegmente auf 1000°C und 850°C weichen die beiden Temperaturen 2 und 3 nur um wenige °C von der Solltemperatur 1 ab.



Abb. 5.6: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Versuch 00734

Die Dilatometerdaten und Ergebnisse der anschließend durchgeführten Versuche (siehe Tab. 4.3) wurden für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit herangezogen.

5.1.1 Abweichende Versuchsergebnisse

Bei manchen Versuchen trat beim Ausbau der Proben das Problem auf, dass sich diese nur unter erhöhtem Kraftaufwand aus der Kraftmesseinrichtung herausdrehen ließen. Dies führte im Fall der Probe Nr. 19 und Nr. 50 zu einer erheblichen Verformung im Prüfbereich. Des Weiteren erfolgte während der Datenaufzeichnung von Versuch 00735 ein Abbruch seitens des Systems aufgrund eines Bruchs der Thermoelemente. Nachdem durch Vorversuche, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, die Position der Spule optimiert wurde, erfolgte die Einschnürung dennoch bei zwei weiteren Versuchen mit den Proben Nr. 20 und Nr. 32 außermittig. Zudem wies der Druckversuch mit der Probe Nr. 38 vor dem Umformvorgang einen sehr großen Temperaturunterschied zwischen den beiden Thermoelementen T2 und T3 auf. Mit 35°C war dies zugleich der größte gemessene Temperaturunterschied der für die Reproduzierbarkeit herangezogenen Versuche.

Um etwaige Fehler bei der Probenvermessung bzw. Datenauswertung ausschließen zu können, wurde für diese abweichenden Versuchsergebnisse jeweils ein Ersatzversuch durchgeführt.

5.2 Reproduzierbarkeit der Versuche

Um die Reproduzierbarkeit der Dilatometerversuche untersuchen zu können, ist es hilfreich die aufgezeichneten Thermoelementdaten zu betrachten. Ihre Gegenüberstellung ermöglicht es, etwaige Temperaturgradienten zu bestimmen und in weiterer Folge deren Auswirkung auf die erhaltenen Daten bzw. Fließkurven zu interpretieren. Weiters können die Phasenumwandlungstemperaturen als Kriterien für die Reproduzierbarkeit herangezogen werden.

5.2.1 Bestimmung der Umwandlungstemperaturen

Das Versuchsmaterial zeigte jeweils, im 1. Segment bei Aufheizen und im letzten Segment, während der Abkühlung auf Raumtemperatur eine Phasenumwandlung.

In Abbildung 5.7 ist der Bereich der Phasenumwandlung beim Aufheizvorgang für Versuch 00746 zu sehen. Die Bildung von Austenit beginnt bei ca. 717°C und endet etwa bei 897°C, wenn die Kurve wieder einen konstanten Verlauf annimmt. Der Übergang des Dreiphasengebiets Perlit, Ferrit und Austenit in das Zweiphasengebiet Ferrit und Austenit ist definiert durch die Ac_{1e} Temperatur mit ca. 806,1°C.

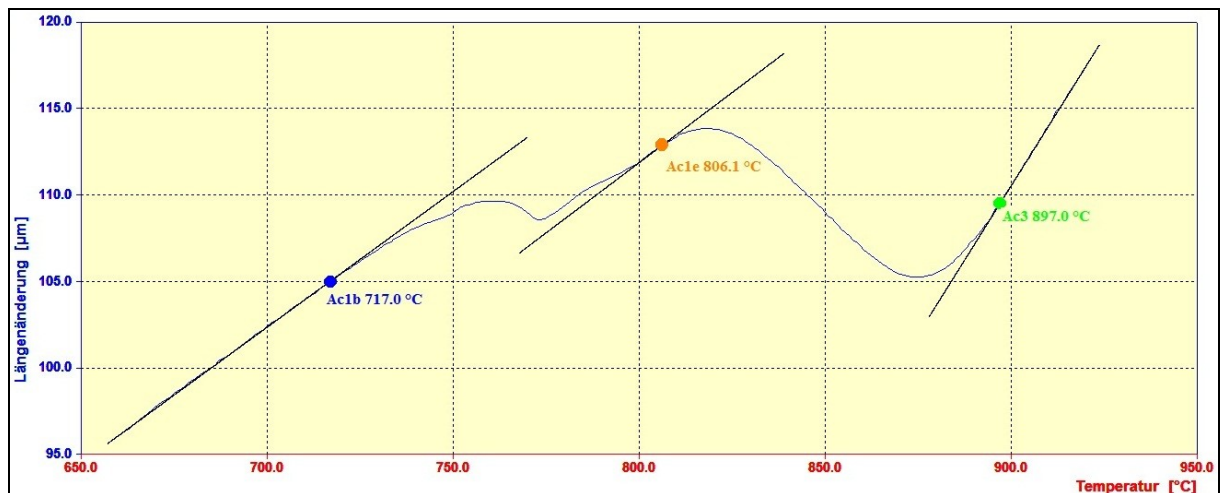


Abb. 5.7: Längenänderung der Probe [μm] vs. Temperatur [T]; Bereich der Phasenumwandlung in Segment 1 (Versuch 00746)

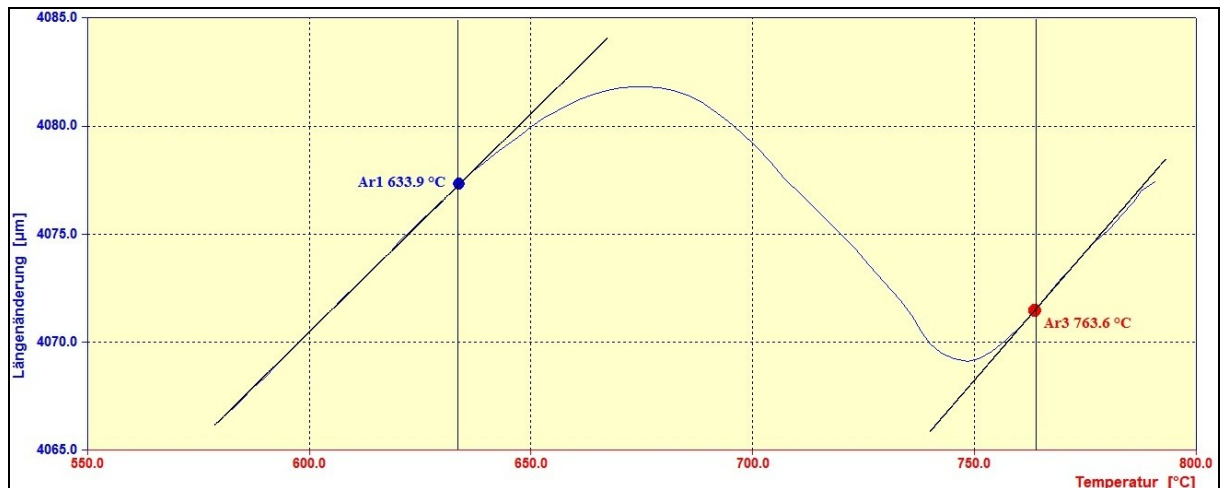


Abb. 5.8: Längenänderung der Probe [μm] vs. Temperatur [°C]; Bereich der Phasenumwandlung in Segment 7 (Versuch 00746)

Abbildung 5.8 zeigt den Bereich der Phasenumwandlung beim Abkühlvorgang in Segment 7 für Versuch 00746. Die Ar_3 Temperatur kennzeichnet den Beginn der Umwandlung des

Austenits in Ferrit beim Abkühlen und liegt hier bei etwa bei 763,6°C. Beendet ist die Umwandlung bei der Ar_1 Temperatur mit ca. 633,9°C.

Tabelle 5.1 fasst die gemittelten Temperaturen der Phasenumwandlungspunkte der für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit verwendeten Versuche zusammen.

Tab. 5.1: Zusammenfassung der Phasenumwandlungstemperaturen

	Ac_{1b}	Ac_{1e}	Ac_3	Ar_3	Ar_1
Zug; 800°C; 1mm/s	717,7°C	806°C	895,7°C	765,3°C	632°C
Zug; 850°C; 1mm/s	717,1°C	805,1°C	897,2°C	759,2°C	628,2°C
2*Zug; 850°C; 1mm/s	717,6°C	807,3°C	896,8°C	761,5°C	623,3°C
Zug; 900°C; 1mm/s	717,2°C	807,3°C	897,5°C	748,4°C	587,9°C
Zug; 1000°C; 1mm/s	717,6°C	805,4°C	895,3°C	734,2°C	514°C
Druck; 800°C; 1mm/s	718,4°C	805,9°C	896,2°C	767,5°C	603,4°C
Druck; 850°C; 1mm/s	716,7°C	807,4°C	897,6°C	766,7°C	600,2°C
Druck; 900°C; 1mm/s	718°C	806,8°C	896,9°C	745,7°C	563,1°C
Zug; 800°C; 5mm/s	718,9°C	805,3°C	894,7°C	760,8°C	628,4°C

	Ac_{1b}	Ac_{1e}	Ac_3	Ar_3	Ar_1
Zug; 850°C; 5mm/s	719,2°C	803,6°C	896°C	759°C	621,3°C
Zug; 900°C; 5mm/s	719,7°C	806,1°C	894,8°C	752,8°C	600,3°C
Zug; 1000°C; 5mm/s	718,9°C	804°C	895,9°C	733,4°C	509,6°C
Zug; 800°C; 10mm/s	715,5°C	805,7°C	894,4°C	767,3°C	630,3°C
Zug; 850°C; 10mm/s	719,5°C	806,5°C	896,5°C	757,6°C	621°C
Zug; 900°C; 10mm/s	714°C	803,7°C	893,1°C	746,6°C	561,4°C
Zug; 1000°C; 10mm/s	717,8°C	806,9°C	893,2°C	735,5°C	528,1°C

Die Ar_3 Temperatur verschiebt sich mit steigender Umformtemperatur zu niedrigeren Temperaturen, dies ist sowohl bei den Zug- und Druckversuchen der Fall. Auch die Erhöhung der Umformgeschwindigkeit bei den Zugversuchen hat vereinzelt eine Verschiebung der Umwandlungstemperatur hin zu höheren Temperaturen zur Folge.

5.2.2 Betrachtung der Temperaturunterschiede in den einzelnen Segmenten

5.2.2.1 Segment 1 und 2; Aufheizen auf 1000°C und 10min halten

Abbildung 5.9 zeigt den Verlauf der aufgezeichneten Temperaturen der drei Thermolemente T1, T2 und T3 für Versuch 00746 in Abhängigkeit der Zeit während des ersten Segments. Der Verlauf der Temperatur des Elements T1 (Regelement) ist blau, des Elements T2 ist schwarz und des Elements T3 ist rot eingezeichnet.

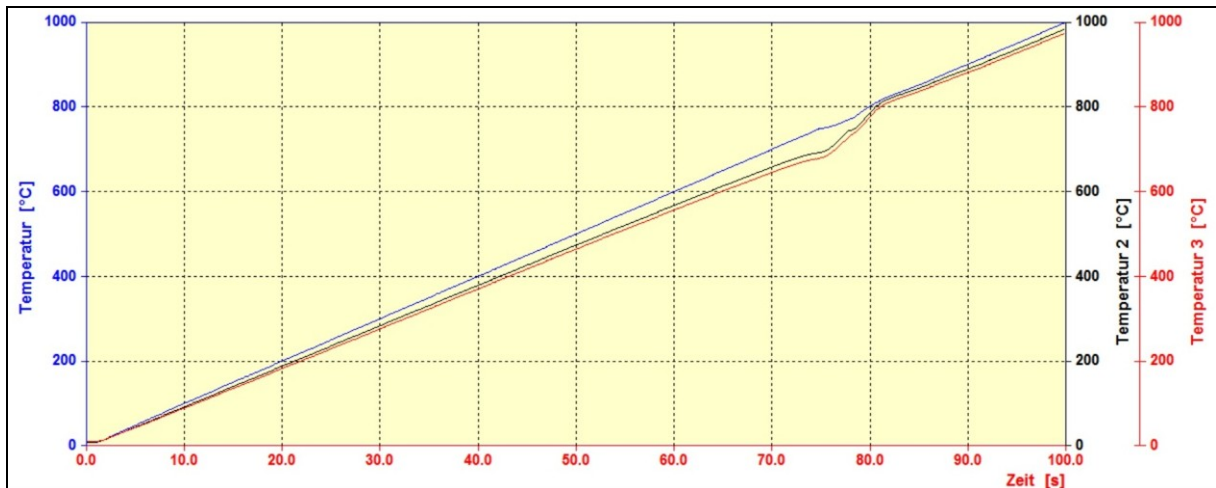


Abb. 5.9: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 1 für Versuch 00746

Bis zum Beginn der Phasenumwandlung, bei ca. 75s nach Start des Versuchs, wird der Unterschied zwischen der Solltemperatur und den aufgezeichneten Temperaturen der beiden Thermoelemente T2 und T3 immer größer. Letztendlich regelt das System mit Hilfe des HF-Generators nur die Temperatur des Thermoelements T1, dadurch ergibt sich bei gleicher Zeit ein niedrigerer Wert für die gemessenen Temperaturen der daneben angeschweißten Thermoelemente. Nach abgeschlossener Phasenumwandlung hat sich die Probe gleichmäßig erwärmt. Im Anschluss kann wieder der größer werdende Temperaturunterschied zwischen der Regeltemperatur und den Temperaturen 2 und 3 bis zum Ende des Segments bei 100s beobachtet werden.

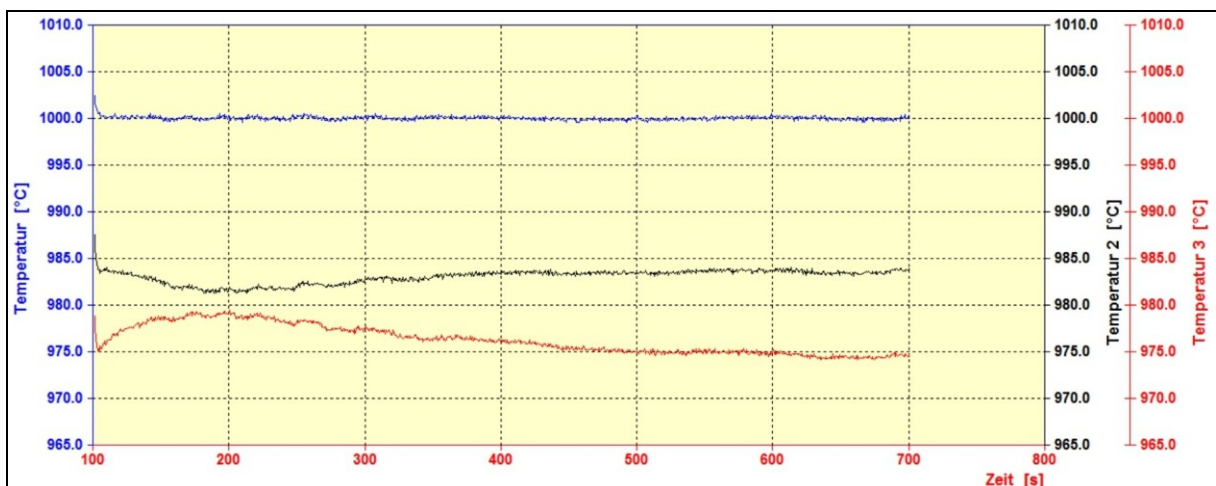


Abb. 5.10: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00746

Abbildung 5.10 zeigt, dass während der Haltedauer von 10min auf 1000°C die Temperatur in der Mitte der Probe konstant bleibt. Nach kurzer Zeit pendeln sich auch die beiden Temperaturen 2 und 3 auf ein konstantes Niveau ein, sodass sich am Ende von Segment 2 ein konstanter Temperaturgradient ausgebildet hat. T2 besitzt hier eine um 16,5°C und T3 eine

um $25,5^{\circ}\text{C}$ niedrigere Temperatur, dies entspricht einem Temperaturunterschied von 9°C und einer Abweichung von der Solltemperatur von $1,65\%$ für T2 und $2,55\%$ für T3.

Mit wenigen Ausnahmen ist der Temperaturverlauf, wie er in Abbildung 5.9 und 5.10 für die ersten beiden Segmente zu sehen ist, für alle Versuche sehr ähnlich. Einzig die Größe der Temperaturunterschiede variiert von Versuch zu Versuch. Abbildung 5.11 zeigt bspw. den Temperaturverlauf im zweiten Segment für Versuch 00754. Die Temperaturen 2 und 3 weichen hier am Ende des Haltesegments nur um $1,4\%$ von der Solltemperatur ab.

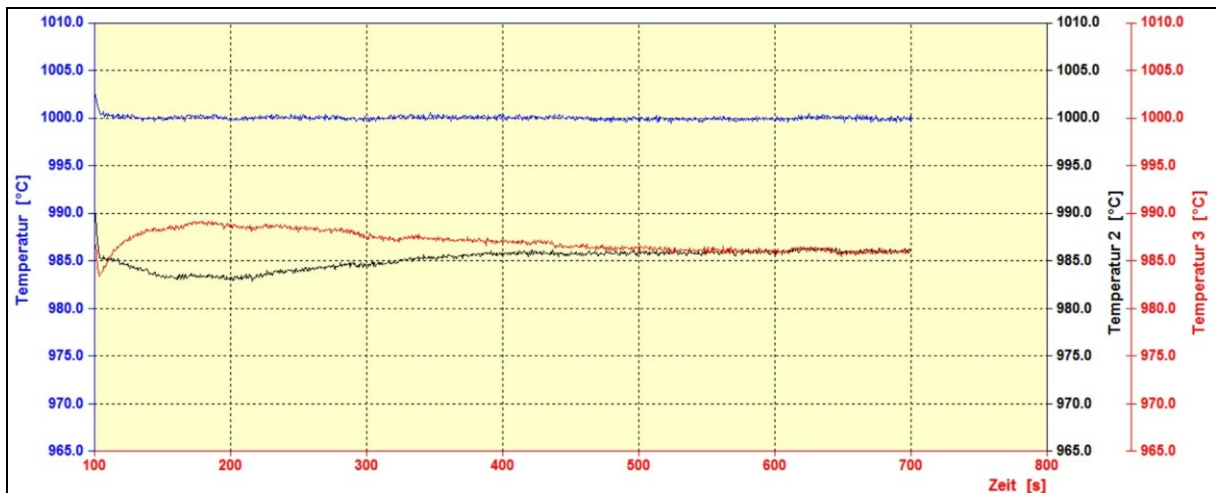


Abb. 5.11: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00754

Im Gegensatz dazu zeigen die Temperaturverläufe einzelner Versuche größere Abweichungen der Temperaturen 2 und 3 von der Solltemperatur bzw. sogar ein Übersteigen dieser. Abbildung 5.12 und 5.13 zeigen bspw. den Temperaturverlauf in Segment 1 und 2 für Versuch 00751.

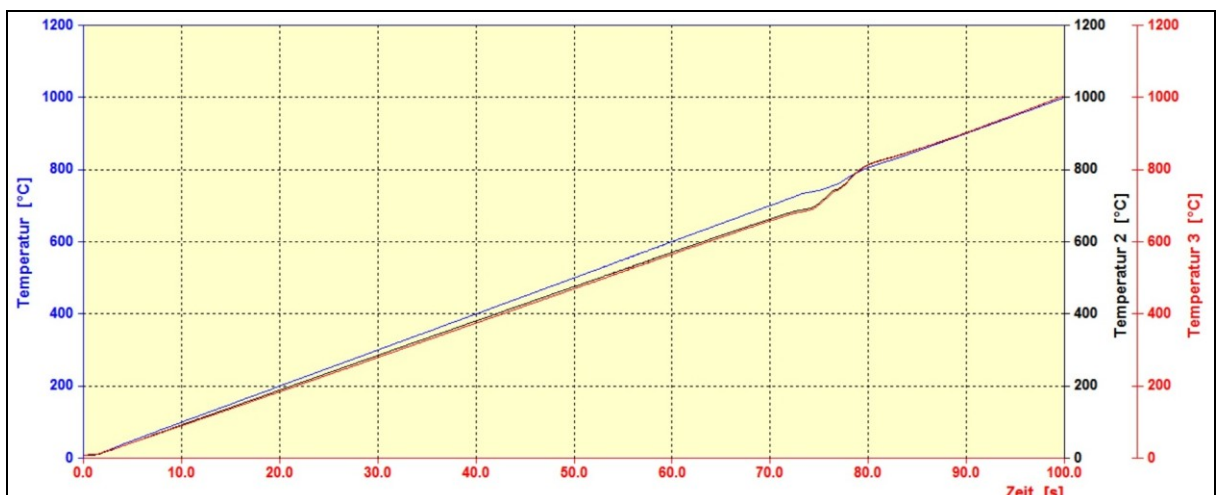


Abb. 5.12: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] vs. Zeit [s]; Segment 1 für Versuch 00751

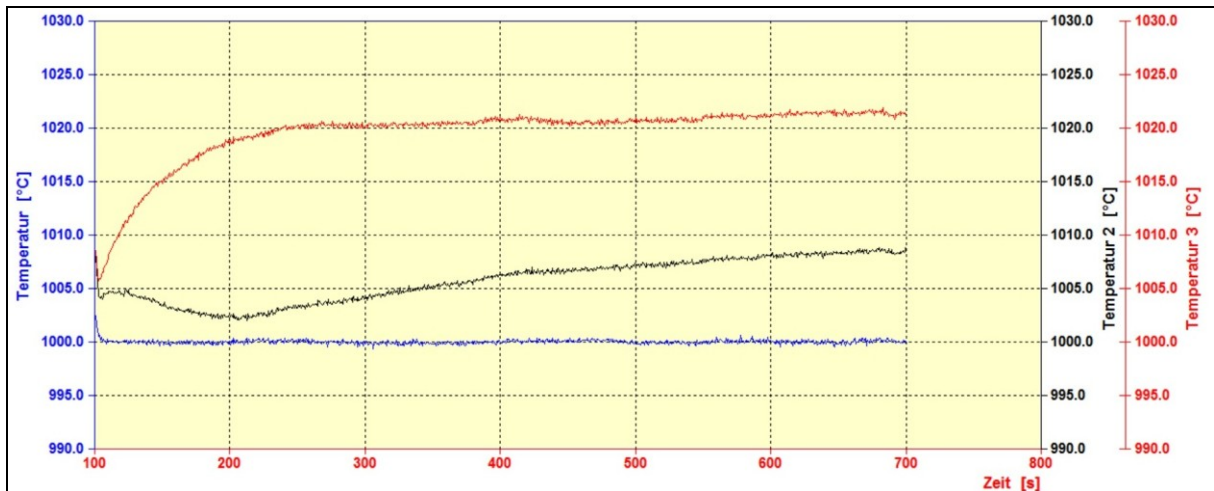


Abb. 5.13: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 2 für Versuch 00751

Auffällig ist hier, dass schon in Segment 1 nach der Phasenumwandlung die beiden Temperaturen 2 und 3 einen etwas höheren Wert als die eigentliche Regeltemperatur besitzen. Im anschließenden Haltesegment ist dies noch besser zu erkennen. Schließlich misst T2 am Ende des Segments eine Temperatur von 1008°C und T3 eine Temperatur von 1021°C.

5.2.2.2 Segment 3 und 4; Abkühlen auf Umformtemperatur und 5min halten

In Segment 3 erfolgt für die Versuche mit einer Umformtemperatur von 800°C, 850°C und 900°C eine Abkühlung von 1000°C auf die jeweilige Zieltemperatur. Im nachfolgenden vierten Segment wird die Probe 5min lang auf dieser Temperatur gehalten. Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen den Temperaturverlauf für das dritte und vierte Segment von Versuch 00746.

Wie in Abbildung 5.14 am Beginn des Segments bei 700s zu erkennen ist, stellt sich nach ein paar Sekunden eine konstante Abkühlgeschwindigkeit ein. Der Unterschied zwischen der Solltemperatur und Temperatur 3 bleibt nahezu konstant. Im Vergleich dazu nähert sich Temperatur 2 etwas besser an den Verlauf der Regeltemperatur an.



Abb. 5.14: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 3 für Versuch 00746

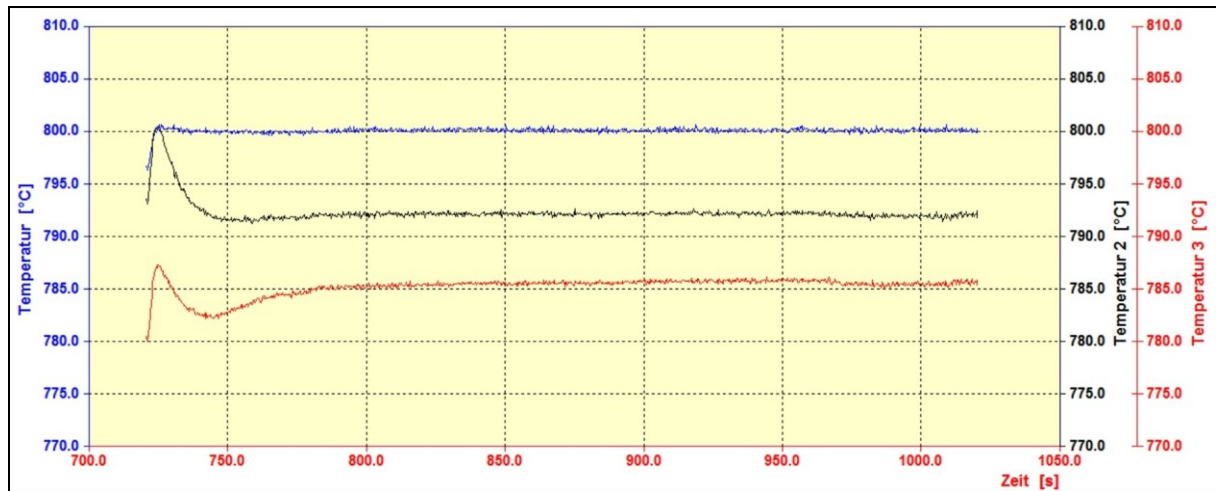


Abb. 5.15: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 4 für Versuch 00746

Wie in Abbildung 5.14 und 5.15 zu sehen, kommt es am Ende von Segment 3 und Beginn von Segment 4 bei 720s zu einer geringen Unterkühlung der Probenmitte wie am Verlauf der blauen Kurve zu erkennen ist. Der Abkühlvorgang endet zwar mit dem Segmentwechsel, dennoch nimmt die Solltemperatur erst nach kurzer Zeit in Segment 4 einen konstanten Wert an. An den Verläufen der Temperaturen 2 und 3 zu Beginn des Segments ist auch gut das zusätzliche Heizen des HF-Generators zu erkennen. Nach kurzer Zeit kommt es wie schon in Segment 2 zur Ausbildung eines konstanten Temperaturgradienten. Der Temperaturunterschied zwischen T2 und T3 beträgt schließlich am Ende des Segments und zu Beginn der Umformung 6,5°C. T2 weicht um 8°C und damit 1% und T3 um 14,5°C und damit 1,81% von der Solltemperatur ab.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 5.16 den Temperaturverlauf für das dritte und vierte Segment für Versuch 00751.

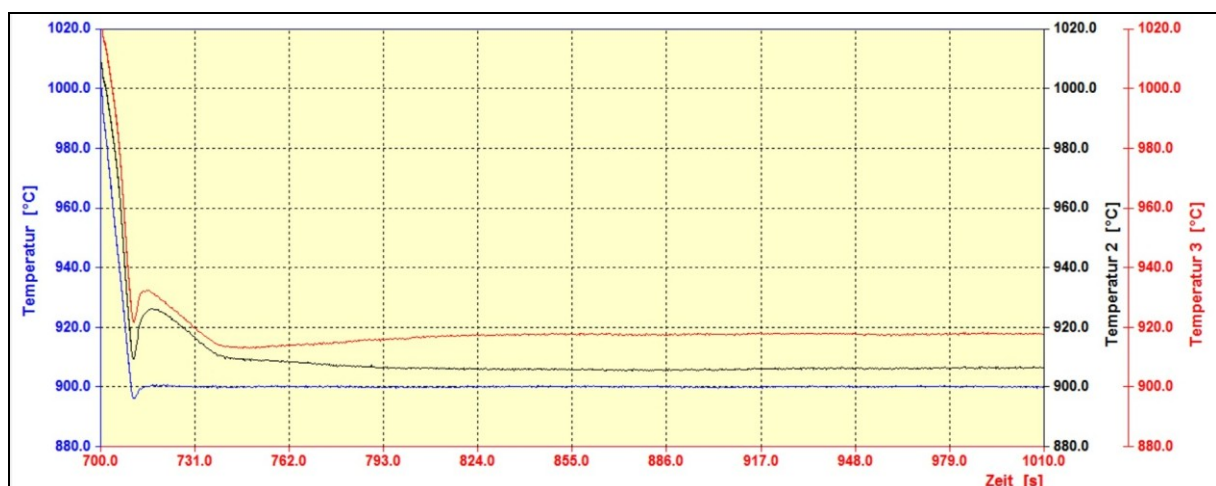


Abb. 5.16: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 3 und 4 für Versuch 00751

Auch hier kommt es während des Abkühlens auf 900°C zu keinem Temperatenausgleich. Im Segment 4 nehmen die drei Temperaturen nach kurzer Zeit wieder einen konstanten Verlauf an. Wie auch schon im Segment 2 für diesen Versuch, besitzen die Temperaturen 2 und 3 einen höheren Wert als die Solltemperatur.

Bei der Auswertung der Daten zeigte sich, dass es bei allen Versuchen mit Beginn des vierten Segments zu einer geringen Unterkühlung der Probenmitte kommt und in weiterer Folge wie auch schon für Segment 2 zur Ausbildung eines konstanten Temperaturprofils. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass es während des Heizens durch den HF-Generator bei manchen Versuchen geschah, dass die Temperaturen 2 und 3 für kurze Zeit einen höheren Wert als die der Solltemperatur annahmen. Abbildung 5.17 zeigt exemplarisch den Segmentwechsel von 3 auf 4 für Versuch 00765. Hier übersteigt Temperatur 2 am Beginn des Segments kurzzeitig die Umformtemperatur mit 850°C bevor sie wieder sinkt und einen konstanten Wert annimmt.

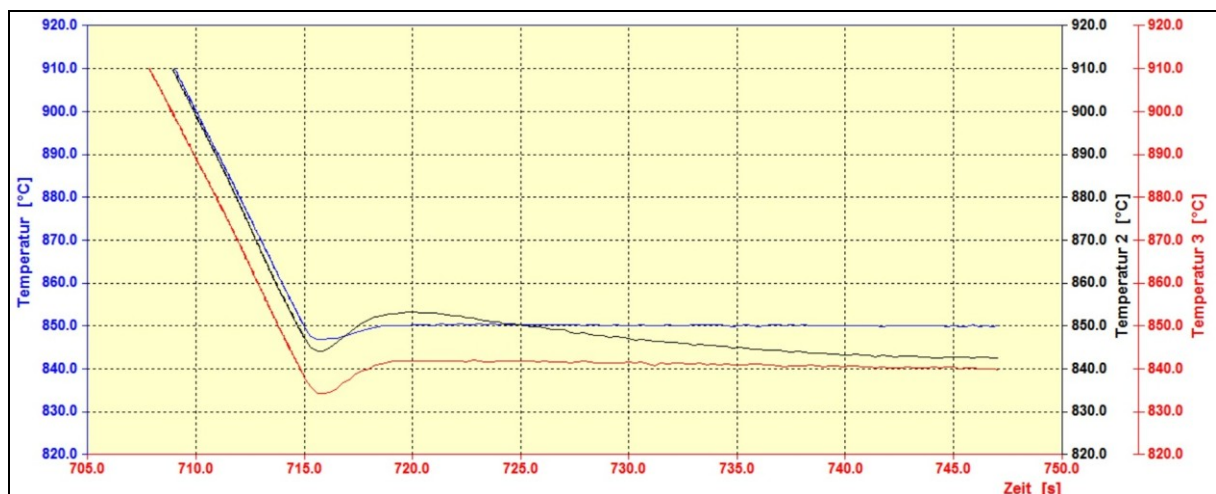


Abb. 5.17: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 3 und 4 für Versuch 00765

5.2.2.3 Segment 5, 6 und 7; Umformen, 10s halten Abkühlung auf 30°C

In Segment 5 erfolgt die Umformung bei entsprechender Umformtemperatur. Im anschließenden Segment 6 wird die Temperatur 10s lang gehalten bevor in Segment 7 auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Für Versuche mit einer Umformtemperatur von 1000°C entspricht das Umformsegment der Segmentnummer 3, da es bei diesen Versuchen kein Abkühlen auf eine Umformtemperatur mit anschließendem Haltesegment gibt.

Abbildung 5.18 zeigt den Temperaturverlauf in Segment 5 und 6 für Versuch 00750 stellvertretend für alle Zugversuche mit einer Umformgeschwindigkeit von 1mm/s.

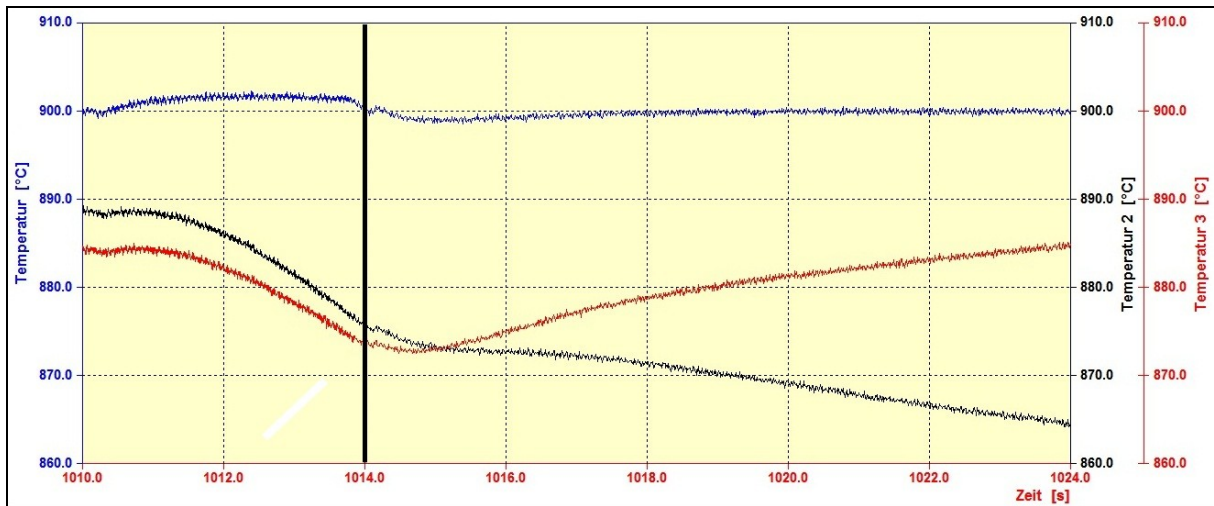


Abb. 5.18: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00750

Der Umformvorgang startet bei 1010s und endet bei 1014s. Die beiden Temperaturen 2 und 3 nehmen während des Umformvorganges ab. Temperatur 3 nimmt im anschließenden Haltesegment wieder zu, während Temperatur 2 konstant abfällt. Die Solltemperatur bleibt stattdessen während der Umformung annähernd konstant, wie an der blauen Temperaturkurve zu erkennen ist. Nach dem 10s dauernden Haltesegment erfolgt die Abkühlung auf Raumtemperatur bei 1024s.

Im Vergleich dazu zeigen die Abbildungen 5.19 und 5.20 stellvertretend die Segmente 5 und 6 für Zugversuche mit einer Umformgeschwindigkeit von 5mm/s und 10mm/s.

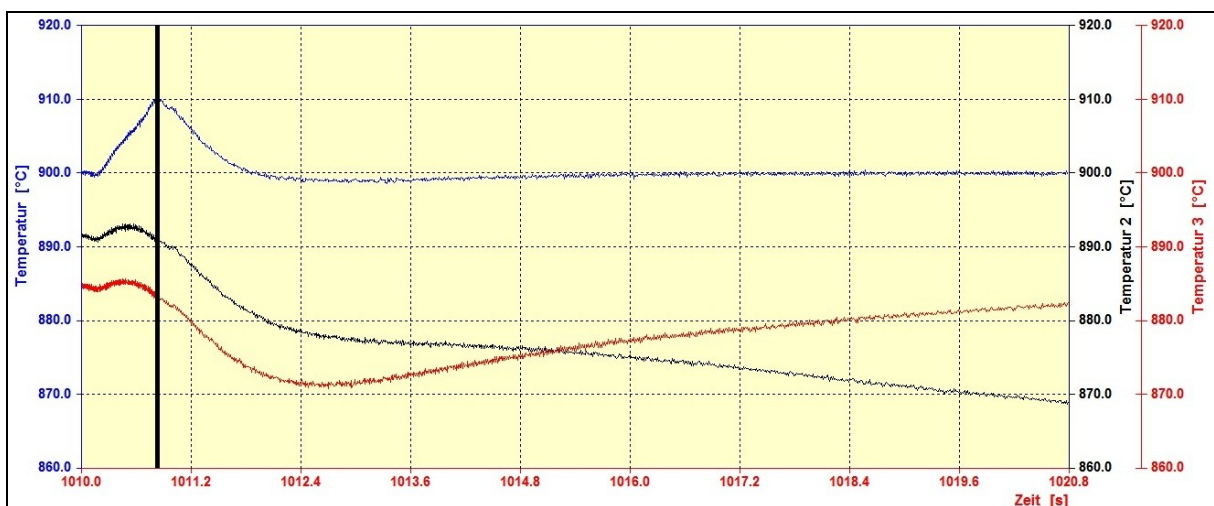


Abb. 5.19: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00781

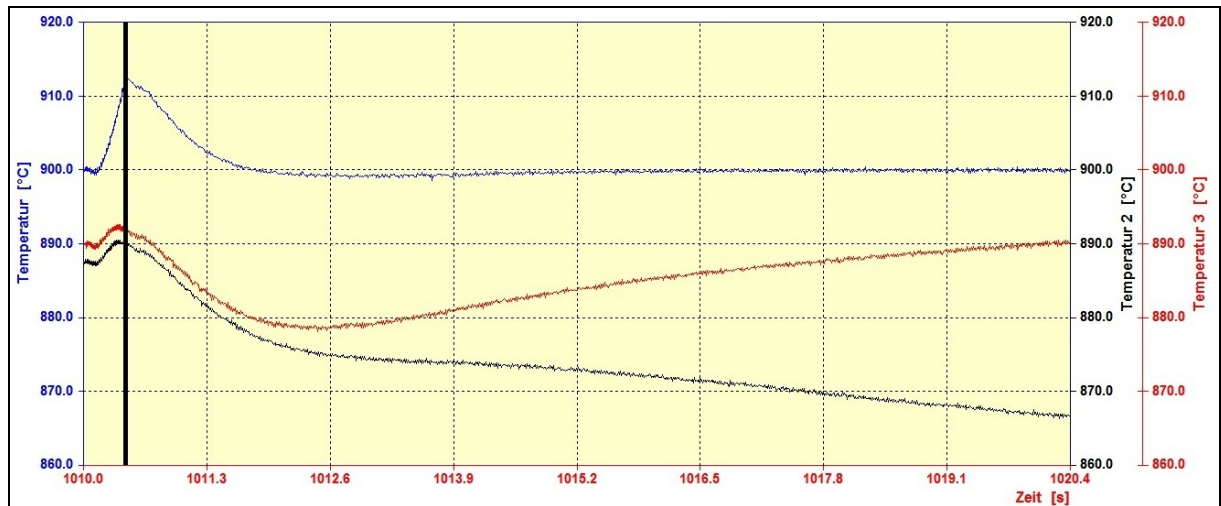


Abb. 5.20: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00777

Der Umformvorgang startet bei 1010s und endet bei 1010,8s in Abbildung 5.19, bzw. bei 1010,4s in Abbildung 5.20. Die Temperaturverläufe der Thermoelemente T2 und T3 zeigen das gleiche Verhalten, wie bei den Zugversuchen mit einer Umformgeschwindigkeit von 1mm/s. Sie erreichen während der Umformung einen Höchstwert und fallen anschließend wieder ab. Temperatur 3 nimmt im anschließenden Haltesegment wieder zu, während Temperatur 2 konstant abfällt. In den Abbildungen 5.19 und 5.20 ist anhand des Verlaufs der blauen Kurve der Temperaturanstieg von 10°C bzw. 11,5°C während der Umformung in der Umformzone gut zu erkennen. Nach der Umformung nimmt die Solltemperatur im anschließenden Haltesegment wieder einen konstanten Wert von 900°C an. Schließlich erfolgt die Abkühlung auf Raumtemperatur.

Stellvertretend für alle Druckversuche zeigt Abbildung 5.21 den Temperaturverlauf während der Segmente 5 und 6 für Versuch 00770.

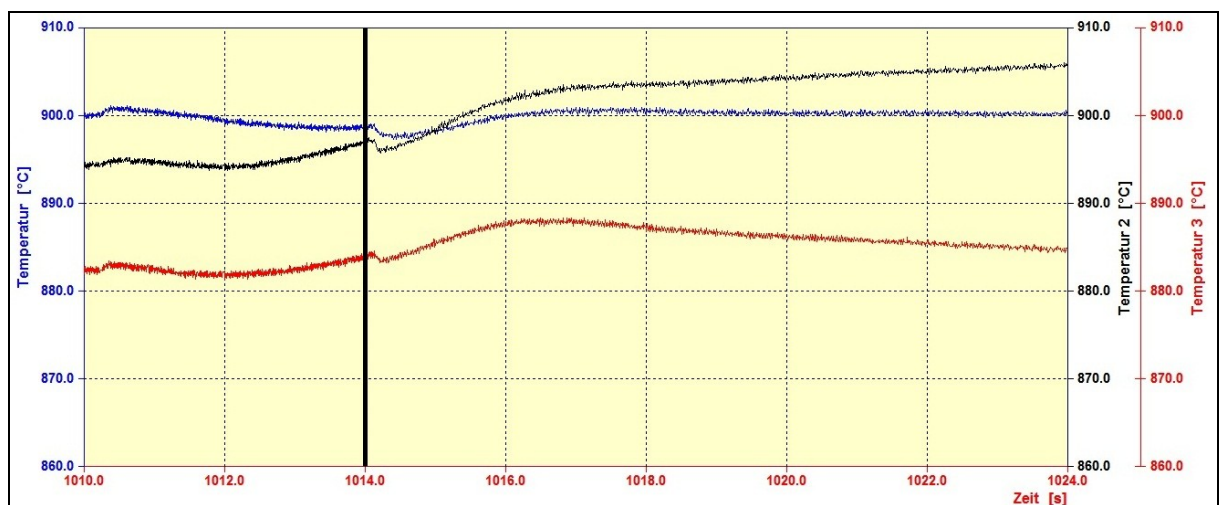


Abb. 5.21: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 5 und 6 für Versuch 00770

Der Umformvorgang in Abbildung 5.21 startet bei 1010s und endet bei 1014s. Die Temperaturen 1 bis 3 nehmen am Anfang des Umformvorganges zu und fallen dann aber wieder ab. Gegen Ende der Umformung messen die Thermoelemente T2 und T3 wieder ein Temperaturanstieg. Die Temperaturen 1 und 3 fallen im anschließenden Haltesegment nach dem Erreichen eines Höchstwertes ab bzw. Temperatur 1 gleicht sich an die Umformtemperatur an. Temperatur 2 nimmt hier leicht stetig zu. Im Gegensatz zu den aufgenommenen Thermoelementdaten der Zugversuche kam es bei den Druckversuchen nicht zu einem übersteigen der Solltemperatur durch die Temperaturen 2 und 3. Größere Abweichungen der Temperaturen, der beiden Thermoelemente T2 und T3, von der Solltemperatur konnten dennoch beobachtet werden.

Einen signifikanten Temperaturverlauf zeigen die Zugversuche mit einer zweistufigen Umformung bei 850°C. Auffällig ist hier, dass sich nach der ersten Umformung ein großer Temperaturunterschied zwischen den Thermoelementen T2 und T3 einstellt. Diese Beobachtung wurde bei allen drei Versuchen mit diesen Parametern gemacht. Abbildung 5.22 zeigt den Temperaturverlauf in den Segmenten 5 bis 8 für Versuch 00742. Segment 5 entspricht einer Umformung von 2mm, Segment 6 einem Haltesegment von 3min, Segment 7 einer erneuten Umformung von 2mm mit anschließendem Segment 8 dem 10s dauernden Haltesegment vor der Abkühlung auf Raumtemperatur.

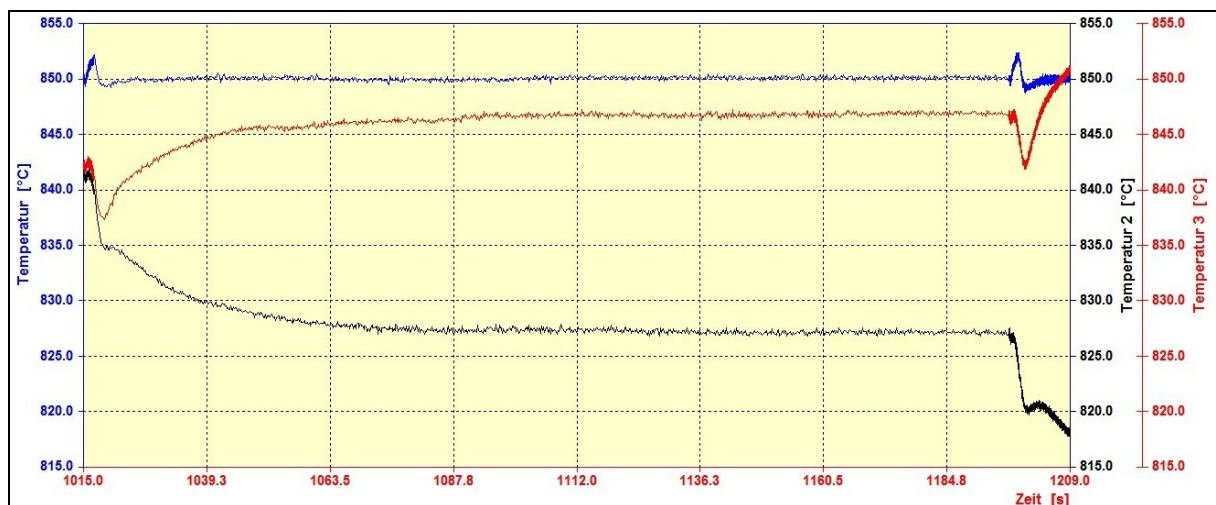


Abb. 5.22: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 5, 6, 7 und 8 für Versuch 00742

Der erste Umformvorgang startet bei 1015s und endet bei 1017s, die zweite Umformung startet nach 1197s und endet bei 1199s. Temperatur 2 und 3 fallen während der beiden Umformvorgänge ab und nehmen im 3min dauernden Haltesegment zwischen den Umformungen einen konstanten Wert an. Temperatur 1 bleibt stattdessen während der Umformung annähernd konstant, wie an der blauen Temperaturkurve zu sehen ist. Nach der zweiten Umformung und dem 10s dauernden Haltesegment erfolgt im letzten Segment die Abkühlung auf Raumtemperatur.

Stellvertretend für alle Versuche zeigt Abbildung 5.23 den Temperaturverlauf des Abkühlsegments 7 für Versuch 00746. Es konnte beobachtet werden, dass sich nach kurzer Zeit die Temperaturkurven angleichen, bis schließlich die Solltemperatur von 30°C erreicht wird und damit der Versuch beendet ist.

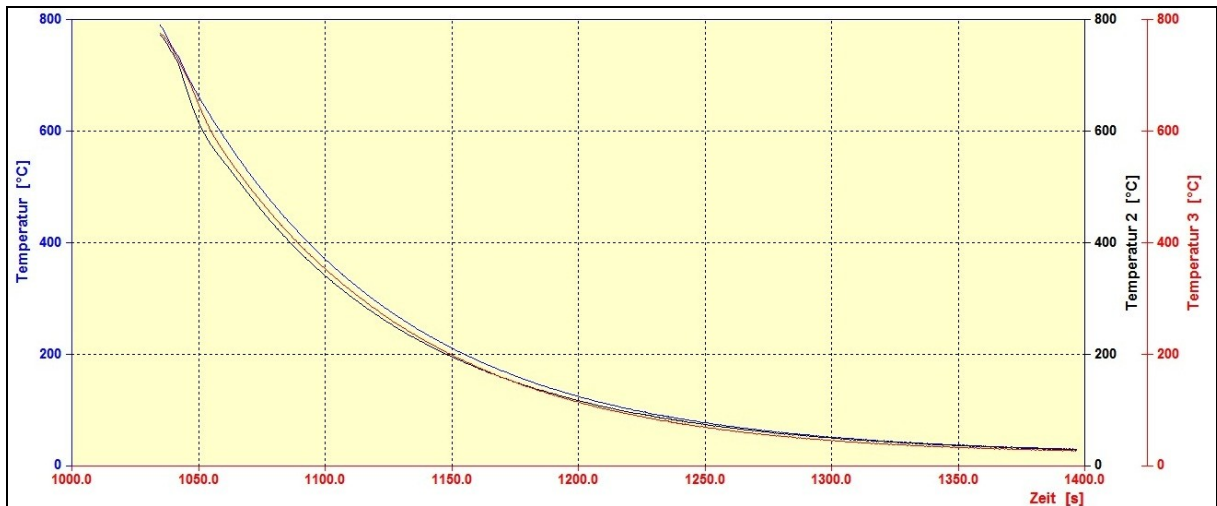


Abb. 5.23: Temperatur [°C] vs. Zeit [s]; Segment 7 für Versuch 00746

5.3 Ergebnisse der Probenauswertung und Fließkurvenbestimmung

5.3.1 Probenform nach Versuch

Die Untersuchung der Zugproben führte zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Probenform im Prüfbereich. Abbildung 5.24 zeigt Schlitze mit entsprechenden Proben. Die unterschiedliche Form der Proben (blaue Pfeile) ist deutlich zu erkennen.

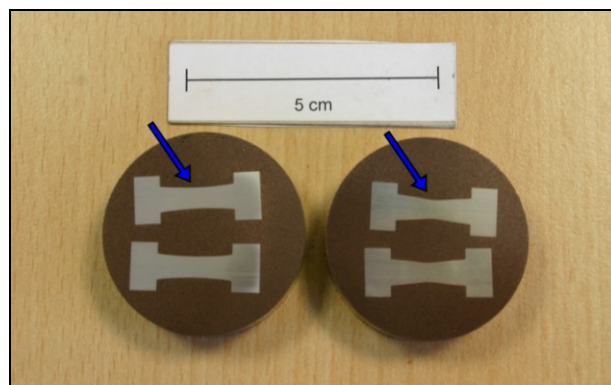


Abb. 5.24: Links: Schliff der Proben, die bei 800°C und 850°C umgeformt wurden; Rechts: Schliff der Proben der Umformtemperaturen 900°C und 1000°C

Die Proben im linken Schliff wurden bei 850°C bzw. 800°C und im rechten bei 1000°C bzw. 900°C mit 1mm/s umgeformt. Es kann eine deutliche Einschnürung der Proben nach Umformungen bei 900°C und 1000°C festgestellt werden. Bei den Umformtemperaturen

800°C und 850°C bildet sich, bei gleicher Dehnung, nahezu keine Einschnürung aus, es kommt nur zu einer Querschnittsverringeringung.

Wie in Abbildung 4.9 und 5.24 zu erkennen, hat die Probenverformung bei Zugversuchen keinen Einfluss auf einen möglichen Versatz der beiden Probenhälften. Dieser Fall tritt aber bei Druckversuchen auf. Es kommt zu einer Verschiebung der beiden Probenhälften aus der Längsachse. Um sicherzustellen, dass dieser Versatz nicht willkürlich auftritt, wurde eine zusätzliche Druckserie mit fünf Versuchen bei 850°C durchgeführt. In Abbildung 5.25 sind die fünf Proben dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die Verformung im Prüfbereich immer zu der gleichen Verschiebung der Probenhälften führt.

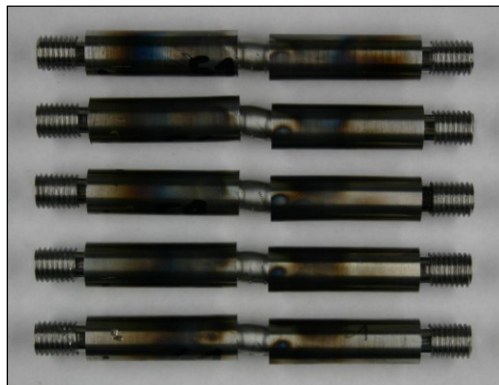


Abb. 5.25: Druckproben nach Umformen bei 850°C

5.3.2 Metallografie

Die Abbildungen 5.26 bis 5.28 zeigen repräsentative Gefügeaufnahmen des Versuchsmaterials nach einem Umformvorgang auf 800°C, 850°C und 900°C. In den Abbildungen 5.26 a) bis 5.28 a) ist das Gefüge jeweils bei 100x und in b) bei jeweils 1000x Vergrößerung nach einer Nitalätzung dargestellt. In den Abbildungen 5.26 b) bis 5.28 b) ist ein ferritisches (F)/ perlitisches (P)/ martensitisches (M) Gefüge zu erkennen. Die Aufnahmen stammen wie bereits in Abschnitt 4.3 beschrieben aus der Probenmitte.

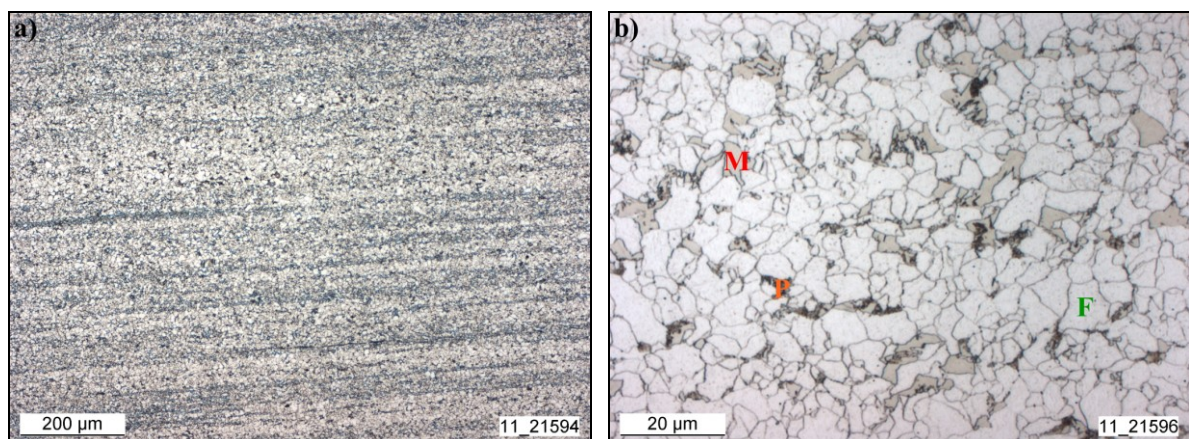


Abb. 5.26: Gefüge Versuch 00746 (Zug; 800°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x

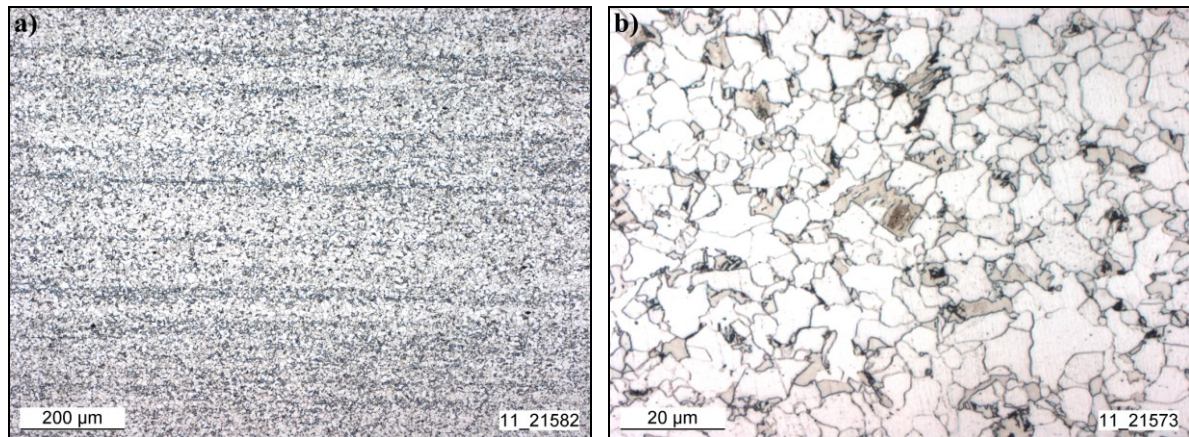


Abb. 5.27: Gefüge Versuch 00745 (Zug; 850°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x

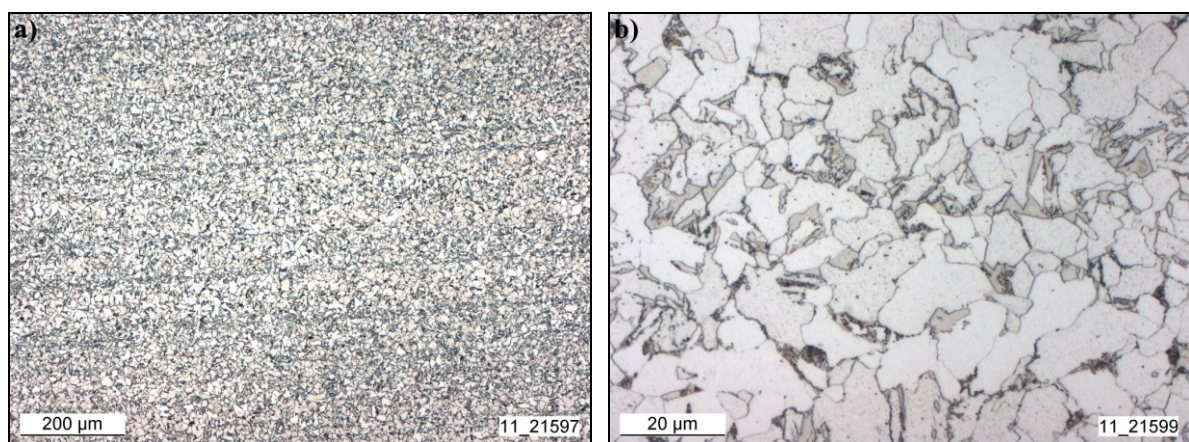


Abb. 5.28: Gefüge Versuch 00751 (Zug; 900°C; 1mm/s) Nitalätzung, a) 100x, b) 1000x

Die Gefügaufnahmen der Versuche bei 800°C (Abb. 5.26) und 850°C (Abb. 5.27) lassen einen polygonalen Ferrit erkennen. Vereinzelt weist das Gefüge der Versuche mit 900°C schon nadelförmigen Ferrit auf (Abb. 5.28).

Wie schon in Abschnitt 4.1 erwähnt, besitzt das Ausgangsgefüge eine Zeiligkeit die durch Seigerung und anschließendes Walzen erklärt werden kann. Dieses Gefügemerkmal ist auch nach den Umformversuchen in den Gefügaufnahmen bei 100x Vergrößerung für sämtliche Zug- als auch Druckproben deutlich erkennbar.

In Abbildung 5.29 sind die Gefügaufnahmen der drei Zugversuche bei 1000°C mit einer Umformgeschwindigkeit von 1mm/s bei 1000x Vergrößerung zu sehen. Abbildung 5.29 a) zeigt Versuch 00753, b) 00754 und c) Versuch 00755. Die Aufnahmen zeigen eine teilweise nadelige Ferritstruktur.

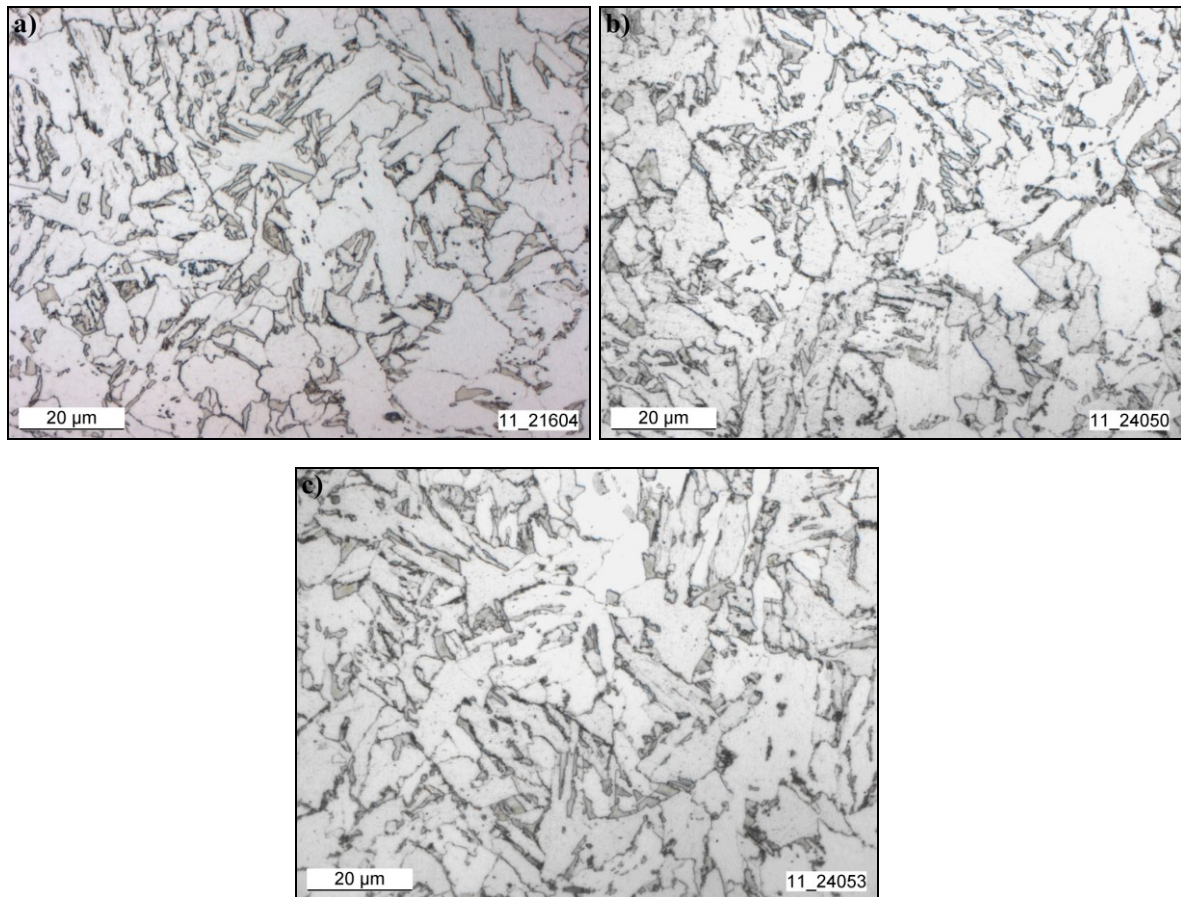


Abb. 5.29: Gefüge Zugversuche (1000°C; 1mm/s; 1000x Vergrößerung) Nitalätzung, a) 00753 b) 00754 c) 00755

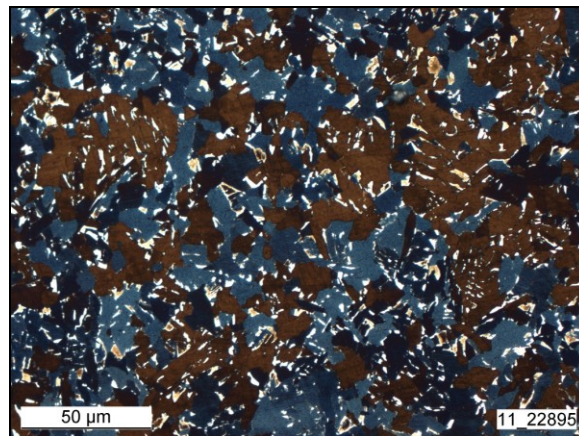


Abb. 5.30: Gefüge Versuch 00782 (Zug; 1000°C; 5mm/s) Klemmätzung; 500x

Abbildung 5.30 zeigt stellvertretend für alle Versuche das Gefüge nach einer Klemmätzung bei 500x Vergrößerung. Der Martensit ist weiß, dadurch kann mittels eines Analyseprogramms sein Anteil ermittelt werden. In Abhängigkeit vom Bildfeld in der Umformzone liegt bei allen Proben der Ferritanteil in etwa bei 90%, der Perlitanteil zwischen 2-3% und der Martensitanteil bei 8-11%. Die ermittelten Phasenanteile der nach Klemm

geätzten Proben entsprechen den, zu der orangen Abkühlkurve in Abbildung 4.2, passenden Phasenanteilen für Ferrit, Perlit und Martensit. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen für eine Umformtemperatur und zwischen den Versuchsreihen selbst festgestellt werden.

Die Tabellen 5.2 bis 5.5 fassen die Härte, die Korngrößenkennzahl G, die mittlere Kornfläche und den kleinsten bzw. dicksten Durchmesser der umgeformten Probe für alle Umformversuche zusammen. Zusätzlich sind die Auswertung der Versuche ohne eine Umformung auf 850°C und die des Grundzustandes (GZ) des Versuchsmaterials selbst angeführt.

Tab. 5.2: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 1mm/s

	<i>Ohne Umformung</i>	<i>800°C</i>	<i>850°C</i>	<i>850°C zweistufig</i>	<i>900°C</i>	<i>1000°C</i>	<i>GZ</i>
HV10	169	174	173	182	182	185	180
G	12,17	12,71	11,81	12,3	11,48	12,19	10,22
Mittlere Kornfläche [µm²]	28	19	36	26	45	28	108
Kleinster Ø [mm]	/	3,94	3,85	3,71	3,71	3,58	/

Tab. 5.3: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 5mm/s

	<i>Ohne Umformung</i>	<i>800°C</i>	<i>850°C</i>	<i>900°C</i>	<i>1000°C</i>	<i>GZ</i>
HV10	169	190	176	183	185	180
G	12,17	12,94	12,53	12,2	12,29	10,22
Mittlere Kornfläche [µm²]	28	16	22	28	26	108
Kleinster Ø [mm]	/	3,93	3,89	3,84	3,69	/

Tab. 5.4: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und kleinster Durchmesser der Probe; Zugversuche 10mm/s

	<i>Ohne Umformung</i>	<i>800°C</i>	<i>850°C</i>	<i>900°C</i>	<i>1000°C</i>	<i>GZ</i>
HV10	169	200	186	192	198	180
G	12,17	12,83	12,46	12,28	12,38	10,22
Mittlere Kornfläche [µm²]	28	18	23	26	24	108
Kleinster Ø [mm]	/	3,92	3,87	3,81	3,75	/

Tab. 5.5: Zusammenfassung Härte HV10, Korngrößenkennzahl G, mittlere Kornfläche und dickster Durchmesser der Probe; Druckversuche 1mm/s

	<i>Ohne Umformung</i>	<i>800°C</i>	<i>850°C</i>	<i>900°C</i>	<i>GZ</i>
HV10	169	178	167	172	180
G	12,17	13,18	12,39	12,19	10,22
Mittlere Kornfläche [µm²]	28	14	24	28	108
Kleinster Ø [mm]	/	6,33	6,44	6,49	/

Der kleinste bzw. dickste Durchmesser wurde mit einer Schublehre im Bereich der Probenmitte gemessen. Die höchste Korngrößenkennzahl stellte sich für jede Versuchsreihe bei den Versuchen mit einer Umformtemperatur von 800°C ein, die kleinste bei einer Umformtemperatur von 900°C. Aufgrund der vorhin erwähnten Zeiligkeit, soll hier bemerkt werden, dass die Korngrößenkennzahl von Bildfeld zu Bildfeld variiert und deshalb maximal Tendenzen bezüglich des Einflusses der Umformparameter abgelesen werden können. So zeigt sich in Bezug auf Tabelle 5.2, 5.3 und 5.4, dass bei den Zugversuchen mit steigender Umformgeschwindigkeit von 1 auf 5 bzw. 10mm/s, die Korngröße kleiner wird. Einzig der Vergleich der Korngrößenkennzahlen für die Umformgeschwindigkeiten von 5 und 10mm/s bei 800°C und 850°C zeigt eine Ausnahme. Für 5mm/s wurde im Vergleich ein höherer Wert der Korngrößenkennzahl ermittelt. Dies spiegelt sich jedoch nicht in den ermittelten

Härtewerten wider, da das Material mit der größeren Korngrößenkennzahl das feinere Gefüge und damit eine höhere Härte besitzen sollte. Die Proben der Zugversuche, die mit 1mm/s bei 800°C und 850°C umgeformt wurden, weisen ebenfalls eine höhere Korngrößenzahl und damit feineres Gefüge auf, als jene Proben, die bei 900°C und 1000°C umgeformt wurden. Es wäre auch hier zu erwarten, dass deren Härtewerte höher liegen. Dies ist jedoch nicht der Fall, siehe Tabelle 5.2.

5.3.3 Fließkurven

Die Abbildungen 5.31 bis 5.44 zeigen die gemessenen Fließkurven der Versuche mit den verschiedenen Versuchsparametern. Anzumerken ist hier, dass die Längenänderung bei der Druckumformung einen negativen Wert annimmt. Damit ändern sich automatisch auch die Wertebereiche der aufgenommenen Fließkurven.

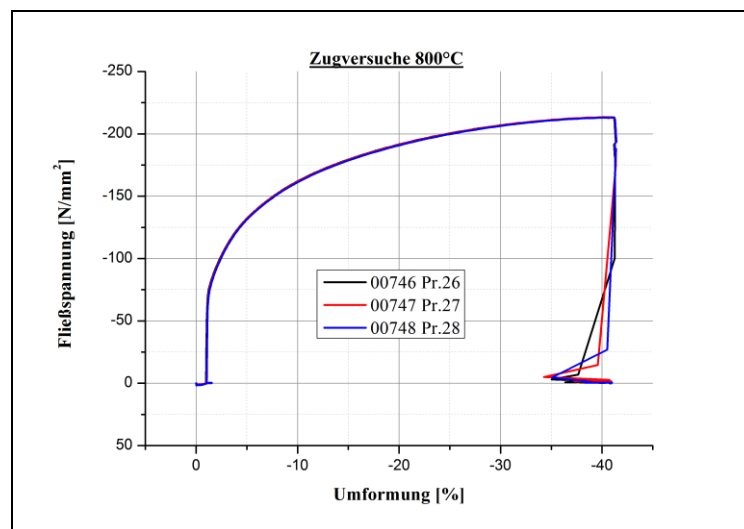


Abb. 5.31: Fließkurve; Zugversuche bei 800°C

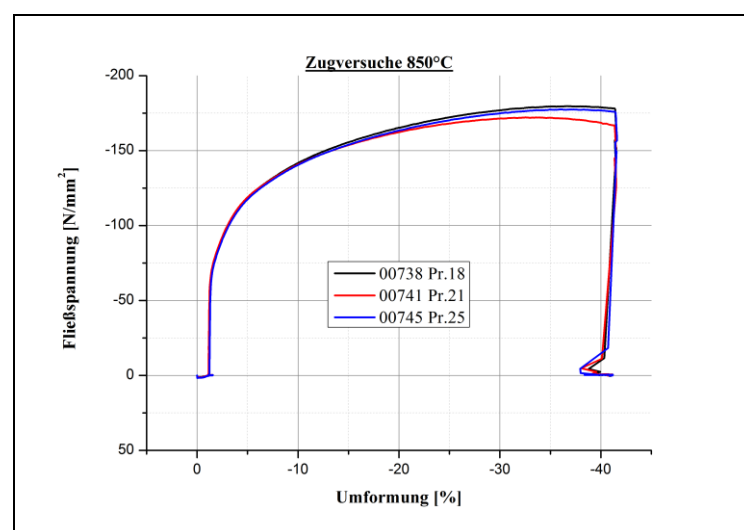


Abb. 5.32: Fließkurve; Zugversuche bei 850°C

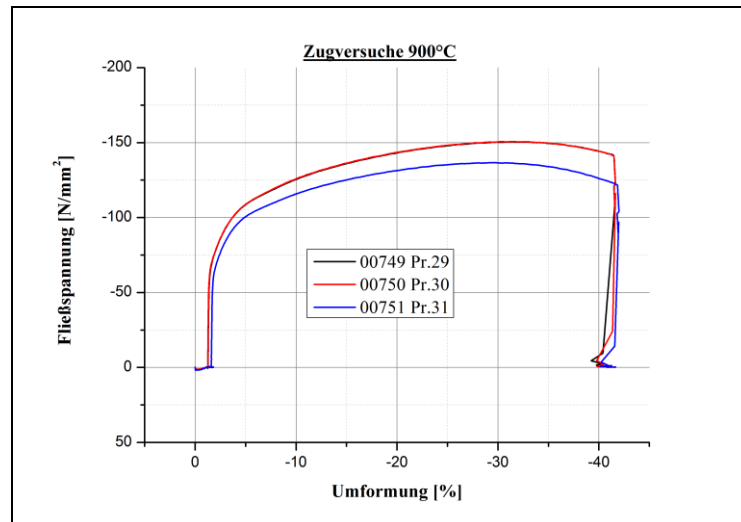


Abb. 5.33: Fließkurve; Zugversuche bei 900°C

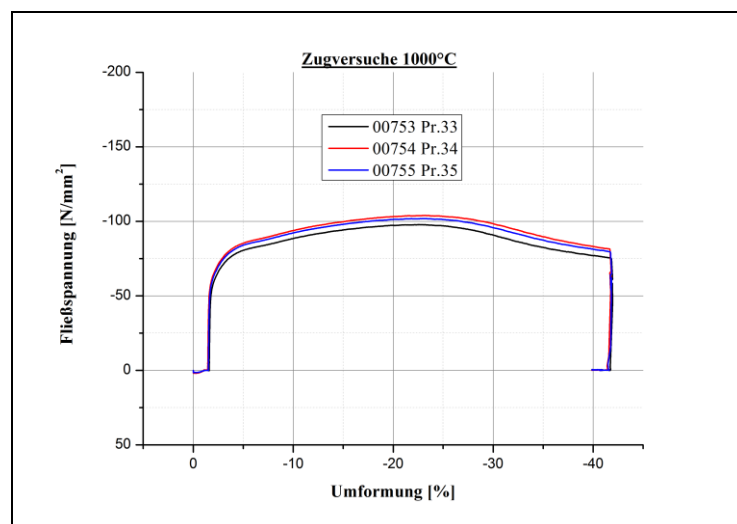


Abb. 5.34: Fließkurve; Zugversuche 1000°C

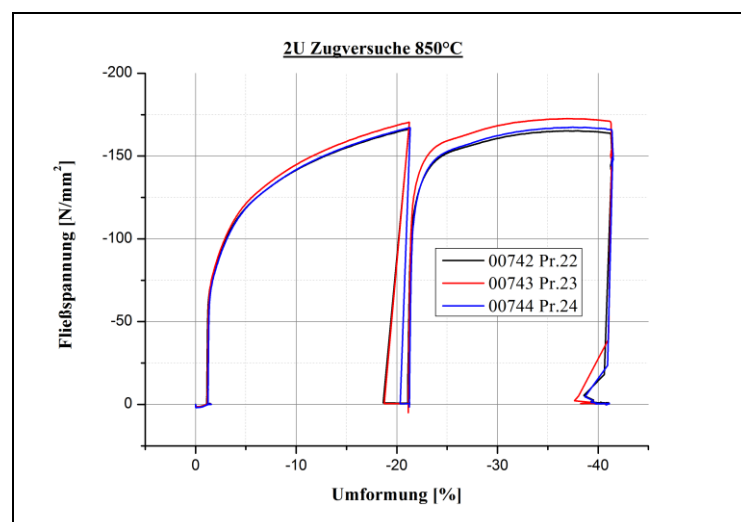


Abb. 5.35: Fließkurve; zweistufige Umformung bei 850°C

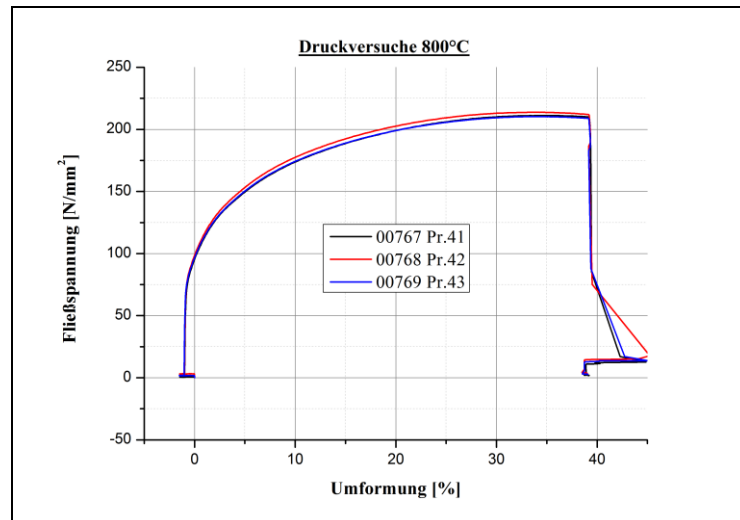


Abb. 5.36: Fließkurve; Druckversuche bei 800°C

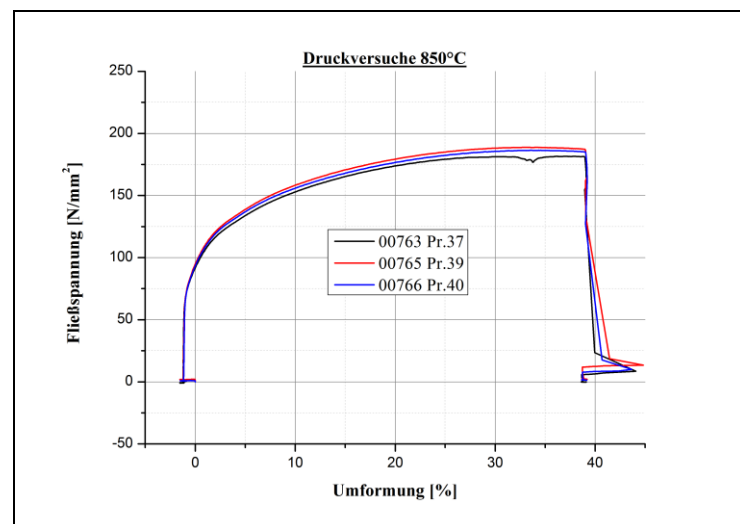


Abb. 5.37: Fließkurve; Druckversuche bei 850°C

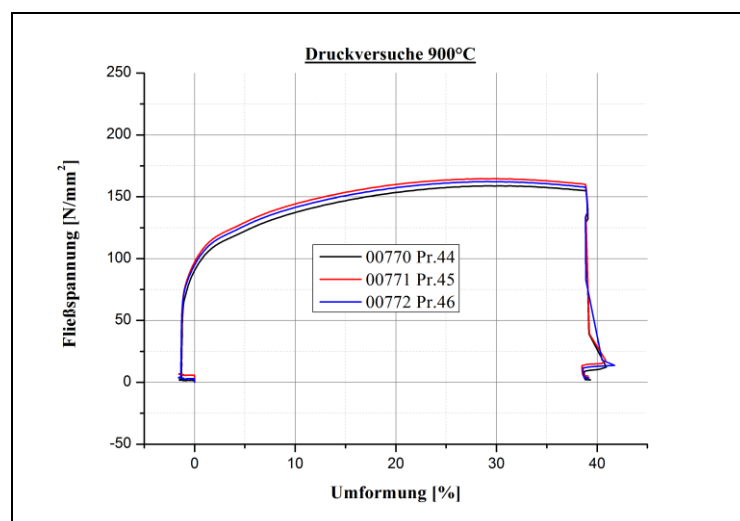


Abb. 5.38: Fließkurve; Druckversuche bei 900°C

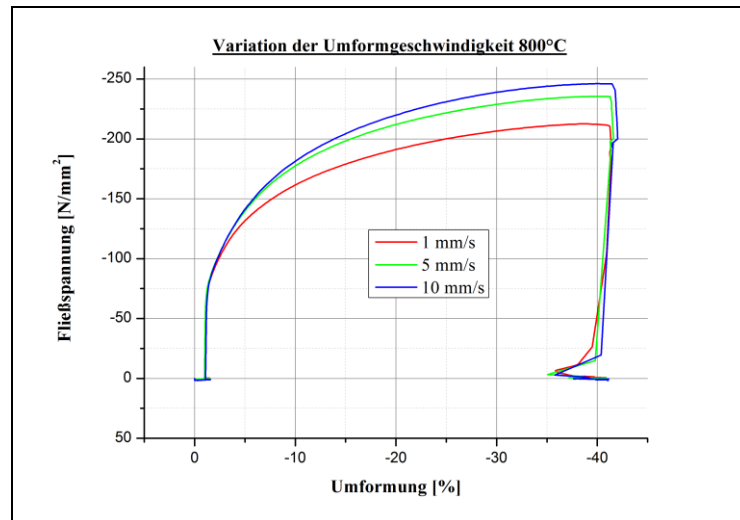


Abb. 5.39: Fließkurve; Zugversuche bei 800°C (verschiedenen Umformgeschwindigkeiten)

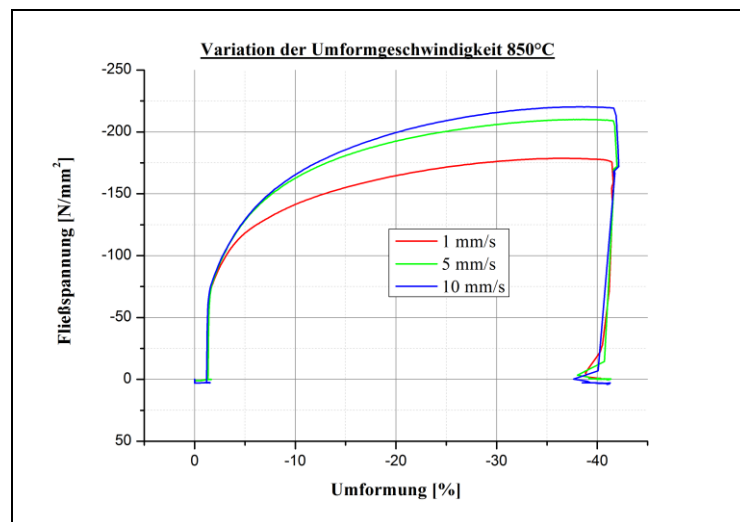


Abb. 5.40: Fließkurve; Zugversuche bei 850°C (verschiedenen Umformgeschwindigkeiten)

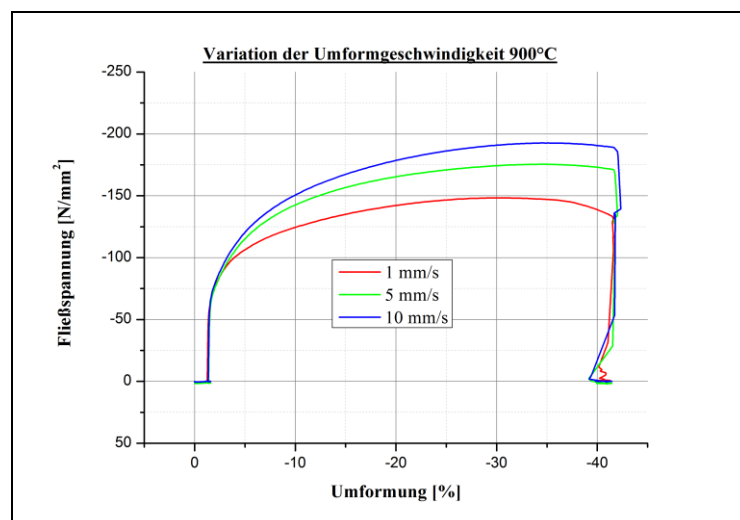


Abb. 5.41: Fließkurve; Zugversuche bei 900°C (verschiedenen Umformgeschwindigkeiten)

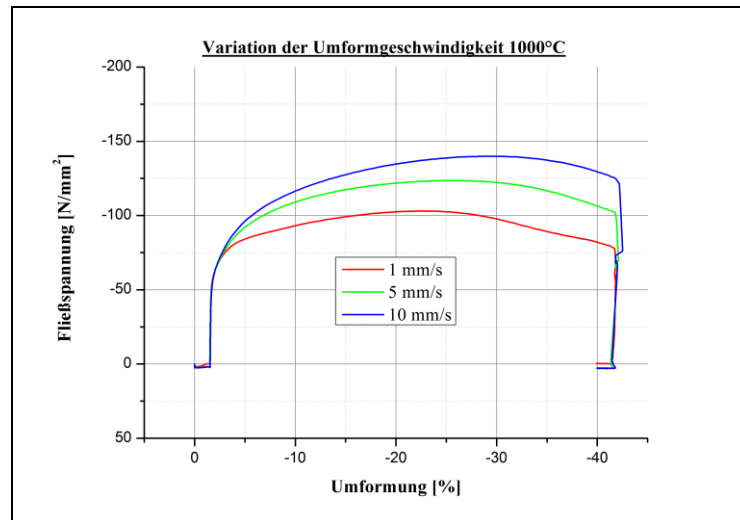


Abb. 5.42: Fließkurve; Zugversuche 1000°C (verschiedenen Umformgeschwindigkeiten)

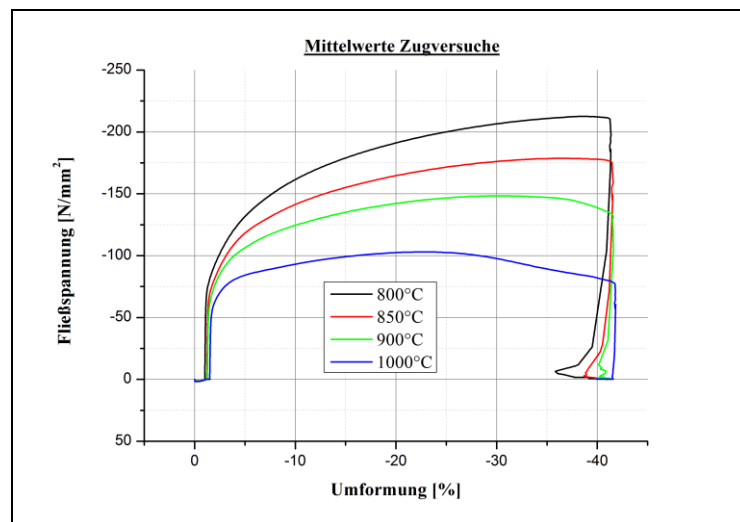


Abb. 5.43: Fließkurve; Zugversuche mit verschiedenen Umformtemperaturen

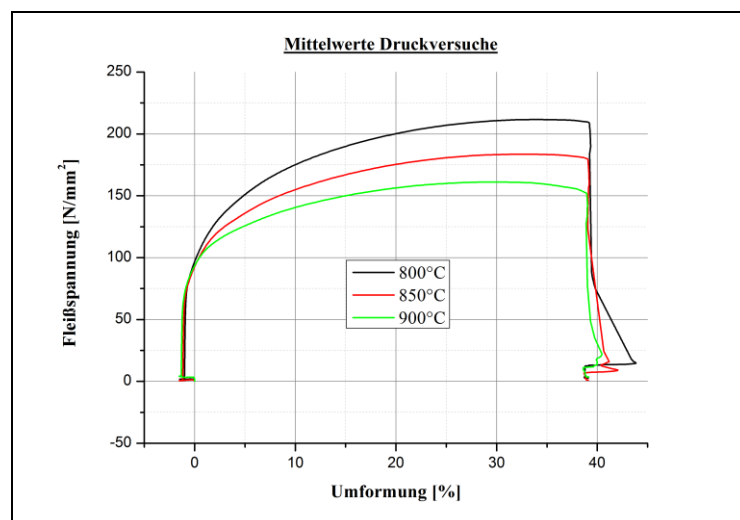


Abb. 5.44: Fließkurve; Druckversuche mit verschiedenen Umformtemperaturen

In Abbildung 5.31 ist eine gute Übereinstimmung der drei aufgenommenen Fließkurven der Zugversuche bei 800°C mit einer Umformgeschwindigkeit von 1mm/s zu erkennen, sie sind nahezu ident. Betrachtet man in weiterer Folge jeweils die drei Fließkurven der restlichen Zug-/Druckversuchsreihen fällt auf, dass diese nur mehr bedingt übereinstimmen. Teilweise kommt es zu einer signifikanten Abweichung einzelner Kurven, wie am Beispiel von Versuch 00741 in Abbildung 5.32 und Versuch 00751 in Abbildung 5.33 zu sehen ist. Bei gewissen Versuchsreihen weichen die drei Fließkurven stärker voneinander ab. In den Abbildungen 5.34 und 5.38 können die Fließkurven der einzelnen Versuche daher deutlich voneinander unterschieden werden. Für die Versuchsreihe in Abbildung 5.34 fällt darüber hinaus die Fließkurve für Versuch 00753 etwas stärker ab.

Vergleicht man die Form der Fließkurven für die einzelnen Umformtemperaturen kann man eindeutige Unterschiede erkennen. Die Fließkurven der Versuche für 800°C (Abb. 5.31 und 5.36) zeigen erst am Ende der Umformung ein Maximum der Fließspannung. Betrachtet man im Gegensatz dazu die Fließkurven der Versuche für 850°C (Abb. 5.32 und 5.37), 900°C (Abb. 5.33 und 5.38) und 1000°C (Abb. 5.34), kann man mit steigender Umformtemperatur die Verschiebung des Maximums zu niedrigeren Umformgraden erkennen. Besonders die Fließkurven für 1000°C zeigen ein sehr ausgeprägtes Maximum der Fließspannung, an dessen Anschluss ein Abfall auf ein annähernd konstantes Niveau erfolgt.

Eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit bei den Zugversuchen verschiebt dieses Maximum wieder zu höheren Umformgraden wie in den Abbildungen 5.39 bis 5.42 ersichtlich. Stellvertretend sei hier auf Abbildung 5.41 verwiesen. Anhand der drei hier abgebildeten Fließkurven ist gut zu erkennen, dass durch die Erhöhung der Umformgeschwindigkeit ein deutlicher Abfall der Fließspannung gegen Ende der Umformung unterdrückt und damit das Maximum nach rechts, hin zu höheren Umformgraden, verschoben wird.

In Abbildung 5.35 sind die Fließkurven der Versuche für eine zweimalige Umformung auf 850°C dargestellt. Auffallend ist hier, dass die Fließspannung am Beginn der zweiten Umformung deutlich niedriger ist als am Ende des ersten Umformvorgangs.

Am Beginn und am Ende jeder Fließkurve kann man Einschwingbereiche erkennen. Die dabei gemessene Umformung entspricht der Längenänderung der Probe während der Aufheiz- und Abkühlphasen.

6 Diskussion

Im diesem Kapitel werden Erkenntnisse und erhaltene Ergebnisse hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs erläutert. Zusätzlich werden die gerätespezifischen Beobachtungen während der Versuche und bei der Handhabung des Dilatometers dargelegt und versucht Lösungsansätze aufzuzeigen.

6.1 Reproduzierbarkeit und Versuchsanordnung

Der Vergleich der ermittelten Umwandlungstemperaturen Ac_{1b} , Ac_{1e} und Ac_3 beim Aufheizvorgang bestätigt eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche (siehe Tab. 5.1). Der Schwankungsbereich der gemessenen Temperaturen ist nur wenige °C. An dieser Stelle sei auf den Fehler, der durch den menschlichen Anwender bei der Ermittlung der Phasenumwandlungspunkte hinzukommt, hingewiesen.

Die Verwendung von 3 Thermoelementen ist bei Versuchen mit dem Zug-/Druckadapter aufgrund der speziellen Versuchsanordnung ausdrücklich zu empfehlen, da festgestellt wurde, dass es zu einer Abweichung der Messergebnisse kommen kann sobald der Temperaturunterschied über die Probenlänge zu groß oder aber die Erwärmung der Probe ungleichmäßig ist. Durch die Verwendung der 3 Thermoelemente ist gewährleistet, dass schon während des Versuchs mögliche Unstimmigkeiten bezüglich der Temperaturverteilung beurteilt bzw. deren Einfluss bei der Auswertung der Daten abgeschätzt werden kann. Auftretende Temperaturabweichungen von der Solltemperatur $\geq 2\%$ müssen als kritisch betrachtet werden.

Inwiefern sich signifikante Temperaturunterschiede während eines Versuches auf die aufgezeichneten Werte der Fließkurve und damit auf die Reproduzierbarkeit auswirken können zeigt Abbildung 5.33. Wie schon zuvor in Abschnitt 5.3.3 beschrieben weicht die Fließkurve für Versuch 00751 deutlich ab. Die Auswertung der Thermoelementdaten für diesen Versuch zeigt (Abb. 5.13 und 5.16) eine ungleichmäßige Probenerwärmung. Es traten in der Folge während der Umformung Temperaturen auf, die höher als die eigentliche Solltemperatur waren. Dies führt in der Regel zu einem Abfall der Werte für die entsprechende Fließkurve. Auch die Auswertung der Thermoelementdaten für Versuch 00741 zeigt, dass es während des Versuchs zum Auftreten erhöhter Temperaturen gekommen ist, was sich durch einen Abfall der Fließkurve in Abbildung 5.32 widerspiegelt.

Generell kann ein Abfall der Fließkurven in Abhängigkeit großer Temperaturunterscheide beobachtet werden. So liegt die Fließkurve für Versuch 00753 in Abbildung 5.34 klar unter den Kurven der beiden anderen Versuche. Die Auswertung der Thermoelementdaten für

diesen Versuch zeigen, dass Temperatur 2 zu Beginn der Umformung um 2,8% von der Solltemperatur abwich. Zwischen den Thermoelementen T2 und T3 bildete sich folglich ein Temperaturgradient von 23°C aus. Die Gefügeaufnahmen für diese Versuchsreihe in Abbildung 5.29 zeigen aber keine signifikanten Unterschiede. Auch die Auswertung der Daten der Druckversuche und ein anschließender Vergleich mit den Fließkurven zeigt diesen Sachverhalt.

Bei Zugversuchen mit zweistufiger Umformung kann beobachtet werden, dass die Halsbildung leicht rechts außerhalb der Mitte auftritt. Dies ist dadurch zu erklären, dass durch die erste Umformung die Probe aus der Idealposition der Spule herausgezogen wird und die zweite Umformung daher unter einer veränderten Probenposition erfolgt. Das wiederum führt zu einer ungleichmäßigen Erwärmung, wie auch anhand der Thermoelementdaten aus Abbildung 5.22 ersichtlich ist. Temperatur 2 nimmt demnach einen niedrigeren Wert an, da die Position von T2 nach der ersten Umformung nach links verschoben wird. Im Gegensatz dazu beginnt Temperatur 3 nach der ersten Umformung zu steigen, da sich die Position von T3 nach links, also mehr in Richtung der Spule verschiebt. Auch in den Abbildungen 5.18, 5.19 und 5.20, d.h. Zugversuche mit einmaliger Verformung, ist nach dem Umformschritt ein Anstieg von Temperatur 3 und ein Absinken von Temperatur 2 erkennbar. Es würde sich daher bei einer längeren Haltedauer ebenfalls ein solcher Temperaturverlauf, wie er in Abbildung 5.22 gezeigt ist, einstellen. Am Ende der zweiten Umformung in Abbildung 5.22 ist ein erneuter Anstieg von Temperatur 3 und Abfall von Temperatur 2 zu erkennen.

Die veränderte Probenposition erklärt auch den Temperaturverlauf der Druckversuche. In Abbildung 5.21 steigt Temperatur 2 nach dem Umformvorgang und Temperatur 3 fällt leicht ab. Da die Probe in Richtung der Kraftmessdose gedrückt wird, gelangt mehr Probenvolumen der linken Seite in die Spule und verschiebt damit die Position von Thermoelement T2 nach rechts. Die Verschiebung der Positionen der beiden Thermoelemente T2 und T3 erfolgt somit in die genau entgegengesetzte Richtung wie während der Zugversuche. Folglich würde nach einem längeren Haltesegment und Ausbildung konstanter Verläufe T2 höher als T3 sein.

Die Möglichkeit des Einbaus einer längeren Spule müsste mit Firma Bähr geklärt werden. Grundsätzlich wird empfohlen sich bei mehrstufiger Umformung im Bereich kleiner Umformgrade zu bewegen.

6.2 Werkstoffverhalten

Der Einfluss der Versuchsparameter auf das Werkstoffverhalten spiegelt sich vor allem im Auftreten von polygonalen oder nadelförmigen Ferrit und dem Verschieben der Phasenumwandlungspunkte beim Abkühlvorgang wider. So konnte bei der Auswertung der Dilatometerdaten festgestellt werden, dass sich die A_{r3} Temperatur mit steigender

Umformtemperatur hin zu niedrigen Werten verschiebt, siehe Tabelle 5.1. Dies ist die Folge des bei höheren Temperaturen entstehenden größeren Austenitkorns, wodurch sich die Anzahl der potentiellen Ferrit-Keimbildungsstellen verringert. Niedrigere A_{r3} Temperaturen bedeuten wiederum, dass die Umwandlungsrate niedrig ist, da weniger Energie für den Start der Umwandlung zur Verfügung steht [25]. Vereinzelt kann durch die Steigerung der Umformgeschwindigkeit bei den Zugversuchen eine leichte Zunahme der A_{r3} Temperatur um ein bis zwei °C beobachtet werden, da durch die schnellere Umformung mehr Energie in die Probe eingebracht wird, siehe Tabelle 5.1.

Die Größe des Austenitkorns beeinflusst nicht nur die Umformkinetik, sondern ist auch verantwortlich für das Auftreten von polygonalen oder nadelförmigen Ferrit in den untersuchten Proben. Wie in Abbildung 4.2 gezeigt wurde, ist die Ausbildung eines nadelförmigen oder polygonalen Ferrits aber in erster Linie von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Jedoch gilt dieses ZTU-Diagramm nur für eine Austenitisierungstemperatur von 1000°C. Inwiefern sich andere Austenitisierungstemperaturen bei gleicher Abkühlgeschwindigkeit auf die Entstehung eines nadelförmigen oder polygonalen Ferrits, insbesondere für diesen Werkstoff, auswirken, kann daher nicht eindeutig belegt werden.

Untersuchungen an mikrolegierten Mn-Mo-Nb Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt zeigen auch, dass eine zusätzliche Warmumformung bei 850°C die Bildung des nadelförmigen Ferrits begünstigt. So konnte in diesem speziellen Fall die Starttemperatur für die Bildung des nadelförmigen Ferrits von 620°C auf 740°C erhöht werden [26]. Die Ausbildung eines nadelförmigen Ferrits wird durch großes Austenitkorn und einer Umformung und der damit verbundenen Erhöhung der Versetzungsdichte begünstigt, da er sich bevorzugt an Versetzungen und nichtmetallischen Einschlüssen bildet. Zusätzlich können in einem großen Austenitkorn die Ferritnadeln einfacher vom Rand in das Korn wachsen. Dies geht mit der Tatsache einher, dass in keiner der untersuchten Proben, die beispielsweise auf 800°C umgeformt und mit derselben Geschwindigkeit abgekühlt wurden, nadelförmiger Ferrit gefunden wurde.

Weitere wichtige Indikatoren für die Beurteilung des Werkstoffverhaltens sind die an den Dilatometerproben gemessenen Härtewerte und die Lage und Form der aufgezeichneten Fließkurven. Betrachtet man die in Abschnitt 5.3.3 aufgenommenen Fließkurven, so korrelieren diese mit den in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen bezüglich des Einflusses der Umformgeschwindigkeit- bzw. Temperatur auf deren Verlauf [10]. Hinsichtlich der Umformtemperatur sei auf die Abbildungen 5.43 und 5.44 verwiesen, hier sind die Fließkurven der Zug- und Druckversuche in Abhängigkeit der Umformtemperatur dargestellt. Sie zeigen, dass je höher die Umformtemperatur desto niedriger ist die auftretende Fließspannung, was auch in Abbildung 3.4 ersichtlich ist. Eine Interpretation der Ergebnisse der Härtemessung in Abhängigkeit der Umformtemperatur ist, wie in Abschnitt 5.3.2

angeführt, jedoch nicht möglich, da das während der Abkühlung entstehende Gefüge wesentlichen Anteil an der bei Raumtemperatur vorliegenden Härte hat und z.B. nadelförmiger Ferrit gegenüber polygonalem Ferrit den höheren Härtewert erwarten lässt.

Dennoch lässt sich ein eindeutiger Trend erkennen: je höher die Umformgeschwindigkeit der Zugversuche, desto höher ist auch die Härte. Es kommt durch die höhere Umformgeschwindigkeit zu einer schnelleren Zunahme der Versetzungsdichte pro Zeiteinheit und damit zu einer Steigerung der verfestigenden Wirkung [10]. Diese verfestigende Wirkung hat auch einen Einfluss auf die Lage der Fließkurve. Wie in den Abbildungen 5.39 bis 5.42 gut zu sehen ist, verschieben sich die Fließkurven mit steigender Umformgeschwindigkeit hin zu höheren Fließspannungswerten. Eine höhere Fließspannung am Ende der Umformung bedeutet demnach eine höhere Härte. Bei niedrigen Umformgeschwindigkeiten können die entfestigenden Vorgänge wiederum deutlich ausgeprägter stattfinden, wie anhand von Abbildung 5.41 und der Fließkurve für eine Umformgeschwindigkeit von 1mm/s zu sehen ist. Der Abfall der Fließspannung setzt hier schon bei merklich kleineren Umformgraden (bei einer Umformung von zirka 30%) ein als im Vergleich dazu bei den beiden Kurven für 5mm/s und 10mm/s, wo ein Abfall der Fließspannung kaum zu erkennen ist. Dies wird auch durch die dazugehörigen Härtewerte von 182 HV10 für eine Umformgeschwindigkeit von 1mm/s und 192 HV10 für 10mm/s bestätigt.

Die entfestigenden Vorgänge sind auch für die Einschnürung bei den auf 900°C und 1000°C mit 1mm/s umgeformten Proben verantwortlich, siehe Abschnitt 5.3.1. Durch den Abfall der Festigkeit beginnt sich die Probe einzuschnüren, wohingegen Proben die bei niedrigeren Temperaturen umgeformt wurden nur eine Halsbildung aufweisen. Auch die charakteristische Form der 1000°C Fließkurve in Abbildung 5.43 kann dadurch erklärt werden, dass, wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, während der Umformung dynamische Erholung und dynamische Rekristallisation aufgetreten sind. Dies führt zu einem Abflachen der Fließkurve, da diese entfestigenden Vorgänge überwiegen.

Bezüglich der ermittelten Korngrößenkennzahlen sei erwähnt, dass diese, wie schon in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, vor allem eine Tendenz bezüglich einer steigenden Umformgeschwindigkeit zeigen. Hohe Härtewerte gehen in der Regel mit geringer Korngröße einher. Wie zuvor erklärt, bedeutet eine hohe Härte aber auch eine hohe Fließspannung am Ende der Umformung. Durch die Erhöhung der Umformgeschwindigkeit werden die entfestigenden Vorgänge unterdrückt und hin zu höheren Umformgraden verschoben, wodurch die Rekristallisation unterdrückt wird.

Der Grund für die deutlich niedrigere Fließspannung am Beginn der zweiten Umformung in Abbildung 5.35, sind Erholungsvorgänge und dem damit stattfindenden Festigkeitsverlustes, die während dem Haltesegment von 3min zwischen den beiden Umformungen stattfinden [27].

Der Anstieg der Proben­temperatur durch die adiabatische Erwärmung im Bereich der Umformung besitzt in der vorliegenden Untersuchung keinen Einfluss auf das entstehende Gefüge. Wie aber bereits in Abschnitt 3.3.2 erwähnt, muss speziell bei Versuchen mit hohen Umformgeschwindigkeiten die adiabatische Erwärmung als möglicher Einflussfaktor berücksichtigt werden, wie unter anderem das Auftreten einer Phasenumwandlung in perlitischen Stahlproben zeigt [18, 28-29]. Während die Regeltemperatur des Thermoelements T1 bei den Zugversuchen mit 1mm/s einen Temperaturanstieg von nur zirka 2°C aufweist, kann bei den schnelleren Umformungen, wie in Abschnitt 5.2.2.3 beschrieben, sogar ein Temperaturanstieg von mehr als 10°C beobachtet werden.

Beim Vergleich der Gefügeaufnahmen der Zug- Druckversuche konnten keine Unterschiede hinsichtlich auftretender Phasen und deren Anteile festgestellt werden. Auch der Verlauf der aufgenommenen Fließkurven der Zug- und Druckversuche unterscheidet sich kaum. Lediglich bei den Versuchen bei 900°C zeigen die Proben der Druckversuche am Ende der Umformung eine um zirka 20N/mm² höhere Fließspannung (Abb. 5.43. und 5.44).

6.3 Gerätetechnischer Teil

Beim Probeneinbau ist beim Justieren der Schubstangen behutsam vorzugehen um ein mögliches Verkanten und in weiterer Folge einen Bruch dieser zu vermeiden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Thermoelementdrähte sich zwischen Probe und Schubstangenauf­lage befinden. Dadurch können Fehler bei der Längenmessung auftreten und der Versuch muss als ungültig bewertet werden. Beim Aus- bzw. Einbauen der Proben sollte darauf geachtet werden, dass ein Kontakt mit der Spule vermieden wird, um diese nicht aus der durch die Vorversuche ermittelten Idealposition zu bringen.

Bezüglich der Probengeometrie sei erwähnt, dass alle verwendeten Proben im Bereich der von der Norm geforderten Toleranz lagen, es ist jedoch nicht möglich Proben komplett gleicher Abmessungen herzustellen. Wenngleich die Unterschiede auf den ersten Blick minimal erscheinen mögen, so führen sie doch dazu, dass die Reproduzierbarkeit der Versuche eingeschränkt wird. Aus diesem Grund ist besonderes Augenmerk auf die Probenfertigung zu legen. Vor dem Einbau müssen diese auf ihre Rundlaufeigenschaften überprüft werden. Damit wird sichergestellt, dass die Probe zusammen mit der Krafteinleitung als mögliche Fehlerquelle für den Versatz bei Druckversuchen ausgeschlossen werden kann. Die Krafteinleitung wird durch die Verwendung einer Zentrierprobe beim Umbau auf den Zug-/Druckadapter abgeglichen.

Weiters sollte der effektive Probenquerschnitt vor Versuchsbeginn so unbeeinflusst wie möglich sein. Daher ist es zu empfehlen, beim Einschrauben der Probe in die Kraftmesseinrichtung mit einer Zange nur die rechte Probenhälfte zu greifen, um das

Auftreten von Torsionsspannungen zu verhindern. Das Festziehen der Proben mit einer Zange erfolgte bei den hier durchgeführten Druckversuchen immer nur über die linke Probenhälfte. Ob dies tatsächlich der Grund für den auftretenden Versatz ist (siehe Abb. 5.25), konnte im Zuge dieser Arbeit nicht mehr überprüft werden. Eine zusätzliche Serie von Druckversuchen mit nur über der rechten Probenhälfte eingeschraubten Proben wäre hier notwendig.

Durch die Möglichkeit der Umformung bei hohen Temperaturen eignet sich der Adapter sehr gut zur Aufnahme von Warmfließkurven. Für die Ermittlung von bestimmten Werkstoffkennwerten, wie E-Modul oder Streckgrenze, bei unterschiedlichen Temperaturen kann der Adapter ebenfalls verwendet werden. Jedoch ist der Zugversuch mit dem Adapter nicht genormt und die ermittelten Werte können allenfalls als Richtwerte dienen.

Für Werkstoffe bzw. Legierungen, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden, könnte der Adapter dazu dienen, erste Trends hinsichtlich der Gefügeausbildung und Änderung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit einer Verformung abzuschätzen. Beispielsweise wurde mit Hilfe des Adapters das Materialverhalten von ferritisch-austenitisch Duplexstählen unter kombinierter zyklisch thermischer und konstanter Belastung untersucht. Speziell für diese Studie wurde ein Adapter für Flachproben entwickelt. Dieser ist in Abbildung 6.1 zusammen mit einer dazugehörigen Flachprobe dargestellt [30].

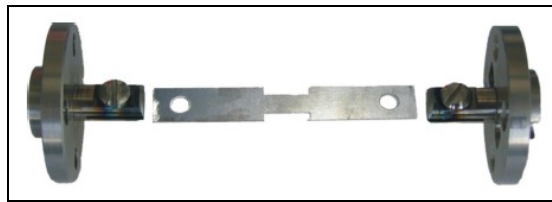


Abb. 6.1: Flachprobe mit dazugehörigen Adapter [30]

Bei sehr langsamen Umformungen kann die während des Versuchs erreichte Kraft im anschließenden Segment konstant gehalten werden, damit diese nicht wieder abgebaut wird. Mit dieser Option können auch Kriechversuche durchgeführt werden. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, dass die Verformung konstant gehalten wird, so kann bspw. das Auftreten von Schrumpfungrissen untersucht werden. Zusätzlich gibt es noch die Option, die Probe nach der Umformung entspannen zu lassen, indem die Kraft auf null gesetzt wird.

Ein großer Nachteil des Zug-/Druckadapters ist, dass es keine Variationsmöglichkeit bezüglich der Probengeometrie gibt. Im Vergleich dazu bieten andere thermomechanische Systeme, wie die Gleeble 3500, die Möglichkeit, Probenabmessungen in einem größeren Rahmen zu variieren (siehe Abschnitt 3.2). Die angesprochenen Probleme der Reproduzierbarkeit der Versuche muss der Anwender berücksichtigen, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

Durch den Adapter kann der Anwendungsbereich des Gerätes erweitert werden, ohne die Notwendigkeit der Anschaffung eines komplett neuen Gerätes. Dennoch sind die technischen Daten des Adapters im Vergleich mit anderen Zug- und Druckprüfmaschinen limitiert. Werden für Untersuchungen bspw. höhere Umformgeschwindigkeiten und Kräfte benötigt, ist der Einsatz von erheblich kostspieligeren Geräten unumgänglich. Wenn die technischen Daten des Adapters in das Anforderungsprofil des jeweiligen Anwenders passen, stellt er eine Alternative zu anderen konventionellen und vor allem preisintensiveren thermomechanischen Messsystemen dar.

7 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit ist der Zug-/Druckadapter für das Dilatometer 805 der Firma Bähr. Mit Hilfe dieses Adapters ist die Durchführung von Versuchen für Wechsellast (Zug-Druck) möglich.

Das Ziel der Diplomarbeit ist es, Anwendungsmöglichkeiten für den Adapter und mögliche Einflussgrößen bei der Versuchsdurchführung aufzuzeigen und kritisch zu beurteilen.

Als Versuchsmaterial diente ein mikrolegierter, perlitärer Feinkornbaustahl der einem Stahl der Qualität S550MC entspricht.

Zunächst wurden Vorversuche durchgeführt, um die optimale Spulenposition zu finden und so eine gleichmäßige Erwärmung der Probe zu gewährleisten. Nur so ist sichergestellt, dass die Einschnürung bei den durchgeführten Zugversuchen auch in der Probenmitte auftritt, was als Kriterium für einen gültigen Versuch festgelegt wurde.

Eingangs wurde eine Serie von Zug- und Druckversuchen bei vorgegebenen Umformparametern durchgeführt. Um den Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf den Werkstoff und die gemessenen Fließkurven untersuchen und beurteilen zu können, wurde eine zusätzliche Reihe von Zugversuchen mit erhöhter Umformgeschwindigkeit ausgeführt.

Die Experimente haben gezeigt, dass mit steigender Umformtemperatur aber gleichbleibender $t_{8/5}$ Abkühlzeit der Anteil des nadelförmigen Ferrits in den ausgewerteten Gefügaufnahmen zunahm. Die Ursache hierfür liegt in der Größe des umgeformten Austenitkorns, da in einem größeren Korn mehr Keimstellen für die Bildung des nadelförmigen Ferrits zur Verfügung stehen und die Ferritnadeln einfacher vom Rand in das Korn wachsen können.

Eine exakte Interpretation der Härte in Abhängigkeit der Umformtemperatur war nicht möglich. Jedoch besaßen die Proben die mit einer höheren Umformgeschwindigkeit umgeformt wurden auch höhere Härtewerte. Der Zugversuch bei einer Umformtemperatur von 800°C und einer Umformgeschwindigkeit von 10mm/s wies mit 200 HV10 den höchsten gemessenen Härtewert auf. Im Vergleich dazu besitzt das Ausgangsmaterial wesentlich gröberes Korn und nur eine Härte von 180 HV10.

Mit Hilfe der erhaltenen Dilatometerdaten und aufgenommenen Fließkurven wurden die Grenzen der Reproduzierbarkeit aufgezeigt und mögliche Fehler bei der Durchführung der Versuche dargelegt. Es konnte beispielsweise beobachtet werden, dass große Temperaturunterschiede über die Probenlänge zu einem Abfall der ermittelten Fließspannung führten. Durch die Verwendung von 3 Thermoelementen während der Versuche, die in

bestimmten Abständen entlang der effektiven Probelänge angeschweißt wurden, konnten diese Temperaturgradienten bestimmt und beurteilt werden.

Durch die Möglichkeit der Erstellung eines bestimmten Temperaturprofils können mit dem Gerät verschiedenste Temperatureinflüsse und Umformschritte simuliert und untersucht werden. Aufgrund dieser vielseitigen Einstellungsmöglichkeiten eignet sich der Adapter sehr gut zur Aufnahme von Warmfließkurven, im Bereich einer Umformung von $\pm 5\text{mm}$ und einer maximalen Umformgeschwindigkeit von 20mm/s , und zur Abschätzung des Materialverhaltens unter kombinierter thermischer und mechanischer Beanspruchung.

Literaturverzeichnis

1. E. Moeller: 'Handbuch Konstruktionswerkstoffe', Hanser Fachbuch, Auflage 1 (8.November 2007), p. 999.
2. W. Hemminger, H.Cammenga: 'Methoden der thermischen Analyse', Springer Verlag, 1989, p. 201-213.
3. 'Aufstellung von Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern für Eisenlegierungen', STAHL-EISEN-Prüfblätter (SEP) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, SEP 1680, Dezember 1990
4. 'Richtlinien für Vorbereitung, Durchführung und Auswertung dilatometrischer Umwandlungsuntersuchungen an Eisenlegierungen', STAHL-EISEN-Prüfblätter (SEP) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, SEP 1681, Juni 1998
5. Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), induktive Messverfahren, <http://www.msr.uni-bremen.de/download/MSGrundlagenInduktiv.pdf>, Mai 2011.
6. P. Pointner: 'Zur Frage der quantitativen Auswertung von Dilatometerkurven', voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG, interner Bericht, Jahreszahl unbekannt
7. 'Leitfaden zur Inbetriebnahme eines Bähr-Dilatometers', Bähr Thermoanalyse GmbH, 2005
8. Dilatometer Prospekt, Bähr Thermoanalyse GmbH, <http://www.baehr-thermo.de/Download/de/Dilatometer.pdf>, Juni 2011
9. 'Software Installations CD-Rom', Bähr Thermoanalyse GmbH, April 2005
10. K. Lange: 'Umformtechnik – Band I: Grundlagen', Springer Verlag, 2. Auflage 1984, Nachdruck 2002 – Studienausgabe, p. 98-138.
11. H. Clemens: 'Metallkunde I Vorlesungsunterlagen WS 2007', Department für Metallkunde und Werkstoffprüfung, Montanuniversität Leoben
12. E. Doege, H. Meyer-Nolkemper, I. Saeed: 'Fließkurven-Atlas metallischer Werkstoffe', Hanser Verlag München Wien, 1986, p. 116.
13. Amtliche Materialprüfungsanstalt der freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen), Laborausstattung, weiterführende Informationen, http://www.mpa-bremen.de/www/fileadmin/user_upload/MPA/Metalle/Praesentation_Gleeble.pdf, Juni 2011

14. Dynamic Systems Inc. (DSI), Gleeble, <http://www.leeble.com/3500.htm>, Juni 2011
15. Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, Ausstattung, http://www.metalforming.at/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=61&lang=de, Juni 2011
16. W. Dahl, R. Kopp, O. Pawelski: 'Umformtechnik: Plastomechanik und Werkstoffkunde', Verlag Stahleisen, Springer Verlag, 1993, p. 95.
17. B. Ilchner, R.F. Singer: 'Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik', Springer Verlag, 5., neu bearbeitete Auflage, 2010, p. 365.
18. W. Pantleon, D. Francke, P. Klimanek, Modelling adiabatic heating during high-speed deformation, Computational Materials Science 7 (1996) 75-81
19. voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG, Stückanalyse des untersuchten Stahls
20. Salzgitter Flachstahl GmbH, Stahlsorten, S550MC, http://www.salzgitter-flachstahl.de/MediaDatenBank/downloadcenter/Warmgewalzte_Produkte/Hoehrfeste_Staehe_zum_Kaltumformen_thermomechanisch_gewalzt/S550MC_Stand_07_2010_, Februar 2011
21. Hoesch Hohenlimburg GmbH, Produkte, Warmgewalzter Bandstahl, [http://www.hoesch-hohenlimburg.de/projekt/web2006/hho/hhowebcms.nsf/\\$AII/5FBA8E2A70F31505C12570F5004AB5F2/\\$FILE/Warbandd.pdf](http://www.hoesch-hohenlimburg.de/projekt/web2006/hho/hhowebcms.nsf/$AII/5FBA8E2A70F31505C12570F5004AB5F2/$FILE/Warbandd.pdf), Februar 2011
22. voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG, Kontinuierliches ZTU-Schaubild des untersuchten Stahls
23. H. Schumann, H. Oettel: 'Metallografie', WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 14.Auflage, 2005, p. 232.
24. Information über Stahl für Metallografen, <http://www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro20.htm>, Juni 2011
25. A.B. Cota , C.A.M. Lacerda , F.L.G. Oliveira, F.A. Machado, F.G. da Silva Araujo, Effect of the austenitizing temperature on the kinetics of ferritic grain growth under continuous cooling of a Nb microalloyed steel, Scripta Materialia 51 (2004) 721–725
26. Furen Xiao, Bo Liao, Deliang Ren, Yiyin Shan, Ke Yang, Acicular ferritic microstructure of a low-carbon Mn–Mo–Nb microalloyed pipeline steel, Materials Characterization 54 (2005) 305– 314
27. G. Gottstein: 'Physikalische Grundlagen der Materialkunde', Springer Verlag, 3.Auflage, 2007, p. 304

28. J. Castellanos, I. Rieiro, M. Carsí, J. Muñoz, M. El Mehtedi, O.A. Ruano, Analysis of adiabatic heating and its influence on the Garofalo equation parameters of a high nitrogen steel, *Materials Science and Engineering A* 517 (2009) 191–196
29. J. Rämö, V.T. Kuokkala, T. Vuoristo, Influence of strain rate and adiabatic heating on the deformation behaviour of cold heading steels, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 5186–5194
30. B. Messner: ‘Duplexstähle unter kombinierter zyklisch thermischer und konstant mechanischer Belastung’, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 28.11.2006, p. 50