

# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering  
Montanuniversität Leoben



## **DIPLOMARBEIT**

### **NEUE KONZEPTE ZUM KALIBRIEREN VON SINTERBAUTEILEN**

Wolfgang Schiller

Studienrichtung Werkstoffwissenschaft

Leoben, November 2010

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit zum Thema „Neue Konzepte zum Kalibrieren von Sinterbauteilen“ selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 18. November 2010

Wolfgang Schiller

---

## Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben diese Arbeit zu schreiben bedanken.

Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Hatzenbichler für die Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Florian Planitzer anerkennen, der zum Entstehen dieser Diplomarbeit wesentlich beigetragen hat. Nicht nur durch wissenschaftliche Diskussionen, praktische Umsetzungs-Hilfestellungen und fachspezifischer Erfahrung unterstützte mich Florian bei meinem Einstieg in das wissenschaftliche Arbeiten, sondern auch durch seine hilfsbereite, zuverlässige und humorvolle Art der Betreuung.

An dieser Stelle sei dem Industriepartner Miba Sinter Austria GmbH, im Speziellen Herrn Dipl.-Ing. Horst Rößler, gedankt, der in freundlicher und kompetenter Weise dieser Arbeit den ausgeprägten Bezug zur Praxis verlieh.

Weiters gebührt Dank den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Umformtechnik, die mich stets hilfsbereit unterstützten. Hervorheben möchte ich Herrn Clemens Planitzer, der mir bei der praktischen Durchführung der Versuche eine verlässliche Hilfe war.

Für die langjährige Unterstützung, besonders in finanzieller Hinsicht, möchte ich mich bei meinen Eltern und Großeltern bedanken. Ohne sie wäre ein Studium nur schwer vorstellbar gewesen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch den Studienkollegen, Freunden und meiner Lebensgefährtin, die mir alle stets hilfreich zur Seite standen und mir die Zeit des Studiums verschönert haben.

---

## Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wird das Kalt-Kalibrieren als bestehendes Nachverdichtungsverfahren von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen mit dem neuen Ansatz der Halbwarmumformung erweitert und experimentell geprüft. Die Hauptziele sind, durch die Halbwarmumformung im Gegensatz zum Kalibrieren bei Raumtemperatur, eine globale und lokale Dichtesteigerung zu erlangen, eine Presskraftersparnis zu erzielen und ein gesteigertes Formänderungsvermögen des Werkstoffs auszunützen. Um diese Ziele zu erreichen wird ein experimentelles Konzept, bestehend aus sieben themenspezifischen Versuchsblöcken, entworfen und abgehandelt. Daraus resultiert, dass der Nutzen des Halbwarm-Kalibrierens von einer Grenztemperatur abhängt, die mit zunehmendem Umformgrad sinkt. Ab dieser Grenztemperatur ist, verglichen mit dem Kalt-Kalibrierprozess, bei gleicher Presskraft eine höhere globale Dichte und bei gleichen Dichtewerten eine Presskraftersparnis durch die Halbwarmumformung möglich. Ein lokales Randzonenverdichten kann mittels induktiver Erwärmung bewerkstelligt werden, hingegen ist mit reinem Werkzeug-Kontakt ein dafür notwendiger Temperaturgradient am Bauteilrand mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht erreichbar. Weiters wird durch das Halbwarm-Kalibrieren die Formfüllung gesteigert, das Verpressen von unterschiedlichen Vorformen zum gleichen Endprodukt ermöglicht und das Pressen von komplizierten Geometrien durchführbar. Ein allgemein gültiger optimaler Temperaturbereich für Werkstück und Werkzeug existiert nicht, da dieser prozessabhängig ist und von mehreren Faktoren, die in der vorliegenden Arbeit erläutert werden, bestimmt wird.

---

## **Abstract**

The present diploma thesis deals with warm forming as a new concept in the sizing process of powder metallurgical components. Using warm forming instead of cold sizing should increase global and local densification as well as the formability of the material and reduce pressing force. In support of this theory an experimental concept including seven sets of experiments is planned and conducted. It is shown that the usefulness of warm sizing is dependent on a specific temperature limit which decreases by increasing natural strain. Compared with cold sizing a higher global density with the same pressing force or a reduced pressing force with the same density data can be achieved above this specific temperature. Local surface densification can be accomplished by using induction heating. However by using the contact from component and die the required temperature gradient in the sample is not achievable with the applied test set-up. Moreover by using warm sizing the mould filling increases, pressing different preforms to the same end-product is enabled and complex components are manufacturable. Because of its process-orientation and dependency on various factors that will be further illustrated in this thesis, an ideal temperature range for component and die does not exist.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>II</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. Einleitung und Ziele</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen der PM</b> .....	<b>4</b>
2.1 Herstellung von PM-Bauteilen .....	4
2.1.1 Pulvererzeugung .....	5
2.1.2 Pulveraufbereitung .....	5
2.1.3 Pulverpressen .....	5
2.1.4 Sintern .....	5
2.1.5 Nachbearbeitung .....	6
2.2 Eigenschaften von PM-Bauteilen .....	6
2.2.1 Einfluss der Dichte auf die Eigenschaften .....	6
2.2.2 Einfluss des Sinterprozesses auf die Eigenschaften .....	8
2.2.3 Einfluss der Legierung auf die Eigenschaften .....	9
2.2.4 Umformverhalten von PM-Bauteilen .....	9
2.3 Verfahren zur Steigerung der Bauteildichte .....	9
2.3.1 Verfahren zur globalen Dichtesteigerung .....	10
2.3.2 Verfahren zur lokalen Dichtesteigerung .....	10
2.4 Vor- und Nachteile der PM .....	11
2.5 Anwendungen für PM-Bauteile .....	12
<b>3. Halbwarmumformung</b> .....	<b>14</b>
3.1 HWU im Vergleich zur Kalt- und Warmumformung .....	15
3.2 Vor- und Nachteile der HWU .....	15
3.3 Anwendungen der HWU .....	16
<b>4. Schmiermittel für die HWU</b> .....	<b>17</b>
4.1 Anforderung an Schmiermitteln für die HWU .....	17
4.2 Arten von Schmiermitteln für die HWU .....	17
4.3 Reibwertbestimmung mittels Stauchversuch .....	18
4.3.1 Reibung .....	18
4.3.2 Zylinderstauchversuch .....	19
<b>5. Ideen, Zielsetzung und Versuchskonzept</b> .....	<b>22</b>

<b>6. Experimenteller Teil: Schmiermittel .....</b>	<b>24</b>
6.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau .....	24
6.2 Getestete Schmiermittel .....	26
6.3 Ergebnisse und Schmiermittelvergleich .....	27
6.4 Diskussion und Problemstellungen .....	31
<b>7. Experimenteller Teil: Prozesstemperaturen und globale Verdichtung .....</b>	<b>33</b>
7.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau .....	33
7.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf .....	33
7.1.2 Proben .....	36
7.1.3 Versuchsblöcke I bis III .....	37
7.1.4 Auswertung .....	38
7.2 Voruntersuchungen .....	39
7.2.1 Aufheizkurve der Proben im Gesenk .....	39
7.2.2 Auskühlen der Proben in der Transportbox .....	40
7.2.3 Technologische Maßnahmen am Sockel .....	41
7.3 Ergebnisse und Diskussion .....	42
7.3.1 Wirken der HWU auf die Presskraft .....	42
7.3.2 Temperaturbereiche für Werkstücke und Werkzeuge der HWU .....	47
7.3.3 Dichtesteigerung durch die HWU bei gleicher Presskraft .....	50
<b>8. Experimenteller Teil: Umformvermögen .....</b>	<b>52</b>
8.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau .....	52
8.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf .....	52
8.1.2 Proben .....	52
8.1.3 Versuchsblock IV .....	53
8.1.4 Auswertung .....	54
8.2 Ergebnisse und Diskussion .....	54
<b>9. Experimenteller Teil: Lokale Verdichtung .....</b>	<b>61</b>
9.1 Induktives Erwärmen der Bauteile .....	61
9.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf .....	61
9.1.2 Proben .....	62
9.1.3 Versuchsblock V .....	62
9.1.4 Auswertung .....	62
9.1.5 Voruntersuchungen .....	63
9.1.6 Ergebnisse und Diskussion .....	65
9.2 Erwärmen der Bauteile durch Werkzeugkontakt .....	68
9.2.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf .....	68
9.2.2 Proben .....	68

9.2.3	Versuchsblock VI .....	68
9.2.4	Auswertung.....	68
9.2.5	Voruntersuchungen.....	69
9.2.6	Ergebnisse und Diskussion.....	69
<b>10.</b>	<b>Vorschläge zur industriellen Umsetzung .....</b>	<b>71</b>
<b>11.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>73</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>76</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>77</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>81</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>84</b>

# 1. Einleitung und Ziele

Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus einem formlosen Stoff. Hierzu zählen folgende zwei Fertigungsverfahren:

- das Urformen aus dem flüssigen Zustand durch Gießverfahren
- das Urformen aus dem pulverförmigen Zustand mittels Pulvermetallurgie [Gro10]

Die vorliegende Arbeit behandelt nur die Pulvermetallurgie (PM) mit den dazugehörigen Sekundäroperationen, im Speziellen das Kalibrieren von gesinterten Bauteilen.

Unter PM versteht man die Herstellung von Halbzeugen oder Fertigteilen aus Pulvern unter Anwendung von Druck und/oder Temperatur, ohne dass alle Komponenten in den schmelzflüssigen Zustand übergehen [Sch07a]. Die Sintertechnik ist ein Teil der PM und umfasst alle Verfahrensschritte zur Herstellung eines Sinterteils mit Ausnahme der Pulvererzeugung [Gro10]. Die Technologien der PM lassen sich sowohl für metallische als auch für nichtmetallische Werkstoffe anwenden [Spu81].

Die sehr vielfältigen Gründe für die PM (Abbildung 1.1) können durch die drei Hauptgründe der Wirtschaftlichkeit, der Einzigartigkeit und der Notwendigkeit zur Herstellung durch die PM zusammengefasst werden. Ein vorteilhafter Einsatz der PM bietet sich beispielsweise bei hohen Stückzahlen an, wenn das Bauteil nachbehandlungsarm gefertigt werden soll, bei hochschmelzenden Metallen, bei Verbundwerkstoffen (z.B. Metall-Nichtmetall) oder wenn die Metalle im Schmelzzustand nicht miteinander verträglich sind [Mat93].

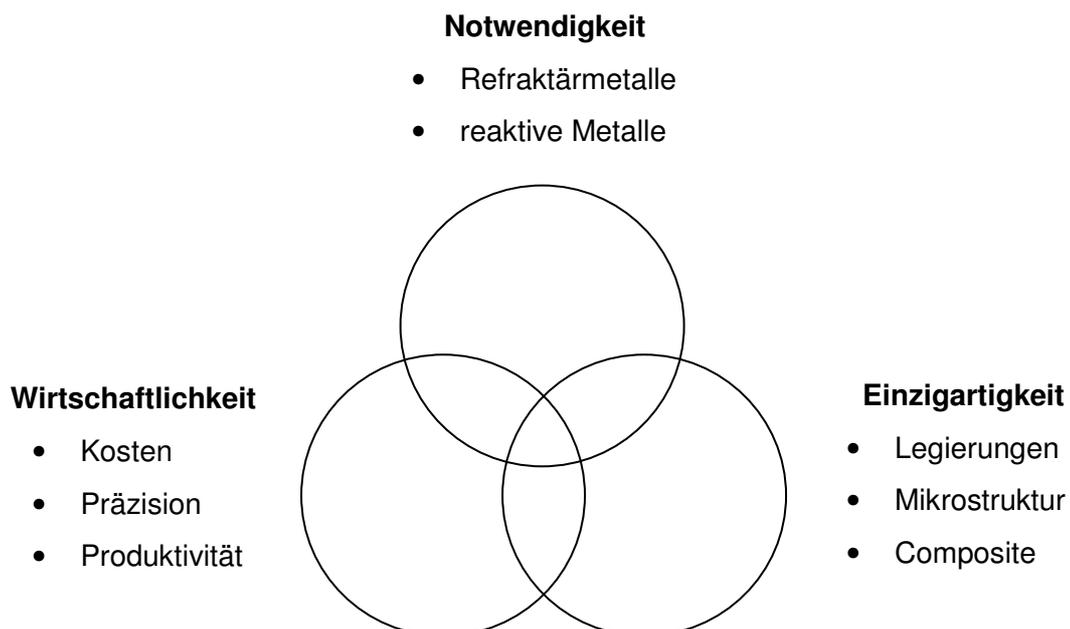


Abbildung 1.1: Die drei Hauptgründe für die PM nach [Mit08].

Die Entwicklung der PM, wenn man von der Porzellanherstellung vor mehr als 2000 Jahren absieht [Kot03], begann am Anfang des 20. Jahrhunderts mit der Herstellung von Keramiken, deren Schmelzpunkte zu hoch waren, um sie vollständig zu erschmelzen. Die Jahre ab 1930 stellen den industriellen Beginn der PM in ihrer heutigen Form dar, mit der Fertigung von hochschmelzenden Metallen (Wolfram, Molybdän und Tantal), nicht mischbaren Legierungen wie Kupfer-Zinn-Blei für Gleitlager oder Wolframkarbid-Kobalt für Schneidwerkstoffe und Filter bzw. Dichtungen mit definierten porigen Strukturen. In den Jahren 1935 bis 1940 gelang die Entwicklung von Sinterisen und Sinterstahl. Mit der Weiterentwicklung der Legierungstechnik und Anlagentechnik begann die Massenproduktion der PM-Bauteile. [Mat93, Lor95]

Wirtschaftlich gesehen ist die PM sehr effizient, da die Produkte Genauerteile, also Bauteile, die in engen Toleranzen hergestellt werden, sind [Mar04]. Damit ist eine abfallarme oder -freie Produktion bei hoher Materialausnutzung verbunden und energie- und zeitaufwändige Fertigungsschritte entfallen [Sch07b]. Mögliche Einsparungen der PM gegenüber der spanenden Massenformteilerzeugung als Hauptkonkurrenten liegen für die Materialausnutzung bei bis zu 60 % und hinsichtlich Energieverbrauch bei bis zu 40 % [Len80, Mar04, Sch07b].

Den größten Marktanteil der PM nimmt die Automobilindustrie mit ca. 70 % ein, wobei ca. 44 % der Bauteile Zahnräder für den Motoren- und ca. 26 % für den Getriebebau sind [Wal07, Kot03]. Einen weiteren großen Anteil stellt die Herstellung von Hartmetall mit jährlich mehr als 250 000 t verpresstem Eisenpulver dar. Weitere Anwendungsgebiete sind Elektrotechnik, Maschinenbau, Optik, Werkzeugbau, chemischer Apparatebau, Luft- und Raumfahrt. [Wal07]

Sinterbauteile enthalten ca. 5 bis 20 Volumsprozent an Poren, die negativ auf die Materialeigenschaften wirken, wobei das Ermüdungsverhalten stärker betroffen ist als die Zugfestigkeit oder die Härte [Bro86, Cap06]. Auch andere Faktoren wie die Sinter Temperatur und Sinterzeit beeinflussen die Eigenschaften, doch der dominante Einfluss kommt von der Porosität bzw. Dichte. Daher sehen Jones et al. [Jon97] und Klocke et al. [Klo08] einen erfolgreichen Einsatz von PM-Bauteilen für hochbelastete Anwendungen nur, wenn die PM-Bauteile einer nachträglichen Verdichtung unterzogen werden.

Um eine Dichtesteigerung im gesamten Sinterbauteil zu erzielen, werden die Verfahren des Mehrfachpressens und -sinterns, Pressens mit hohen Drücken, Flüssigphasensinterns und Pressens bei erhöhter Temperatur (z.B. Heißpressen oder Sinterschmieden) angewendet

[Ngu89]. Zudem existieren Verfahren, mit denen nur lokale Bauteilabschnitte verdichtet werden wie Kalibrieren, Walzen von PM Bauteilen, Fließpressen oder Kugelstrahlen [Pla07].

Durch Kalibrieren werden die Form- und Maßgenauigkeiten des gesinterten Bauteils verbessert und zusätzlich kann das Bauteil mit steigendem Druck und steigender Temperatur nachverdichtet werden [Geb07, Klo10a].

Die vorliegende Arbeit behandelt den neuen Ansatz des Kalibrierens von Sinterbauteilen im Temperaturbereich der Halbwarmumformung (HWU). Gründe für die erhöhten Kalibriertemperaturen sind das größere Umformvermögen des Werkstoffs, Erniedrigung der Fließspannung, Herabsetzung der Kaltverfestigung und Wegfall der Zunderbildung, im Vergleich zur Warmumformung. [Kop82, Kug09, Lan93, Ngu89, Sch08]

Die Ziele der Untersuchungen sind, durch das vorteilhafte Nutzen der HWU im Kalibrierprozess, die globale Dichte des Bauteils zu steigern, die Presskräfte zu reduzieren, das Umformvermögen zu analysieren und die lokale Dichte durch ein rasches Randzonenerwärmen des Bauteils und darauffolgendes Kalibrieren zu erhöhen. Dem voran wird ein für diese Prozesse geeignetes Schmiermittel experimentell bestimmt.

## 2. Theoretische Grundlagen der PM

### 2.1 Herstellung von PM-Bauteilen

Gemäß Gebhardt [Geb07] sind die Fertigungsverfahren der PM mehrstufige Prozesse, die mit dem pulverförmigen Ausgangsmaterial beginnen und mit dem festen, metallischen Bauteil enden. Es werden zwei grundlegende Verfahrensschritte unterschieden:

- Entstehung eines geometrisch bestimmten, festen Formkörpers durch **Pressen**
- anschließendes **Sintern**, also eine Wärmebehandlung zur Verdichtung des Bauteils

Um ein vollwertiges, technisches Produkt zu erhalten, muss zum Abschluss das Bauteil einer Nachbearbeitung unterzogen werden.

Mögliche Prozessabläufe der PM sind schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt. In dieser sind die fünf Teilschritte der PM, Pulvererzeugung, Pulveraufbereitung, Pulverpressen, Sintern und die Nachbearbeitung, aufgelistet.

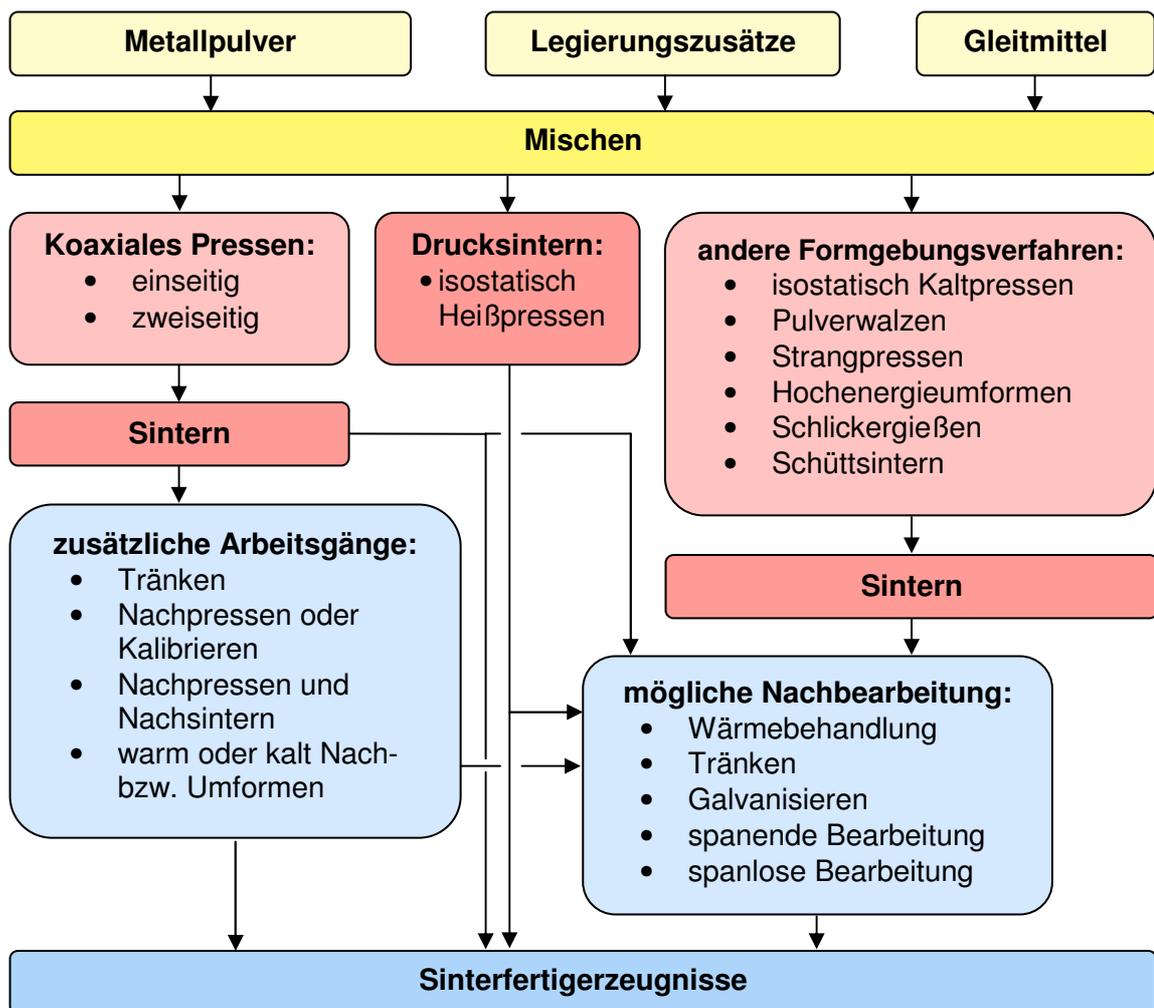


Abbildung 2.1: Verfahrensabläufe der PM nach [Sch07a].

### 2.1.1 Pulvererzeugung

Die Pulverherstellung erfolgt entweder durch ein mechanisches Verfahren, durch ein physikalisch-chemisches Verfahren oder im flüssigen Zustand des Werkstoffs. Zu den mechanischen Zerkleinerungsverfahren zählen das Brechen und Mahlen in Kugelmöhlen oder Kollergängen. Die physikalisch-chemische Zerkleinerung ist unterteilt in Reduktion von Oxiden, elektrolytische Abscheidung, Fällungsverfahren sowie thermische Zersetzung und die Kondensation. Nach dem Reduktionsverfahren werden heute ca. 40 bis 50 % des Weltbedarfs an Eisenpulver produziert [Gro10]. Die Zerkleinerung im flüssigen Zustand ist die Teilchenbildung aus der Schmelze unter Einwirkung von Schwerkraft und Oberflächenspannung wie Verdüsen oder Zerschleudern der Schmelze. [Geb07, Pla07, Sch07a]

### 2.1.2 Pulveraufbereitung

Die Pulveraufbereitung umfasst das Trennen und Reinigen sowie Klassieren (Sortieren nach Korngrößen) der Pulver und Mischen des Basispulvers mit Legierungselementen und Gleitmitteln. Letztere verhindern ein Entmischen von Partikeln aufgrund unterschiedlicher Dichten oder Größen des Pulvergemenges. [Geb07, Pla07, Sch07a]

### 2.1.3 Pulverpressen

Ziel des Pulverpressens ist das Herstellen eines Formkörpers, genannt Grünling. Während des Verfahrensschrittes, der entweder mit oder ohne Druckaufbringung Anwendung findet, kommt es zur Umverteilung des Pulvers in der Matrize, zur Formgebung und zu einer Verdichtung. Der Pressling weist eine geringe Festigkeit auf, die nur für den Zusammenhalt und den Transport zum Sinterofen dienlich ist. [Geb07, Gro10, Mit08]

### 2.1.4 Sintern

Durch das dem Pulverpressen nachgeschaltete Sintern wird der Grünling in einen Werkstoff mit einem festen Gefügeverband umgewandelt. Dabei wird der Pressling einer nach Zeit und Temperatur genau abgestimmten Wärmebehandlung unterzogen, sodass die sich berührenden Einzelteilchen aufgrund von Diffusionsvorgängen miteinander verbunden werden. [Gro10] Dabei liegt die Sintertemperatur meist unter dem Schmelzpunkt der am niedrigsten schmelzenden Phase. Bei Metallen liegt diese bei ca. 60 bis 80 % ihres Schmelzpunktes in Grad Kelvin [Len80, Pla07].

## 2.1.5 Nachbearbeitung

Der Sintervorgang bedingt eine Schwindung (d.h. eine Formabweichung), die je nach Toleranzvorgaben toleriert werden kann oder nachgebessert werden muss. Geeignete Prozesse hierfür sind Nachpressen oder Kalibrieren der Bauteile [Geb07]. Weiters können die Einsatzmöglichkeiten von PM-Bauteilen durch eine Wärmebehandlung oder Aufbringen von Korrosionsschutzschichten erweitert werden [Sch07c].

## 2.2 Eigenschaften von PM-Bauteilen

Die Materialeigenschaften von Sinterwerkstoffen hängen wie bei schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen von der chemischen Zusammensetzung, dem Kristallisationsgrad, dem Umformgrad, der Kaltverfestigung, der Anisotropie und dem Wärmebehandlungszustand ab. Zusätzlich bestimmen noch spezifische Parameter der Sinterwerkstoffe wie Porosität und gesteuerte Inhomogenität die Eigenschaften entscheidend mit. [Spu81] Um optimale mechanische Materialeigenschaften zu erreichen, weisen Jones et al. [Jon97] darauf hin, dass dazu eine passende Abstimmung von Dichte und Legierungssystem gefunden werden muss.

### 2.2.1 Einfluss der Dichte auf die Eigenschaften

Bei pulvermetallurgisch hergestellten Metallen ist im Gegensatz zu schmelzmetallurgisch erzeugten Werkstoffen eine prozessabhängige Restporosität vorhanden (Abbildung 2.2). Gegenüber konventionell hergestellten Massivbauteilen führen diese Poren zu schlechteren mechanischen Eigenschaften. [Wal08]

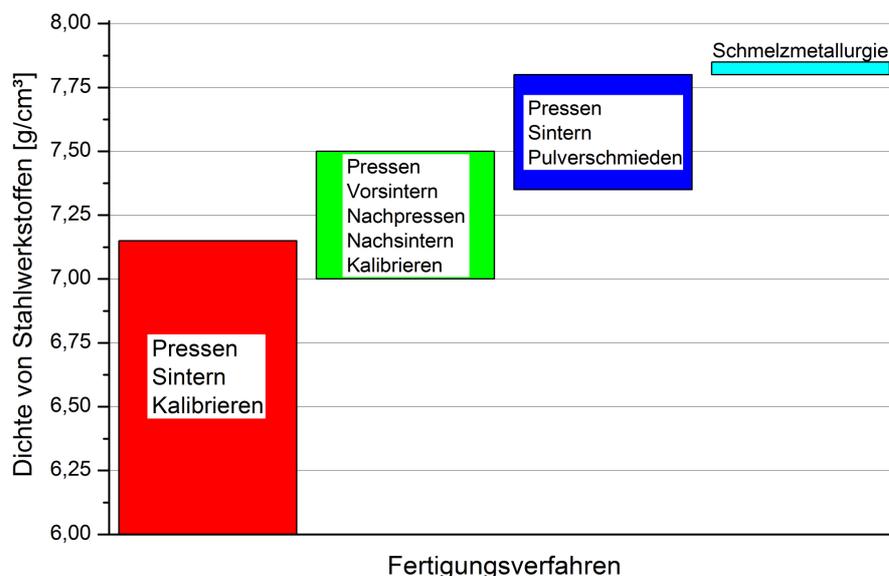


Abbildung 2.2: Dichte von Stahlwerkstoffen in Abhängigkeit der Prozesskette nach [Gro10].

Mit steigender Dichte werden auch bessere Materialeigenschaften erreicht, wobei der volllichte Zustand nur schwierig, etwa durch Sonderverfahren wie Tränken oder Warmverdichten, erreicht werden kann [Ger94, Sch07d]. Die Dichte von komplizierten Sinterkörpern wird meist nach dem archimedischen Prinzip bestimmt [Sch07d].

Allgemein gilt:

Die Dichte eines Sinterkörpers „A“ ist definiert durch:

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} \quad (2.1)$$

$m_A$ .... Masse des Körpers „A“ [g]

$V$ ..... Gesamtvolumen des Körpers [cm<sup>3</sup>]

$\rho_A$ ..... Dichte des Körpers „A“  $\left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

Für den porenfreien Körper „B“, mit dem gleichen Volumen und Werkstoff wie „A“, ist die Dichte, die als theoretische Dichte bezeichnet wird, da sie die maximal erreichbare Dichte für den gesinterten Körper darstellt, gegeben mit:

$$\rho_{th} = \frac{m_B}{V} \quad (2.2)$$

$m_B$ .... Masse des Körpers „B“ [g]

$V$ ..... Gesamtvolumen des Körpers [cm<sup>3</sup>]

$\rho_{th}$  ... theoretische Dichte des Körpers  $\left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

Die relative Dichte des Sinterkörpers ist:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_A}{\rho_{th}} \quad (2.3)$$

$$\rho_{rel\%} = \frac{\rho_A}{\rho_{th}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$\rho_{rel}$ ... relative Dichte des Körpers [-];  $\rho_{rel\%}$ ... relative Dichte des Körpers in Prozent [-]

Die Porosität ergibt sich zu:

$$P = 1 - \rho_{rel} \quad (2.5)$$

$$P_{\%} = 100 - \rho_{rel\%} \quad (2.6)$$

$P$ ... Porosität [-];  $P_{\%}$ ... Porosität in Prozent [-]

In Abbildung 2.3 ist die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dichte dargestellt. Zugfestigkeit und Härte nehmen mit der Dichte linear zu, wogegen die Bruchdehnung, Biegebruchfestigkeit und Schlagzähigkeit erst oberhalb einer Dichte von  $7,5 \text{ g/cm}^3$  einen merklichen Anstieg erfahren [Sch07c, Par00]. Im Gegensatz zu den schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen, bei denen eine Festigkeitssteigerung in einer Abnahme der Bruchdehnung resultiert, werden durch den Dichteanstieg bei PM-Bauteilen sowohl die Festigkeit als auch die Bruchdehnung verbessert [Sch07d]. Der E-Modul von Sinterwerkstoffen liegt zwischen Guss-Werkstoffen und Baustählen [Spu81].

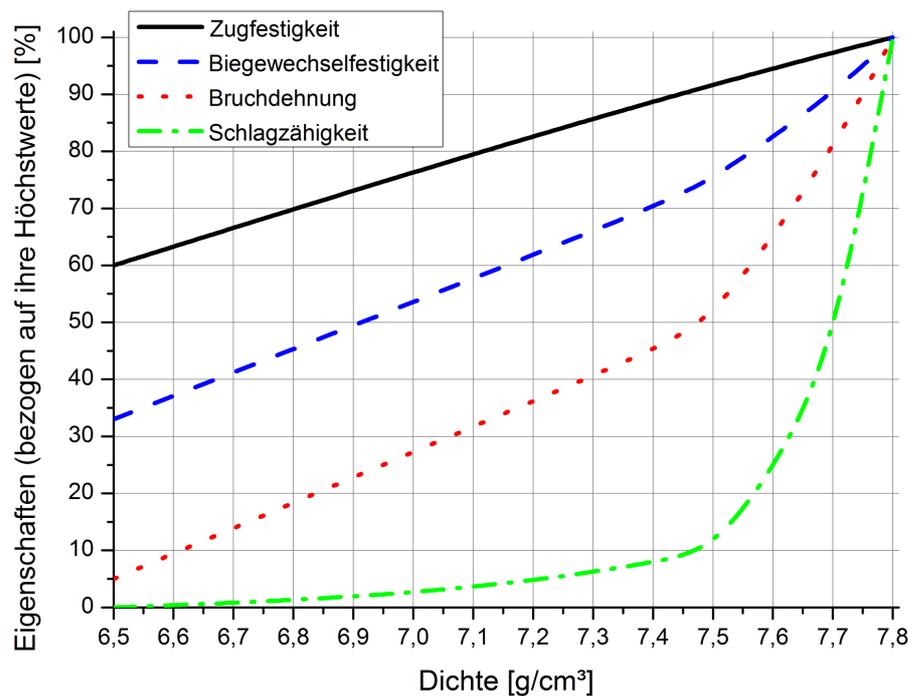


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen der Dichte und wichtigen Eigenschaften von Eisensinterwerkstoffen nach [Sch07c].

Die Mikrostruktur des Werkstoffs, speziell die Porenverteilung, die Porengröße und die Gestalt, wobei zwischen einzelnen und miteinander verbundenen Poren unterschieden wird, ist ebenfalls ein entscheidender Faktor für die Materialeigenschaften. Zudem wirken Poren wie Kerben im Inneren des Werkstoffs. [Sch07d, Shu05]

### 2.2.2 Einfluss des Sinterprozesses auf die Eigenschaften

Gebhardt [Geb07] führt die mechanischen Kennwerte von Sinterwerkstoffen auch auf den Sinterprozess zurück. Die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung steigen mit zunehmender Sinterzeit (Abbildung 2.4). Die Abhängigkeit der Kennwerte von der Sintertemperatur hat den gleichen qualitativen Verlauf wie die der Sinterzeit.

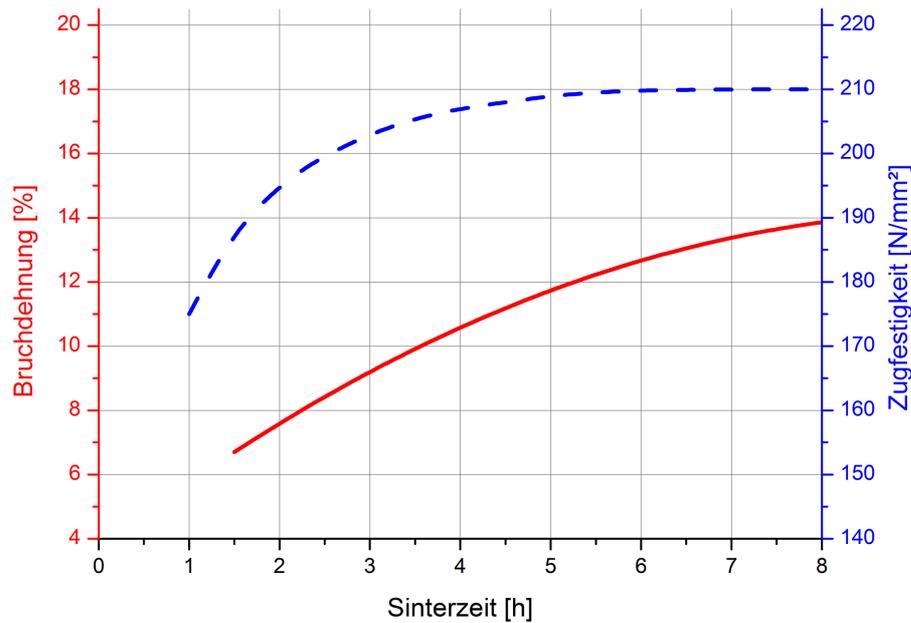


Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Zugfestigkeit (strichlierte Linie) und der Bruchdehnung (volle Linie) von der Sinterzeit für gesintertes Eisenpulver bei 800 °C nach [Geb07].

### 2.2.3 Einfluss der Legierung auf die Eigenschaften

Konventionelle Sinterstähle enthalten vorwiegend die Legierungselemente Kupfer, Nickel, Molybdän und Chrom, oft in Kombination mit Kohlenstoff und Phosphor [Kot03]. Durch gezieltes Legieren von Elementen ist es möglich optimale mechanische Eigenschaften einzustellen. Als Beispiel sei auf das Dreistoffsystem Fe-Cu-C hingewiesen, mit typischen Werten für Kupfer von 1 bis 3 Gewichtsprozent und Kohlenstoff bis 1 Gewichtsprozent. Neben der festigkeitssteigernden Wirkung der Fe-Cu-Mischkristallbildung bewirkt Kupfer auch eine Volumenzunahme des Eisengitters und kann die beim Sintern entstehende Schwindung kompensieren [Kot03, Rat07].

### 2.2.4 Umformverhalten von PM-Bauteilen

Die Verformbarkeit von Sinterwerkstoffen liegt aufgrund der Restporosität im Allgemeinen unter der von schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen [Geb07]. Zwar kann das Material wegen der Poren leichter in eine Gesenkform gedrückt werden, hat dann aber eine verminderte Duktilität. Daher kann es bei hohen Umformungen zu Rissen kommen, die im weiteren Verdichtungsablauf nicht mehr verschweißen. [Sch07c]

## 2.3 Verfahren zur Steigerung der Bauteildichte

Um die mechanischen Eigenschaften der PM-Bauteile zu verbessern, werden diese meist einem dichtesteigernden Verfahren unterzogen (vgl. Kap. 2.2.1) [Fer99]. Unterschieden wird

zwischen globaler und lokaler Verdichtung, wobei unter globaler eine Dichtesteigerung im gesamten Bauteil und unter lokaler Dichtesteigerung meist eine Oberflächenverdichtung verstanden wird [Jon97]. Welche Verdichtung bzw. welches Verfahren eingesetzt wird, ist nicht nur eine anwendungsspezifische, sondern auch eine patentrechtliche Entscheidung [Wal07]. Hier soll nur ein kurzer Überblick der Verfahren der industriellen Praxis gegeben werden.

### 2.3.1 Verfahren zur globalen Dichtesteigerung

Um die globale Dichte eines Bauteils zu erhöhen, gibt es mehrere Prozesse wie Pulverschmieden, Warmpressen oder das Zweifachsinterverfahren.

#### Pulverschmieden

Durch Pulverschmieden werden die guten mechanischen Eigenschaften geschmiedeter Werkstücke und die Vorteile von PM-Bauteilen vereinigt. Dazu wird das Bauteil nach dem Sintern induktiv über die Rekristallisationstemperatur erwärmt und dann geschmiedet. Somit können fast volllichte Bauteile hergestellt werden. [Gro10, Kot03, Pea02]

#### Warmpressen

Beim Warmpressen wird der konventionelle Pressvorgang modifiziert, indem die Verdichtung des Pulvers (vgl. Kap. 2.1.3) bei gleichzeitiger Erwärmung auf Temperaturen von bis zu 150 °C erfolgt. Die bessere Verformbarkeit bei höheren Temperaturen hat eine Absenkung der Gleitmittelmenge und eine Dichtesteigerung um 0,1 bis 0,2 g/cm<sup>3</sup>, im Vergleich zum Kaltverpressen, zur Folge. [Kot03, Pea02]

#### Zweifachpress- und Zweifachsinterverfahren

Nach dem ersten Pressvorgang erfolgt ein Vorsintern, indem das Schmiermittel ausgegast wird und gleichzeitig eine Rekristallisation des Grünlings stattfindet. Der anschließende zweite Pressvorgang und das Nachsintern erhöhen die Dichte auf bis zu 7,45 g/cm<sup>3</sup>. [Kot03]

### 2.3.2 Verfahren zur lokalen Dichtesteigerung

Für eine gezielte Randzonenverdichtung werden das Kalibrieren, das Walzen von Bauteilen, das Fließpressen oder das Kugelstrahlen angewendet.

#### Kalibrieren

Der Kalibrierprozess bei Raumtemperatur ist das wichtigste Verfahren der Nachbehandlung, indem eine Verbesserung der Maßgenauigkeit und Oberflächengüte sowie eine Steigerung der Festigkeit durch Kaltverfestigung erreicht werden. Ein einfaches Nachpressen stellt die

während des Sinterns durch Schwindung verlorene Präzision wieder her und verleiht dem Werkstück Maßtoleranzen von IT 4 bis IT 8, je nach Festigkeit des Bauteils. An Stellen, die gezielt verdichtet werden sollen, wird in der gesinterten Vorform Material als Übermaß mitberücksichtigt, damit dieses während des Kalibriervorgangs verpresst wird. Für geringe örtliche Verformung von Querschnittsübergängen, verbunden mit lokaler Dichteerhöhung, Kaltverfestigung und Einbringung von Druckeigenspannungen, wird das Kalibrieren das kostengünstigste Verfahren bleiben. [Bei99, Spu81]

### Walzen von PM-Bauteilen

Durch das Walzen von Bauteilen werden neben dem Anstieg der Dichte durch Verringern der Porosität und der Festigkeitssteigerung durch Kaltverfestigung in den Randzonen Druckeigenspannungen induziert, die sich positiv auf die dynamischen Festigkeitswerte auswirken. Als Beispiele seien Axialwalzen oder Querwalzen von Zahnrädern genannt. [Bei99, Pla07]

### Fließpressen

Zum Einsatz kommt hauptsächlich das Vorwärtsfließpressverfahren aufgrund des günstigen Druckspannungszustandes. Die Veränderungen der Dichte werden durch das Verhältnis des hydrostatischen Drucks und den auftretenden Scherspannungen während des Pressens eingestellt. Erhöhte Dichten können bis in eine Eindringtiefe von über 1 mm erreicht werden. [Pla07, Ven87]

### Kugelstrahlen

Kugelstrahlen ist ein Kaltumformprozess, bei dem das Bauteil mit vielen kleinen Körpern beschossen wird. Die so entstehenden kleinen Eindrücke verdichten das Material an der Oberfläche und bringen zugleich Druckeigenspannungen ein. Daraus resultieren bessere Dauerfestigkeitswerte, erhöhte Korrosionsbeständigkeit, erhöhtes Reibverschleißverhalten und besseres Spannungsrissverhalten. [Pla07, Sar99]

## **2.4 Vor- und Nachteile der PM**

PM-Bauteile haben sowohl positive als auch negative Charakteristika. Welche überwiegen, ist von der Anwendung abhängig. Tabelle 2.1 fasst die Vor- und Nachteile der PM übersichtlich zusammen.

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der PM nach [Geb07, Mar04, Sch07a].

Vorteile der PM	Nachteile der PM
<ul style="list-style-type: none"> <li>• endform- oder endformnahe Bauteilfertigung</li> <li>• Eigenschaften gezielt einstellbar</li> <li>• schmelzmetallurgisch nicht herstellbare Legierungen produzierbar</li> <li>• Metall-Nichtmetall Werkstoffe herstellbar</li> <li>• keine Schlackenbildung und Seigerungen</li> <li>• hohe Maßhaltigkeit</li> <li>• hohe Werkstoffausnutzung</li> <li>• für Massenproduktion geeignet, da automatisierbar</li> <li>• bis zu 40 % Energie-Ersparnis zu spanend hergestellten Teilen</li> <li>• Gewichtsersparnis bei den Bauteilen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulverherstellung ist teuer</li> <li>• hohe Anforderung an die Reinheit der Pulver und der Arbeitsumgebung</li> <li>• teure Anlagentechnik, da hochpräzise</li> <li>• teure Sinteranlagen</li> <li>• Sintern nur für hohe Stückzahlen wirtschaftlich</li> <li>• begrenzte Bauteilgrößen aufgrund der maximalen Presskräfte der Anlagen</li> <li>• geometrische Einschränkung der Bauteile</li> <li>• Bauteile nicht 100 % porenfrei herstellbar</li> </ul>

## 2.5 Anwendungen für PM-Bauteile

Das Einsatzspektrum der PM ist breit gefächert. Als Beispiele seien Strukturwerkstoffe, Gleitwerkstoffe und Sinterlager, poröse Sinterwerkstoffe, Reibwerkstoffe, Kontaktwerkstoffe in der Elektrotechnik, Funktionswerkstoffe für magnetische und thermische Anwendungen, hochschmelzende Metalle und Hartmetalle genannt.

In Tabelle 2.2 sind Anwendungsgebiete für unterschiedliche Werkstoffgruppen mit Beispielen aufgelistet.

Tabelle 2.2: Anwendungen der PM nach [Mar04].

<b>Werkstoffgruppe</b>	<b>Anwendungsgebiete</b>	<b>Beispiele</b>
Hartmetalle und Hartstoffe, Carbide von W, Ta, Ti mit Co	Zerspanung auf Werkzeugmaschinen, Werkzeugbau	Schneid- und Wendeplatten, Gewindebohrer, Schneideisen, Messbügel
Sintereisen und Sinterstahl: Unlegiert, niedriglegiert, hochlegiert	Fahrzeug- und Maschinenbau, Waffen- und Haushaltstechnik, Werkzeugbau, Elektrotechnik, Feinmechanik, Optik	Stoßdämpferkolben, Zahnriemenräder, Einspritzpumpenkeile, Schnecken, Pumpenräder, Ventilfehrung, Lehren, Führungsleisten, Rändelmuttern und -schrauben
Reibwerkstoffe aus Eisenpulver mit nicht metallischen Zusätzen wie z.B. Asbest, Glas und Grafit	Motorräder und Fahrzeuge, allgemeiner Maschinenbau	Bremsbeläge, Bremsklötze, Kupplungsscheiben, Synchronringe
Poröse Sinterteile aus Eisen und Nichteisen-Pulver ohne oder mit Gleitmittel wie z.B. Öl und Grafit	Maschinenbau, Fahrzeugbau, Haushaltstechnik, chemischer Apparatebau	Gleitlager, Führungsringe, Stoßdämpferkolben, Filter, Düsen, Sinterelektroden, Kolbenringe
Metallkohlenmagnetstoffe für Dauermagnete und Weicheisenteile	Elektrotechnik und Elektromaschinenbau, Feinwerktechnik	Schleifkontakte, Polschuhe, Messgeräte, Kleindynamos, Anker, Spulkerne
Hochschmelzende Reinformetalle wie z.B. W, Ta, Mo, Co und Ni, Kontaktwerkstoffe: Ag und Cu	Elektronische Bauteile, allgemeine Elektrotechnik, Textiltechnik und Vakuumtechnik	Lampendrähte, Elektronenröhren, Schleif- und Gleitkontakte, Schalterteile, Spinddüsen, Kondensatoren
Sinteraluminium und Aluminium-Silicium-Pulver mit und ohne Zusatz von Aluminiumoxid	Maschinen- und Fahrzeugbau, Hochleistungsmotorenteile, Luft- und Raumfahrt	Gleitlager und Getriebeteile, warmfeste und aushärtbare Pleuelstangen und Kolben

### 3. Halbwarmumformung

Werden die Umformverfahren nach der Temperatur eingeteilt, so können drei Bereiche unterschieden werden:

- Kaltumformung
- Warmumformung
- Halbwarmumformung [Kug09]

Die für die vorliegende Arbeit relevante Halbwarmumformung (HWU) vereint die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile der Kalt- und Warmumformung und stellt bereits für typische Bauteilfamilien mit rotationssymmetrischer Grundform die wirtschaftlichste Fertigungsvariante dar [Hei09].

Die HWU findet jedenfalls unterhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffs und zwischen Kalt- und Warmumformung statt. Bei Stahl bedeutet das einen Temperaturbereich zwischen 600 °C und 900 °C, dem Bereich zwischen Blaubruch und Rotbruch (Abbildung 3.1). [Kug09, Lan93, Pöh08]

Mit steigender Temperatur fällt die Fließspannung des Werkstoffs und das Formänderungsvermögen (Bilddbarkeit) nimmt im Allgemeinen zu. Ausnahmen, bei denen Phasenumwandlungen oder Ausscheidungen auftreten, wirken sich negativ auf die Bilddbarkeit aus (Abbildung 3.1). [Buc07]

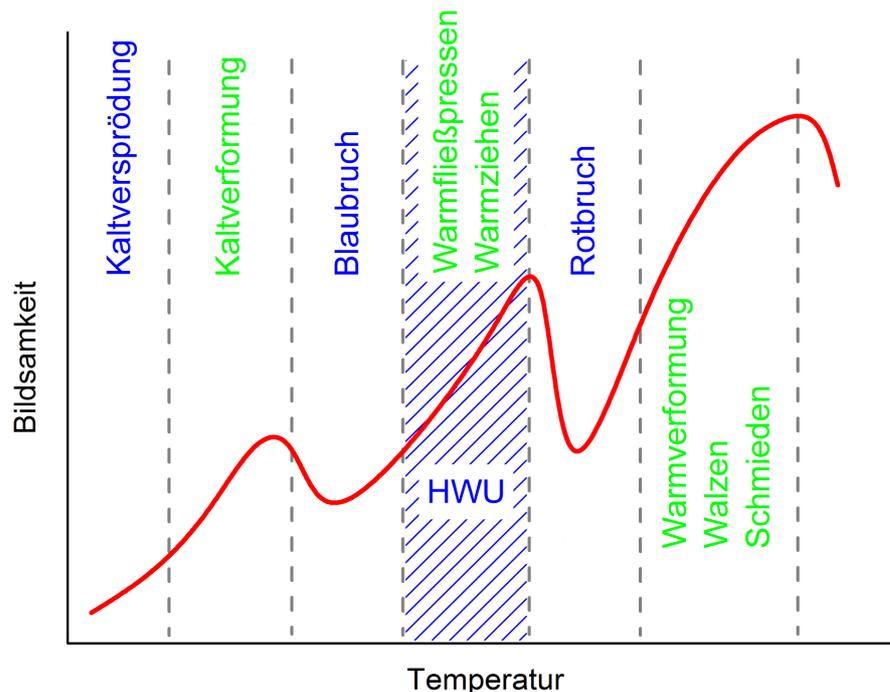


Abbildung 3.1: Bilddbarkeit über der Temperatur von unlegierten Stählen gemäß [Kro66].

### 3.1 HWU im Vergleich zur Kalt- und Warmumformung

Die verbesserte Umformbarkeit der HWU durch die erhöhte Temperatur und die damit verbundene Senkung der Fließspannung gegenüber einer Kaltumformung geht auf Kosten der Oberflächengüte [Kug09]. Im Gegensatz zur Warmumformung hat der Werkstoff bei der HWU noch einen relativ hohen Anteil verbleibender Kaltverfestigung und es treten weder thermisch bedingte Größenänderungen am Bauteil wie Schwindung oder Verzug auf, noch kommt es zur Zunderbildung [Sch08].

Eine Gegenüberstellung der Charakteristika der HWU mit der Kalt- und Warmumformung ist in Tabelle 3.1 angeführt.

Tabelle 3.1: HWU im Vergleich zur Kalt- und Warmumformung nach [Buc07].

	<b>Warmumformung</b> (Gesensschmieden)	<b>HWU</b>	<b>Kaltumformung</b> (Fließpressen)
Formspektrum	beliebig	möglichst rotationssymmetrisch	hauptsächlich rotationssymmetrisch
Formänderungs- vermögen	$\varphi > 1,6$	-	$\varphi < 1,6$
Eingesetzte Stahlqualität	beliebig	C beliebig, niedriglegiert < 10 %	C niedrig < 0,4 % niedriglegiert < 3 %
Fließspannung	20 bis 30 %	30 bis 50 %	100 %
Werkstückgewicht	> 1 kg	100 g bis 50 kg	10 g bis 5 kg
Erreichbare Genauigkeit	IT 12 bis IT 16	IT 9 bis IT 12	IT 7 bis IT 11
Erreichbare Oberflächengüte $R_t$	> 100 $\mu\text{m}$	< 50 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Spanende Nacharbeit	hoch	gering	sehr gering
Losgröße	ab 500 Stück	ab 10 000 Stück	ab 3 000 Stück

### 3.2 Vor- und Nachteile der HWU

Die HWU hat ihre Stärken in der Massenproduktion von rotationssymmetrischen Bauteilen, die aus niedriglegierten Stählen bestehen und keinen allzu großen Auflagen an Oberflächengüten unterliegen. In Tabelle 3.2 sind die wichtigsten positiven und negativen Punkte der HWU zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile der HWU nach [Buc07, Klo10b].

Vorteile der HWU	Nachteile der HWU
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Oberflächenbeschaffenheit</li> <li>• geringere Umformkräfte als beim Kaltumformen</li> <li>• keine Zunderbildung</li> <li>• gute Genauigkeit</li> <li>• keine Oberflächen- und Zwischenglühbehandlung notwendig</li> <li>• einbaufertige Formelemente</li> <li>• alle Stahlqualitäten umformbar, Legierungselemente &lt; 10 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieaufwand für Erwärmung</li> <li>• komplexere Prozessführung</li> <li>• relativ hohe Fließspannungen</li> <li>• Beschränkung der Bauteilgröße</li> <li>• möglichst rotationssymmetrische Bauteile</li> </ul>

### 3.3 Anwendungen der HWU

Die HWU kann grundsätzlich mit jedem Umformverfahren eingesetzt werden, solange es prozesstechnisch durchführbar ist. Gängig ist beispielsweise das Halbwarmfließpressen für achssymmetrische Bauteile wie Gelenksflansche, Flanschzylinder oder Schaltwellen [Hei09, Klo10b, Kug09, Sch08]. Beim Halbwarmziehen von Draht ergibt sich der Vorteil, mehrere Züge ohne Zwischenglühen und Beizen durchführen zu können [Har93].

## 4. Schmiermittel für die HWU

Das vorliegende Kapitel behandelt die Thematik des Schmierens im Temperaturbereich der HWU und ist deshalb auf die Schmiermittel der Warmmassivumformung ohne Berücksichtigung der Kühlschmierung beschränkt.

Schmierung bedeutet die Anwendung von Schmierstoffen zur Verminderung von Reibung und Verschleiß zwischen Werkstück und Werkzeug [Buc07].

### 4.1 Anforderung an Schmiermitteln für die HWU

Diese setzen sich aus den technischen Anforderungen, aus wirtschaftlichen Aspekten und gesetzlichen Vorschriften zur Vermeidung gesundheitsschädlicher Arbeitsbedingungen zusammen [Gul06].

Anforderungen an Schmiermitteln für die HWU sind gemäß [Buc07, Gul06]:

- einfache, reproduzierbare Aufbringung
- leichtes Entfernen
- thermische Stabilität im Einsatzbereich
- unbrennbar
- ungiftig
- wenn möglich geruchlos
- entsorgbar
- gutes Benetzungsvermögen
- gute Trenn- und Treibwirkung
- Verhinderung von Korrosion und anderen chemischen Reaktionen

Die rein technischen Anforderungen, die an Schmierstoffe gestellt werden, resultieren aus einem Zusammenspiel von Temperatur, Druckberührzeit, Oberflächenzustand und Oberflächenrauheit der Schmiedeteile sowie Größe der Formänderung [Gul06].

### 4.2 Arten von Schmiermitteln für die HWU

#### Öle und Fette

Mineralöle bilden die Grundlage für die meisten industriell angewendeten Schmierstoffe. Zur Erhöhung der Trennfestigkeit werden meist Zusätze wie Graphit oder Molybdändisulfid als Festschmierstoff beigemischt. [Buc07]

### Wässrige Suspensionen

Das sind in Wasser gelöste Öle, Seifen- oder Festschmierstoffe. Das Wasser kann dabei zusätzlich zur Aufgabe als Trägermedium auch die einer Kühlwirkung haben. [Buc07]

### Festschmierstoffe

Sie bestehen aus einem Feststoffanteil, einem Schmierstoffträger und Additiven zur Verbesserung der Dispergierbarkeit der Feststoffe und der Benetzungsfähigkeit. Feststoffanteile sind zum Beispiel Grafit, Bornitrid oder Molybdändisulfid. Grafit und Bornitrid weisen bis zu Temperaturen von 600 °C bzw. 1000 °C eine stabile hexagonale Schichtstruktur auf, die das Abgleiten von Ebenen begünstigt. Für das Warmumformen von Stahl haben sich grafithaltige Festschmierstoffe weitgehend durchgesetzt, wobei der Einsatz hinsichtlich Überschmierung und Verschmutzung nicht unproblematisch ist. [Gul06]

## **4.3 Reibwertbestimmung mittels Stauchversuch**

Stauchversuche werden zur Fließkurvenermittlung, aber auch zur Reibwertbestimmung oder dem qualitativen Vergleich von Schmiermitteln herangezogen.

### 4.3.1 Reibung

Stehen zwei Körper miteinander in Kontakt gilt das Coulomb'sche Reibgesetz, das den linearen Zusammenhang zwischen der Reibkraft und der Normalkraft beschreibt mit:

$$|F_R| = \mu \cdot |F_N| \quad (4.1)$$

$F_R$ ..... Reibkraft [N]

$F_N$ ..... Normalkraft [N]

$\mu$ ..... Reibungszahl [-]

Die Reibungszahl  $\mu$  ist ein Maß der Reibkräfte, die zwischen zwei Körpern wirken und sogleich ein Maß für die Schmierfähigkeit eines Trennmittels. Für große Reibkräfte herrschen hohe Reibzahlen und für geringe Kräfte niedrige Reibzahlen. Darum werden grundsätzlich in der Umformtechnik niedrige Reibwerte angestrebt. Die Reibzahl, die für Festkörperreibung Werte über 0,3 besitzt, ist abhängig von der Oberfläche der Reibpartner, der Temperatur, der Umformgeschwindigkeit und dem Umformgrad. [Buc07]

Experimentell kann die Reibungszahl durch Streifenziehversuche für die Blechumformung oder für die Massivumformung durch Ringstauchversuche und Zylinderstauchversuche bestimmt werden. [Buc07]

### 4.3.2 Zylinderstauchversuch

Hauptziel des Zylinderstauchversuchs ist die Ermittlung von Fließkurven, dem Zusammenhang zwischen Fließspannung und Umformgrad [Doe86]. Allerdings kann er auch für eine qualitative Bewertung von Schmiermitteln genutzt werden.

Beim einachsigen Zylinderstauchversuch wird eine zylindrische Probe zwischen zwei ebenen, parallelen Werkzeugflächen gestaucht (Abbildung 4.1).

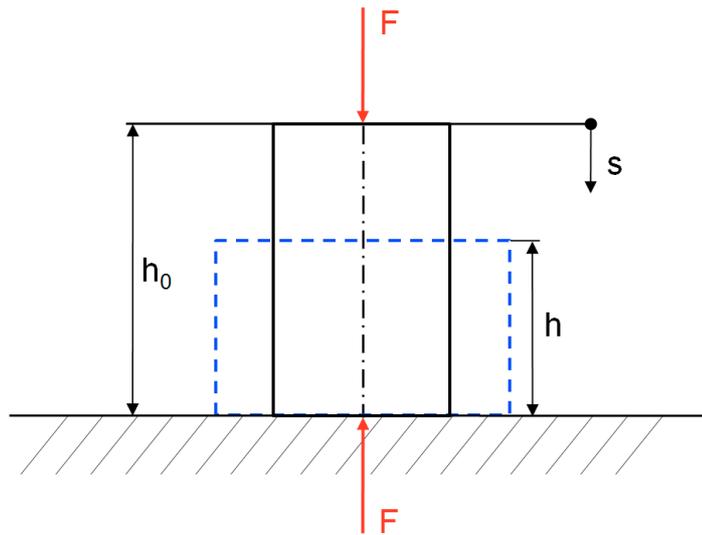


Abbildung 4.1: Schematischer Zylinderstauchversuch.

Unter Vernachlässigung der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes ergibt sich für den Umformgrad:

$$\varphi = \ln \frac{h}{h_0} < 0 \quad (4.2)$$

$\varphi$ ..... Umformgrad [-]

$h$ ..... Endhöhe nach der Stauchung [mm]

$h_0$ ..... Anfangshöhe vor der Stauchung [mm]

Eine weitere Forderung, neben dem einachsigen Spannungszustand, ist eine homogene Formänderung (Probe bleibt beim Umformen zylindrisch), denn bei tonnenförmiger Ausbauchung der Proben ist es kaum möglich den Umformgrad exakt zu erfassen. [Doe86]

Dieses Ausbauchen kann aber für die qualitative Bewertung von Schmiermitteln ausgenutzt werden. Nach Auftragen eines Schmiermittels auf den Stirnflächen der Probe kann nach dem Stauchen auf die Reibverhältnisse rückgeschlossen werden. Denn je größer die

Ausbauchung, desto größer ist die Reibkraft. Das wiederum lässt auf eine höhere Reibungszahl schließen (Abbildung 4.2).

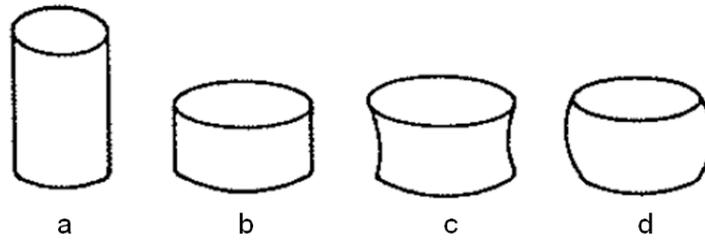


Abbildung 4.2: Einfluss der Schmierung beim Stauchen nach [Doe86].

a: vor dem Stauchen; b: optimale Schmierung, Probe bleibt zylindrisch; c: zu starke Schmierung, Probe wird konkav; d: zu geringe Schmierung, Probe baucht aus

Werden statt Zylinderproben ringförmige Proben verwendet, kann nicht nur aufgrund der Ausbauchung, sondern auch aufgrund der Veränderung des Innendurchmessers auf die Reibungszahl geschlossen werden. Wird der Innendurchmesser größer, liegt eine niedrige Reibungszahl vor und umgekehrt (Abbildung 4.3).

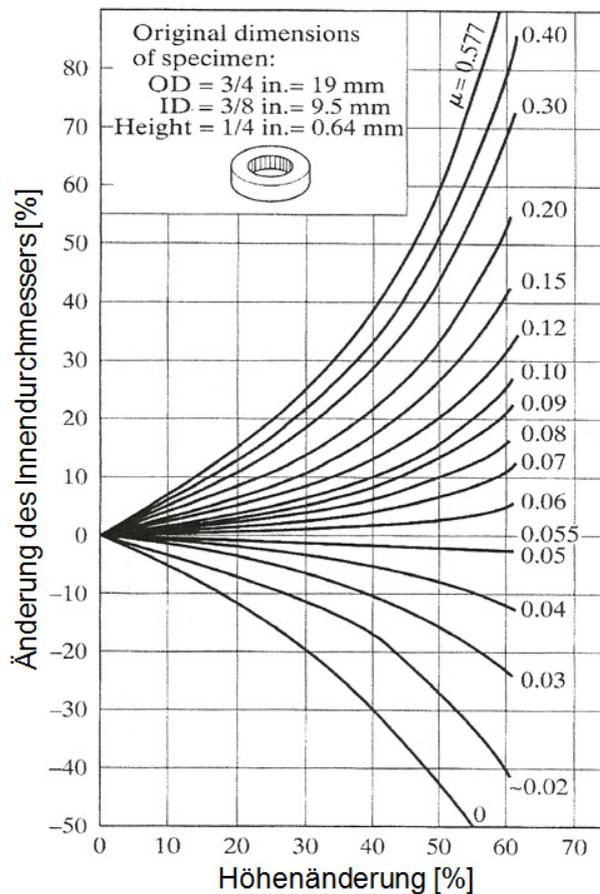


Abbildung 4.3: Auswertung von Ringstauchversuchen zur Ermittlung der Reibungszahl nach [Buc07].

Eine modifizierte Variante des Zylinderstauchversuchs ist der Zylinderstauchversuch nach Rastegaev. Die Zylinderproben sind an den Stirnflächen mit Schmierstofftaschen versehen, in denen das Schmiermittel während des Stauchens festgehalten wird. Der Vorteil dieser Methode ist der nahezu homogene, einachsige Spannungszustand, doch es treten größere Ungenauigkeiten beim Messen der Probenhöhe auf. [Buc07, Doe86]

## 5. Ideen, Zielsetzung und Versuchskonzept

Um den Forderungen nach immer höher belastbaren Bauteilen und komplexeren Geometrien in der PM gerecht zu werden, ist es notwendig, PM-Bauteile mit höheren Dichten bzw. belastungsgerechten Dichteverteilungen herzustellen. Um diese Ziele zu erreichen, können alternative Verfahren gesucht und entwickelt oder bestehende modifiziert werden.

Eine Erweiterung des Prozessspektrums bestehender Nachverdichtungsverfahren erkannte Planitzer [Pla07] in Form der HWU. Als Nutzen der HWU stellt er geringere Umformkräfte und Fertigung größerer Bauteilgeometrien bei gleicher Aggregatsgröße in Aussicht. Angedacht werden zwei Arten der Implementierung.

Die erste Art sieht eine Umformung eines komplett durcherwärmten Bauteils vor, um die Fließspannung gleichmäßig über den gesamten Körper zu reduzieren. Für die zweite Variante ist nur eine lokale Erwärmung in den Randbereichen des Bauteils vorgesehen, um einen Fließspannungsgradienten zu erhalten. Hauptziel neben der Reduzierung der Werkzeugbelastungen ist hierbei das Ausnützen des „umgekehrten Pulverschmiedeeffekts“ zur Erreichung eines Dichtegradienten zwischen dem inneren, kalten Bauteilbereich und der erwärmten, äußeren Bauteilzone.

Die Literaturrecherche zu Anwendungen der HWU in Verbindung mit Sinterbauteilen bzw. Nachverdichtungsschritten blieb weitgehend erfolglos und scheint wissenschaftliches Neuland darzustellen.

Um das Potential der HWU und den praktischen Nutzen zu erfassen, wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik in Leoben in Zusammenarbeit mit der Firma Miba Sinter Austria GmbH in Vorchdorf ein Versuchsplan erstellt. Als Referenz für die Untersuchungen wurde der Kalibrierprozess ausgewählt, weil das Kalibrieren die häufigste Sekundäroperation ist und die Werkzeugbelastungen schon heute grenzwertig sind.

Folgende Zielsetzungen liegen dieser Arbeit zugrunde:

Das primäre Ziel ist es, durch den Einsatz der HWU im Kalibrierprozess die globale Dichte bei gleicher Presskraft, im Gegensatz zum Kalibrieren bei Raumtemperatur, zu erhöhen. Dazu gilt es zuerst ein Schmiermittel, das den Ansprüchen des Halbwarm-Kalibrierens genügt, experimentell zu bestimmen. Anschließend soll ein idealer Temperaturbereich der

HWU gefunden werden. Die zweite Aufgabe besteht darin, eine mögliche Presskraftersparnis bei gleicher Dichte des Bauteils, im Vergleich zum Kalt-Kalibrieren, zu untersuchen. Als dritte Aufgabenstellung wird ein Fokus auf das Formänderungsvermögen gelegt. Zweck dieser Untersuchung ist die Analyse der Umformbarkeit während des Halbwarm-Kalibrierens. Zum Abschluss wird durch rasches Randzonenerwärmen und Kalibrieren eine experimentelle Antwort auf die Möglichkeit zur Einstellung eines Dichtegradienten im Bauteil gesucht.

Zur experimentellen Durchführung werden die einzelnen Zielsetzungen in vier Hauptbereiche (in Tabelle 5.1 gelb hinterlegt) aufgeteilt, die wiederum in verschiedene Versuchsblöcke aufgliedert und nach folgendem Versuchskonzept abgehandelt werden:

Tabelle 5.1: Übersicht des Versuchskonzepts.

	Schmiermittel	Prozesstemperaturen und globale Verdichtung		
Bezeichnung	Block S	Block I	Block II	Block III
Ziel(e): Bestimmung...	<ul style="list-style-type: none"> <li>...eines geeigneten Schmiermittels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>...der optimalen Einsatztemperatur für das WS</li> <li>...der Kraftersparnis durch die HWU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>...eines Temperaturgradienten WZ/WS</li> <li>...eines praxistauglichen Konzepts HWU-global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>...der globalen Dichtesteigerung</li> </ul>

	Umformvermögen	Lokale Verdichtung	
Bezeichnung	Block IV	Block V	Block VI
Ziel(e): Bestimmung...	<ul style="list-style-type: none"> <li>...der Änderung des Verformungsvermögens durch die HWU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>...des Dichtegradienten, erzeugt durch induktive Erwärmung</li> <li>...praxistaugliches Konzept</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>...des Dichtegradienten über WZ-Kontakt</li> <li>...praxistaugliches Konzept</li> </ul>

In den nachfolgenden Kapiteln werden die vier Versuchsblöcke „Schmiermittel“, „Prozesstemperaturen und globale Verdichtung“, „Umformvermögen“ und „lokale Verdichtung“ ausführlich erläutert und zum Abschluss Vorschläge zur industriellen Umsetzung präsentiert.

## 6. Experimenteller Teil: Schmiermittel

Ziel des Versuchsblocks S (Tabelle 5.1) ist es, ein geeignetes Schmiermittel für die nachstehenden Untersuchungen zum Halbwarm-Kalibrieren im Temperaturbereich von 300 °C bis 600 °C zu finden. Dazu werden vier verschiedene Schmiermittel auf Festschmierstoffbasen mittels Ringstauchversuche (Kapitel 4.3.2) miteinander verglichen.

### 6.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau

Um ein Schmiermittel auszuwählen, werden pro Trennmittel je drei Proben bei 400 °C und 600 °C auf halbe Höhe gestaucht, was einem Umformgrad von  $\varphi = 0,7$  entspricht. Durch einen Vergleich des Verhältnisses der Änderung des Innendurchmessers zur Höhenänderung wird das am besten geeignete Schmiermittel bestimmt. Mit diesem wird im Weiteren eine Parameterstudie bei 400 °C, 500 °C und 600 °C, mit Umformgraden von  $\varphi = 0,1$  bis  $\varphi = 1,5$ , durchgeführt.

#### Proben

Die Proben für die Stauchversuche zur Schmiermittelauswahl werden aus dem gleichen Werkstoff wie die Proben für die Parameterstudie und die Proben für die Halbwarm-Kalibrierversuche hergestellt. Verwendet wird ein Stahl der industriellen Praxis mit 0,2 % C und 0,85 % Mo und der internen Firmenbezeichnung „SK6204“. Die Abmessungen der Proben sind aus Abbildung 6.1 zu entnehmen.

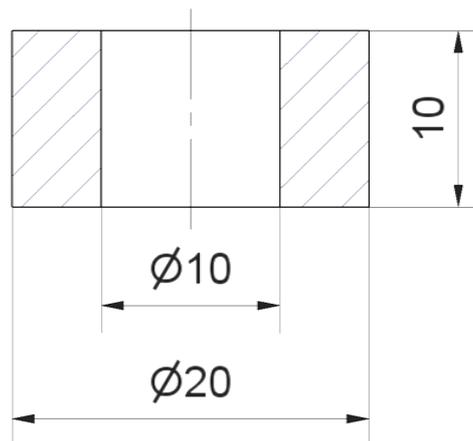


Abbildung 6.1: Geometrie der Ringstauchproben (Angaben in mm).

#### Presse

Für die Stauchversuche wird die 1 MN Hydraulik-Pressen am Lehrstuhl für Umformtechnik in Leoben verwendet. Die in Abbildung 6.2 gezeigte Stauchvorrichtung besteht aus einem vertikal beweglichen Oberstempel, einem Unterstempel, einer Kraftmessdose und einer

Keramikplatte, die zwischen Unterstempel und Kraftmessdose positioniert ist, um den Wärmetransport vom erhitzten Stempel zum Kraftaufnehmer zu reduzieren. Um die erhaltenen Ergebnisse auf nachfolgende Experimente übertragen zu können, wird als Werkstoff für die Stempel der gleiche Warmarbeitsstahl „Böhler W360 Isobloc“ gewählt, der bei den Werkzeugen für die Halbwarm-Kalibrierversuche zum Einsatz kommt. Als Geschwindigkeit für den Stempelhub wird 2 mm/s eingestellt und weggesteuert bis zu den unterschiedlichen Höhenniveaus des Versuchsprogramms verpresst.

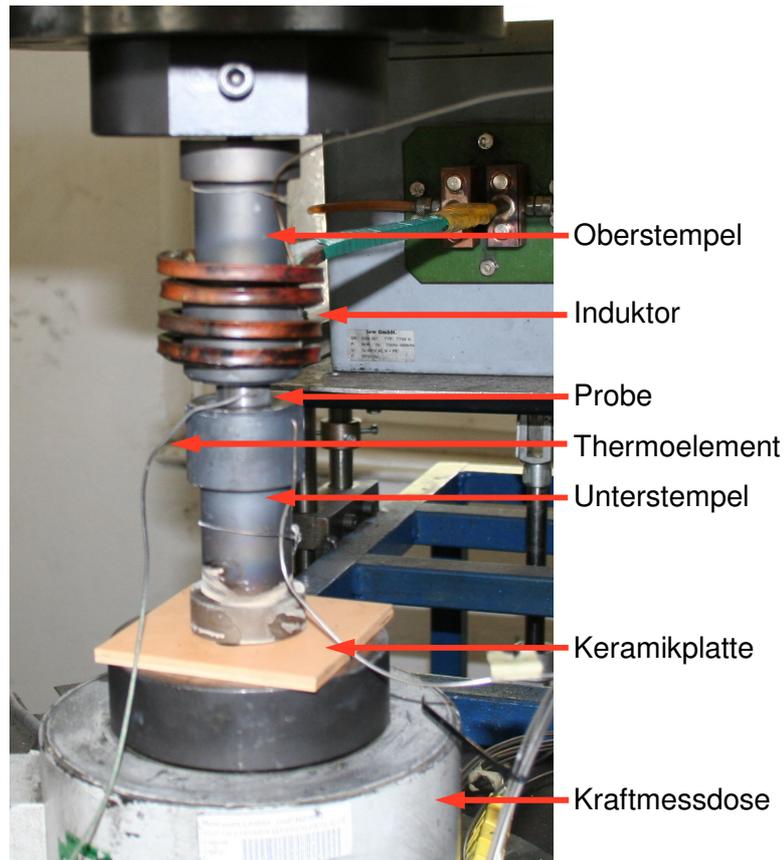


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau der Ringstauchexperimente.

### Heizvorrichtung

Zum Erwärmen der Proben wird ein Induktor eingesetzt, der den Ober- und Unterstempel zeitgleich aufheizt und es dem Oberstempel ermöglicht, durch die Induktorschleife hindurch die Proben zu verpressen (Abbildung 6.2). Da beim induktiven Erwärmen der Proben die Randbereiche erhitzt werden und von dort aus die Wärme radial in Richtung Probenkern übertragen wird, treten bis zum Erreichen der Endtemperatur Temperaturgradienten im Bauteil auf. Darum wird der Probenrand eine bestimmte Zeit auf der Solltemperatur gehalten, um eine homogene Temperaturverteilung im Bauteil sicherzustellen. Diese Haltezeit beträgt für die 400 °C-Versuche 60 s und 100 s für die Versuche bei 600 °C. Zur Regelung des Induktors wird an der Mantelfläche der Proben auf halber Höhe ein Thermoelement angepunktet.

### Experimenteller Ablauf

Die mit Schmiermittel versehenen Proben werden am Unterstempel zentrisch positioniert. Der Oberstempel wird anschließend abgesenkt, bis dieser mit der Probe in Kontakt steht. Nach dem Positionieren des Induktors beginnt der Aufheizvorgang mit folgender Haltezeit. Nach Beendigung des Erwärmungsprozesses startet der weggesteuerte Pressvorgang.

### Auswertung

Nach dem Verpressen werden die Schmiermittelüberreste durch mechanisches Säubern und Reinigen mit Seife sowie Ethanol entfernt. Abschließend werden die Proben getrocknet. Dem folgt die Ermittlung der Höhe sowie des Innendurchmessers mittels Messschiebers.

## **6.2 Getestete Schmiermittel**

Vier Schmiermittel stehen zu Verfügung, die im Folgenden überblicksmäßig gegenübergestellt werden.

### Molybdändisulfid-Grafitspray

Dieses Schmiermittel ist eine Sprühpaste und enthält die Festschmierstoffe Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) und Grafit. Laut Hersteller ist dieses Schmiermittel für langsame Gleitbewegungen, hohe Drücke und hohe Temperaturen bis 650 °C geeignet. [Crc10a]

### Grafit-Gleitlack

Bestehend aus reinem und sehr feinem elektrisch leitfähigem Grafitpulver ist dieses thermoplastische Bindemittel für Gleit- und Trennmittelanwendungen und auch als Leitlack geeignet [Crc10b].

### Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis

Dieser Schmierstoff ist ein lösungsmittelhaltiges Beschichtungsmittel auf der Basis von Ethanol und dem hexagonalen Festschmierstoff Bornitrid mit Zusätzen eines anorganischen Bindemittels. Laut Hersteller ist das Beschichtungsmittel an Luft bis etwa 900 °C temperaturbeständig. [Hen10]

### Mineralöl mit Festschmierstoffen

Das Mineralöl enthält hohe Anteile an weißen, synergetisch wirkenden Anteilen von Festschmierstoffen und ist bis 1150 °C einsetzbar. Genauere Angaben sind aus dem Datenblatt des Herstellers nicht entnehmbar. [Wes10]

### 6.3 Ergebnisse und Schmiermittelvergleich

Um die Schmiermittel untereinander qualitativ vergleichen zu können, wird das Verhältnis der Änderung des Innendurchmessers zur Höhenänderung (vgl. Kapitel 4.3.2, Abbildung 4.3) ausgewertet. Je größer der negative Wert der Änderung des Innendurchmessers ist, desto kleiner ist auch die Reibzahl.

Dabei wird die Höhenänderung in Prozent berechnet mit:

$$\Delta h_{\%} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100 \quad (6.1)$$

$\Delta h_{\%}$  .. Höhenänderung in Prozent [-]

$h_0$ ..... Ausgangshöhe der Probe [mm]

$h_1$ ..... Endhöhe der Probe [mm]

Die Änderung des Innendurchmessers in Prozent ergibt sich aus:

$$\Delta d_{\%} = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \cdot 100 \quad (6.2)$$

$\Delta d_{\%}$  .. Änderung des Innendurchmessers in Prozent [-]

$d_0$ ..... Ausgangs-Innendurchmesser der Probe [mm]

$d_1$ ..... End-Innendurchmesser der Probe [mm]

Die an ein Schmiermittel gestellte Forderung, eine niedrige Reibungszahl  $\mu$  zu besitzen (vgl. Kapitel 4.1 und Kapitel 4.3.1), wird von jenen Schmiermitteln erfüllt, die in Abbildung 6.3 im unteren Bereich des Diagramms liegen.

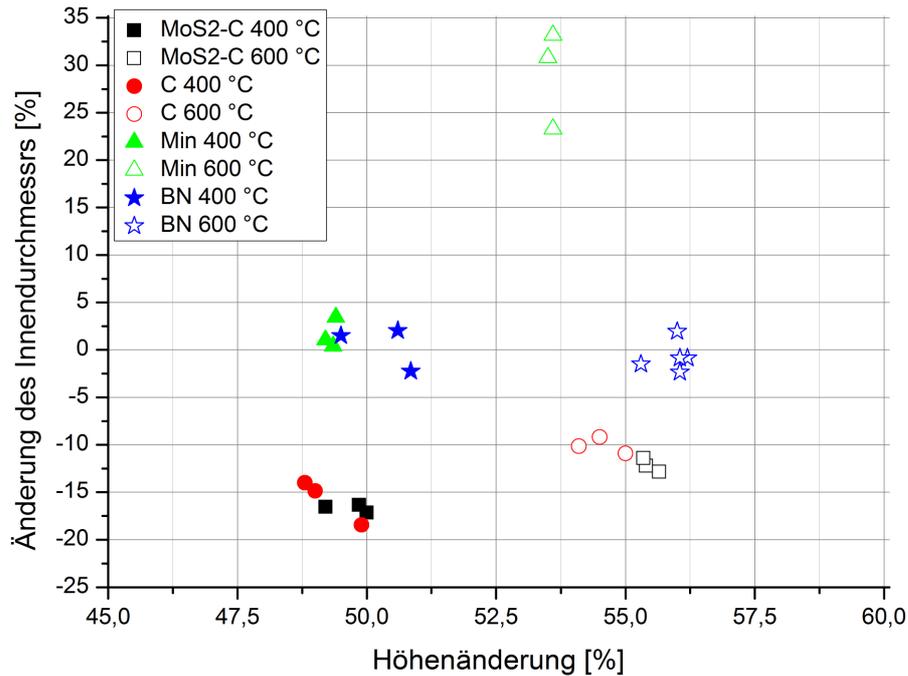


Abbildung 6.3: Vergleich der vier Schmiermittel.

MoS<sub>2</sub>-C: MoS<sub>2</sub>-Grafitspray; C: Grafit-Gleitlack; Min: Mineralöl mit Festschmierstoffen; BN: Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis

Die besten Reibwerte erreichen der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray (MoS<sub>2</sub>-C) und der Grafit-Gleitlack (C). Beide Schmiermittel können problemlos aufgetragen und dosiert werden. Ab einer Versuchstemperatur von 400 °C tritt eine kurzzeitige Rauchentwicklung auf. Nach den 400 °C-Versuchen sind die Schmiermittelrückstände des MoS<sub>2</sub>-Grafitsprays leicht und die des Grafit-Gleitlacks etwas schwieriger entfernbar. Nach den 600 °C-Versuchen ist das Säubern der Proben allgemein schwieriger bzw. eine vollständige Entfernung der Rückstände nicht möglich.

Mit dem MoS<sub>2</sub>-Grafitspray versehene Proben bleiben bis zum Ende des Stauchprozesses nahezu zylinderförmig (Abbildung 6.4). Im Gegensatz dazu bauchen Proben mit Grafit-Gleitlack als Schmiermittel in Folge höherer Reibung an den Stirnflächen geringfügig aus (Abbildung 6.5).



Abbildung 6.4: Mit MoS<sub>2</sub>-Grafitspray als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und  $\varphi = 0,81$ .

Aufgrund der guten Schmierwirkung kommt es zu keinem Ausbauchen.



Abbildung 6.5: Mit Grafit-Gleitlack als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und  $\varphi = 0,78$ .

Der Grafit-Gleitlack bewirkt eine schlechtere Schmierwirkung als der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray und führt zu einem geringen Ausbauchen der Proben.

Weniger geeignet sind das Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis (BN) und das Mineralöl mit Festschmierstoffen (Min) (vgl. Abbildung 6.3). Bei 400 °C liegen beide Schmiermittel bei ähnlichen Reibungszahlen, die jedoch deutlich über jenen vom MoS<sub>2</sub>-Grafitspray und Grafit-Gleitlack liegen. Bei 600 °C weist das Mineralöl deutlich höhere Reibwerte als alle anderen Schmierstoffe auf.

Das Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis weist bei 600 °C schlechtere Reibeigenschaften auf als der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray und der Grafit-Gleitlack. Das Auftragen und Dosieren vom Bornitrid Beschichtungsmittel ist zwar benutzerfreundlich, jedoch beim Aufbringen einer zu

dicken Schicht platzt diese ab und die Schmierwirkung geht verloren. Zudem kann die Schmiermittelschicht nicht vollständig entfernt werden (Abbildung 6.6).



Abbildung 6.6: Mit dem Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis als Schmiermittel verpresste Ringtauchprobe bei 600 °C und  $\varphi = 0,82$ .

Die weißen Schmiermittelrückstände sind nicht vollständig entfernbar.

Das Mineralöl verursacht bei 400 °C eine Rauchbildung, die bei hohen Temperaturen stärker wird. Das Säubern der Proben ist nicht vollständig möglich und übrig bleibt ein brauner Feststoff auf der Probenoberfläche. Weitere Merkmale sind starkes Ausbauchen der Proben und Rissbildung an den Mantelflächen der Proben (Abbildung 6.7).



Abbildung 6.7: Mit dem Mineralöl mit Festschmierstoffen als Schmiermittel verpresste Ringtauchprobe bei 600 °C und  $\varphi = 0,77$ .

Die Probe weist eine starke Ausbauchung, Risse an der Mantelfläche (markiert mit roten Kreisen) und braune Schmiermittelrückstände auf.

Aus diesen Ergebnissen resultiert, dass von den vier zu Verfügung stehenden Schmiermitteln der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray für die Halbwarm-Kalibrierversuche am besten geeignet ist.

Um das Eigenschaftsprofil des MoS<sub>2</sub>-Grafitsprays für das Temperaturfenster der HWU bei verschiedenen Umformgraden zu erfassen und um allgemeine Erkenntnisse zu erlangen, wird eine Parameterstudie durchgeführt.

Dazu werden bei 400 °C, 500 °C und bei 600 °C je 24 Proben verpresst. Für jedes Temperaturniveau werden Proben mit gleicher Ausgangshöhe auf unterschiedliche Endhöhen von 9 mm bis auf 2 mm in 1-Millimeterschritten gestaucht. Pro Temperatur und Höhenniveau werden drei Proben verpresst. Die Auswertung erfolgt analog zu den vorangehenden Schmiermittelversuchen und ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

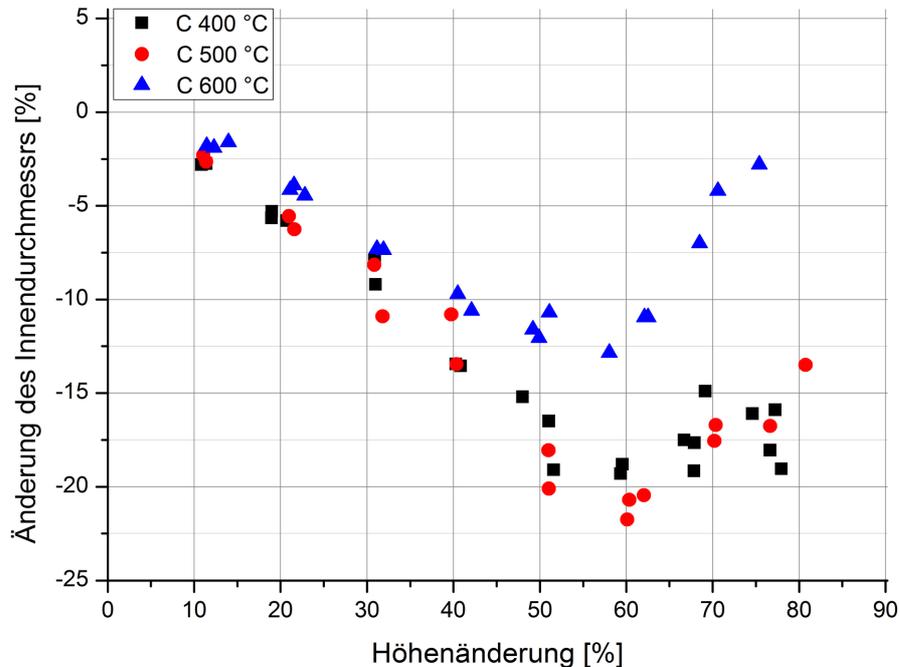


Abbildung 6.8: Charakterisierung des MoS<sub>2</sub>-Grafitsprays.

Die Reibungszahl bei 600 °C liegt am höchsten, die bei 400 °C und 500 °C sind niedriger, aber auf ähnlichem Niveau. Ab einer Höhenänderung von 60 % (entspricht einem Umformgrad  $\phi \approx 0,9$ ) kommt es wieder zu einer Innendurchmesser-Reduzierung. Gründe dafür werden nicht gesucht, da dies nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

## 6.4 Diskussion und Problemstellungen

Das vorliegende Ergebnis, mit dem MoS<sub>2</sub>-Grafitspray als aussichtsreichste Variante der Schmierung für das Halbwarm-Kalibrieren, darf nicht als allgemeingültige Tatsache gesehen

werden. Vielmehr ist der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray, verglichen mit den anderen untersuchten Schmiermitteln, der Schmierstoff, der den für diese Arbeit vorliegenden Ansprüchen am besten und universellsten genügt. Eine genaue Aussage bzw. Empfehlung für einen speziellen Schmierstoff kann erst getroffen werden, wenn Größen wie der exakte Temperaturbereich und Kontaktkräfte des Halbwarm-Kalibrierens bekannt sind.

### Problemstellungen

Während des Stauchens kann die Temperatur der Proben nicht gemessen werden. Da es beim Erwärmen der Proben zu einem Temperaturunterschied zwischen Mantelfläche und Innerem der Proben kommt, wird eine Haltezeit vorgesehen, um eine homogene Temperaturverteilung in der Probe sicherzustellen.

Das angebrachte Thermoelement zur Regelung des Induktors kann das Stauchen bzw. Ausbauchen beeinflussen und zu Rissen nahe dem Thermoelement führen.

Ein gleichmäßiges Auftragen ist vom Schmiermittel und von der Auftragungsart abhängig. Bis auf das Mineralöl, das durch Aufpinseln auf die Proben angebracht wird, werden bei dem Versuchsblock S alle Schmiermittel per Handspraydose aufgetragen. Weiters kann die Dosierung der Schmiermittelmenge Auswirkungen auf das Messergebnis haben.

Bei der Vermessung der Proben kann es zu Ablesefehlern oder zu geometrisch bedingten schwierigen Ablesebedingungen kommen (elliptische Proben, ungleichmäßige Höhe der Proben).

## 7. Experimenteller Teil: Prozesstemperaturen und globale Verdichtung

Diese Experimente haben als Hauptziele das Untersuchen der Kräfteersparnis der HWU und Abklären eines Dichteanstiegs im Gegensatz zum Kalt-Kalibrieren. Dazu wird ein Temperaturfenster für das Bauteil und mögliche Temperaturgradienten zwischen Werkzeug und Werkstück definiert.

### 7.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau

#### 7.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf

Die Versuchseinrichtung für das Halbwarm-Kalibrieren besteht aus einer Kalibriervorrichtung, die in einer 1 MN-Hydraulikpresse montiert ist und einem Konvektionsofen zur Erwärmung der Proben. Die Kalibriervorrichtung besteht aus einer Stempereinheit und einer Matrizeneinheit, die Sockel und Kraftmessdose umfasst (Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2).

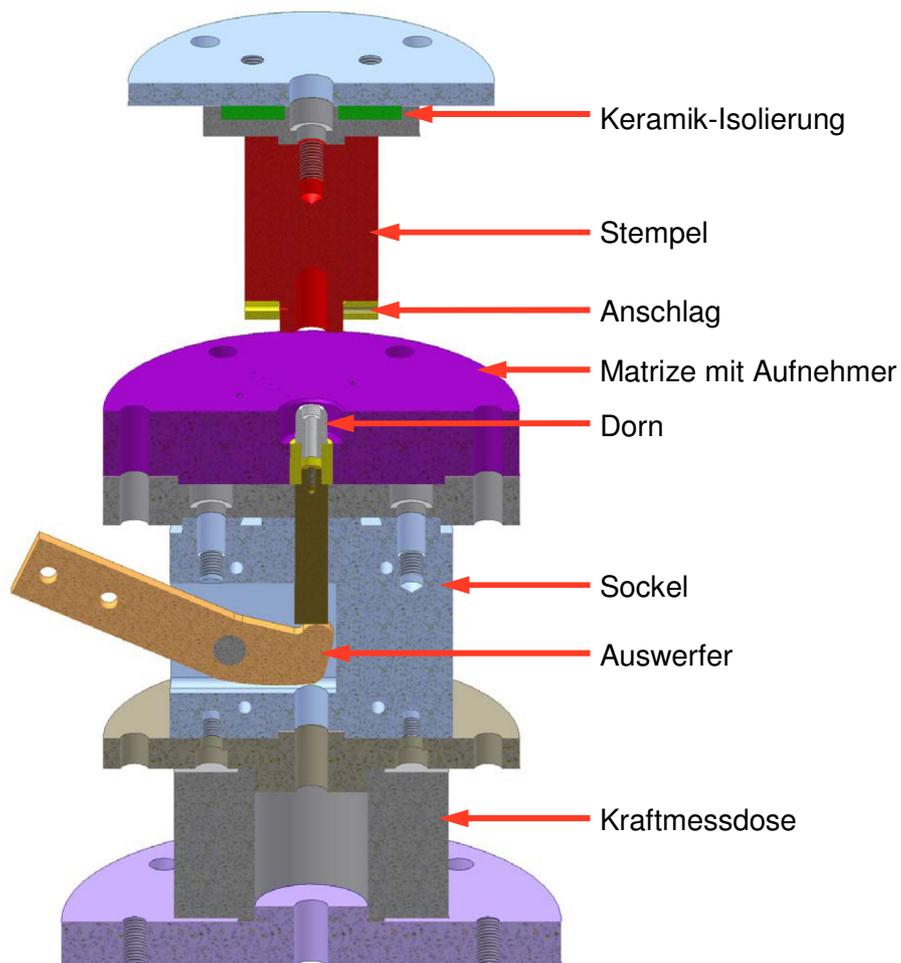


Abbildung 7.1: Vollschnitt der Versuchsvorrichtung der HWU-Versuche.

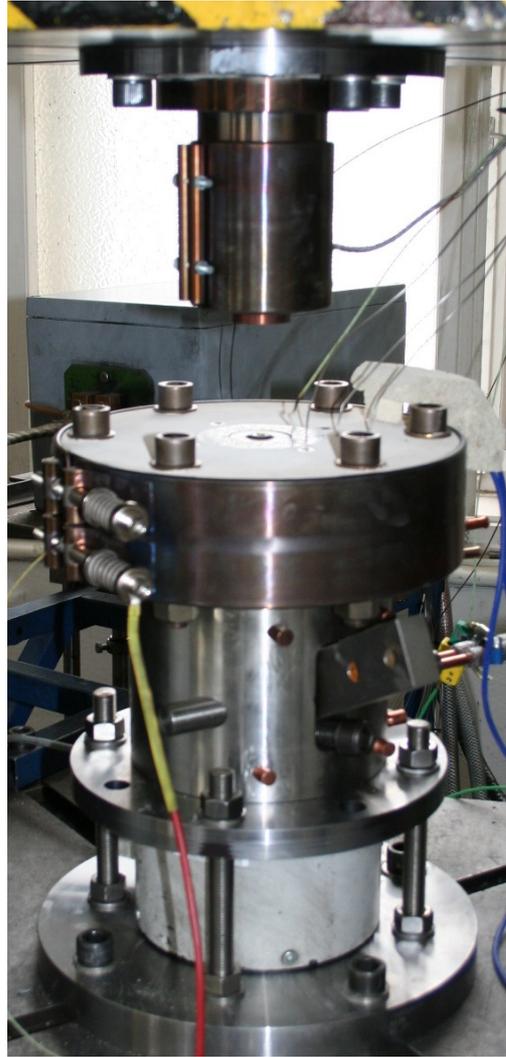


Abbildung 7.2: Versuchseinrichtung für das Halbwarm-Kalibrieren.

Der Stempel ist aus dem Warmarbeitsstahl „Böhler W360 Isobloc“ gefertigt und die Stempereinheit schließt nach oben hin zur Presse mit einer Keramik-Isolierung ab, damit die Wärmeleitung zur Presse vermindert wird (Abbildung 7.3). Am Stempel ist eine Heizmanschette angebracht, die eine Heizleistung von 1,8 kW aufweist und über ein Thermoelement kann die Temperatur während der Versuche gemessen werden. Für die weggesteuerten Versuche wird ein Anschlag am Stempel montiert.

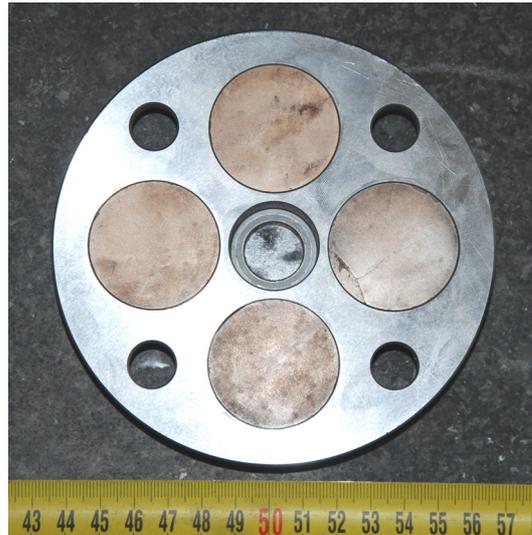


Abbildung 7.3: Stempereinrichtung mit Keramikscheiben.

Die Matrize, gefertigt aus dem Warmarbeitsstahl „Böhler W360 Isobloc“, wird durch eine Heizmanschette mit 5,5 kW Leistung erwärmt. In der Matrize sind in radialer Richtung Bohrungen eingebracht, in denen während der Versuche Thermoelemente installiert sind. Diese gewährleisten die Ermittlung der Temperaturverteilung in der Matrize. Bei den Versuchsblöcken I bis III wird die Matrize für zylinderförmige Proben verwendet (Abbildung 7.4). In der Mitte der Matrize liegt der Dorn, der bei allen HWU-Experimenten eingesetzt wird und ein Zentrieren der Proben sowie ein Auspressen der verpressten Bauteile von unten zur Aufgabe hat. Dazu ist der Auswerfer implementiert, der den Dorn nach oben bewegt. Die Matrize ist mit dem Sockel durch einen Aufnehmer verbunden. Der Sockel wird durch eine Wasserkühlung mit ca. 2 l/min Durchlauf gekühlt und ist zudem aus austenitischen Stahl, der eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit aufweist, damit der Wärmefluss zur temperaturempfindlichen Kraftmessdose vermindert wird.

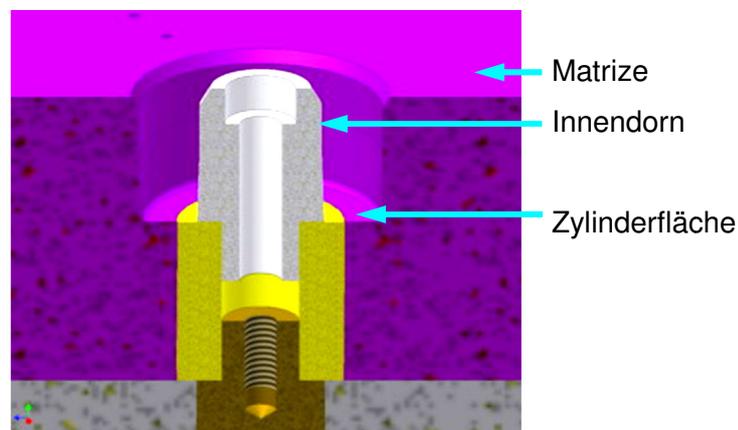


Abbildung 7.4: Detail der Matrize für Zylinder-Proben mit Dorn.

Der Ofen dient zum Erwärmen der Proben und erreicht eine maximale Temperatur von 600 °C. Damit die Proben während des Transports vom Ofen zur Matrize nicht auskühlen, werden diese in Transportboxen gelegt und darin im Ofen erwärmt (Abbildung 7.5). Diese haben auf der Unterseite einen entfernbar Deckel, damit die Proben von der Box in die Matrize fallen können. Zum Transportiert wird eine Zange verwendet.

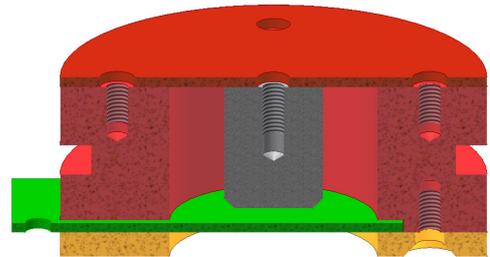
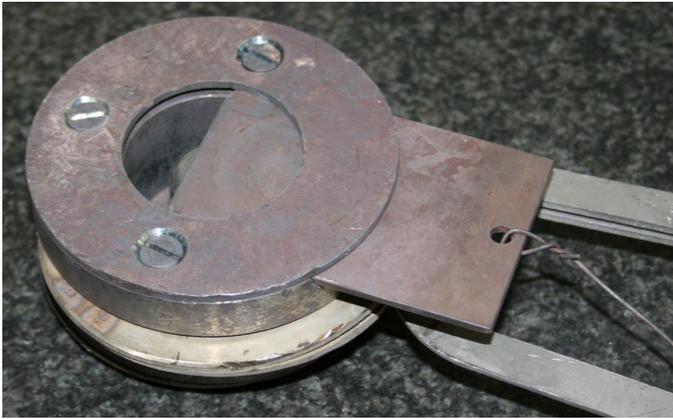


Abbildung 7.5: Transportbox der Proben mit Deckel und Zange (links) und im Querschnitt (rechts).

### Experimenteller Ablauf

Zur Erwärmung werden die mit Schmiermittel versehenen Proben in eine Transportbox gelegt und dann im Ofen auf die erforderliche Temperatur gebracht. Mit einer Zange wird der Transport vom Ofen zur Matrize vollzogen. Nach dem Positionieren der Transportbox mit der darin befindlichen Probe über der erwärmten Matrize, wird der Deckel der Box entfernt und die Probe fällt in das Werkzeug. Dabei zentriert der Innendorn die Probe. Dann wird die Probe durch den Stempel verpresst und dem folgt das Auspressen der Probe durch den Auswerfer.

#### 7.1.2 Proben

Verpresst werden gesinterte, zylindrische Proben (Zylinder-Proben) aus einem Stahl der industriellen Praxis mit der internen Firmenbezeichnung „SK6204“ (0,2 % C und 0,85 % Mo) und einer Anfangsdichte von 7,02 g/cm<sup>3</sup>, was einer relativen Dichte von 89,4 % sowie einer Porosität von 10,6 % entspricht. Die Ausgangsgeometrie der Zylinder-Proben ist der Endgeometrie nach dem Verpressen in Abbildung 7.6 gegenübergestellt.

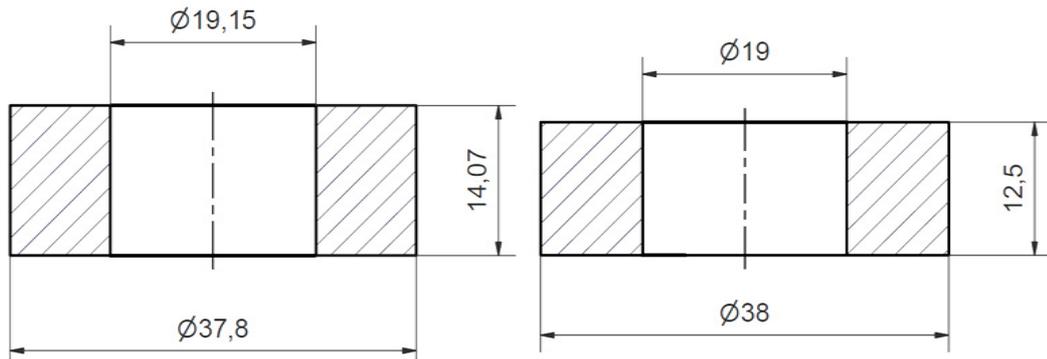


Abbildung 7.6: Ausgangsgeometrie (links) und Endgeometrie (rechts) der Zylinder-Proben (Angaben in mm).

### 7.1.3 Versuchsblöcke I bis III

#### Block I: Krafterparnis durch HWU und Finden der Einsatztemperaturbereiche

Der Grundgedanke ist, den Schmiedeeffekt, der bei über 1000 °C heißen Werkstücken in Kontakt mit 200 °C kalten Werkzeugen auftritt, zu vermeiden. Der Schmiedeeffekt bedingt, dass die Randbereiche des Werkstücks auskühlen und das Innere der Probe noch hohe Temperaturen aufweist und somit eine niedrigere Fließspannung hat. Bei der Umformung von Sinterbauteilen bedeutet dies, dass das Bauteil innen verdichtet wird und außen Poren aufgrund der Abkühlung verbleiben.

Dieser Effekt soll in den Versuchen verhindert werden, indem das Werkzeug stets eine um 6 % höhere Temperatur in Grad Kelvin als das Werkstück besitzt. Im Versuchsblock werden je zwei Proben mit 20 °C und 300 °C bis 550 °C in 50 °C-Schritten und 587 °C verpresst. Die Temperaturbegrenzung bis 587 °C ergibt sich aufgrund der Heizleistung der Matrizen-Manschette und den zulässigen Wärmebelastungen des Werkstoffs. Die Proben werden auf die gleiche Endhöhe gestaucht, damit sie den gleichen Umformgrad erfahren. Dazu wird ein Anschlag auf dem Stempel montiert, der ein weiteres Verpressen der Proben nach Aufliegen des Anschlags auf der Matrize verhindert. Als Abbruchbedingung der Presse dient eine maximale Presskraft von 920 kN, um eine Überlastung des Aufbaus zu vermeiden. Als Schmiermittel wird der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray verwendet und die Stempelgeschwindigkeit wird mit 2 mm/s gewählt.

#### Block II: Finden des idealen Temperaturgradienten zwischen Werkzeug/Werkstück

Um den Schmiedeeffekt in den Randbereichen zu verhindern und einen optimalen Temperaturgradienten zwischen Werkstück und Werkzeug zu erhalten, werden je zwei Proben bei konstanter Werkstück-Temperatur von 450 °C und variierenden Werkzeug-Temperaturen von 450 °C bis 600 °C in 50 °C-Schritten verpresst. Der

Pressvorgang, der bei 920 kN gestoppt wird, ist durch den Anschlag am Stempel weggesteuert und alle Proben erreichen die gleiche Endhöhe und den gleichen Umformgrad. Als Trennmittel dient der MoS<sub>2</sub>-Grafitsspray und die Stempelgeschwindigkeit beträgt 2 mm/s.

### Block III: Dichtesteigerung durch die HWU

Diese Experimente haben als Ziel, eine mögliche Dichtesteigerung der HWU zu beziffern. Die Versuche werden nach der Presskraft in einen 600 kN und 900 kN Versuchsblock unterteilt. Die Werkstück-Temperaturen sind gleich groß wie die Werkzeug-Temperaturen und werden mit 20 °C und 300 °C bis 600 °C in 50 °C-Schritten gewählt. Der Pressvorgang wird kraftgesteuert ohne Anschlag durchgeführt. Darum ergeben sich bei den verschiedenen Temperaturen aufgrund der unterschiedlichen Fließspannungen auch unterschiedliche Endhöhen und Umformgrade. Zusätzlich werden mittels Induktor Proben auf Temperaturen über 600 °C erhitzt, um ein rasches Erwärmen ohne Zunderbildung zu ermöglichen. Je zwei Proben werden bei einer konstanten Werkzeug-Temperatur von 450 °C und Werkstück-Temperaturen von 450 °C bis 900 °C in 50 °C-Schritten verpresst. Das Schmiermittel ist der MoS<sub>2</sub>-Grafitsspray und die Stempelgeschwindigkeit beträgt 2 mm/s.

#### 7.1.4 Auswertung

Alle Proben werden nach dem Verpressen einer Reinigung unterzogen, die ein mechanisches Säubern, Abwischen mit Hilfe handelsüblicher Flüssigseife und Ethanol mit abschließendem Trocknen umfasst. Die Dichtebestimmung der Proben erfolgt nach dem archimedischen Prinzip durch die Firma Miba Sinter Austria GmbH. Von den Proben werden Schliffbilder aus zwei Bereichen (Abbildung 7.7) im Hause der Firma Miba Sinter Austria GmbH angefertigt. Der Bereich M1 liegt in der Mitte des Querschnitts der Probe und der Bereich M2 ist am äußeren Randbereich der Probe positioniert. Die Schliffpräparation umfasst das Trennen des zu untersuchenden Probenstücks, Einbetten, Schleifen und Polieren mit 9 und 3 µm Diamantsuspension für 4 bzw. 3 Minuten. Dem folgt ein Ätzpolieren, das 3-mal wiederholt wird und aus Ätzen für 3 Sekunden in 5 % Nital Lösung, kombiniert mit anschließendem Poliervorgang, besteht.

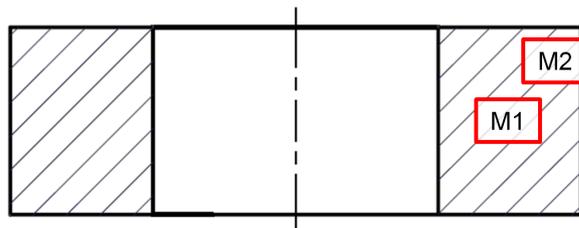


Abbildung 7.7: Bereiche der Schliffbildauswertung am Probenquerschnitt für die Blöcke I bis III.

## 7.2 Voruntersuchungen

Zu den nachstehenden Versuchsblöcken I bis IV (vgl. Tabelle 5.1) werden Voruntersuchungen unternommen. Abgeklärt werden die Aufheizkurve der Proben in der Gesenkform, das Auskühlen der Proben während des Transports vom Ofen zur Matrize und technologische Maßnahmen zur Schonung des Werkzeugs.

### 7.2.1 Aufheizkurve der Proben im Gesenk

Im Versuchsblock I und II soll ein Temperaturgradient zwischen Werkzeug und Werkstück eingestellt werden. Um abzuklären, ob der eingestellte Temperaturgradient auch noch in der Zeitspanne zwischen Einlegen und Verpressen der Probe bestehen bleibt, wird eine Probe mit sechs Thermoelementen versehen und mit einer Ausgangstemperatur von 20 °C in die, auf 500 °C erwärmte, Matrize eingelegt und dabei die Temperaturerhöhung der Probe aufgezeichnet. Ziel ist es, den Temperaturunterschied in radialer Richtung und in der Höhe zu erfassen.

In die Versuchsprobe werden sechs Bohrungen eingebracht, wobei drei davon bis auf eine Höhe von 4,7 mm und die anderen auf 9,4 mm, vom Probengrund aus gemessen, reichen. In radialer Richtung unterscheiden sich die jeweils auf gleichem Höhenniveau befindlichen Bohrungen durch die Positionen „Außen“, „Mitte“ und „Innen“ (Abbildung 7.8).



Abbildung 7.8: Versuchsprobe mit sechs Bohrungen zur Ermittlung der Aufheizkurve im Gesenk.

Auf halber Höhe (Abbildung 7.9,  $h = 4,7$ ) wird die Probe schneller erwärmt als im oberen Abschnitt ( $h = 9,4$ ). Zuerst steigt die Temperatur des Werkstücks schnell an (innerhalb von 30 s auf eine Temperatur von ca. 250 °C). Nach zwei Minuten hat die Probe bereits 450 °C

erreicht und der Temperaturverlauf flacht ab. Nach fünf Minuten ist das Werkstück auf die Endtemperatur von ca. 500 °C erwärmt.

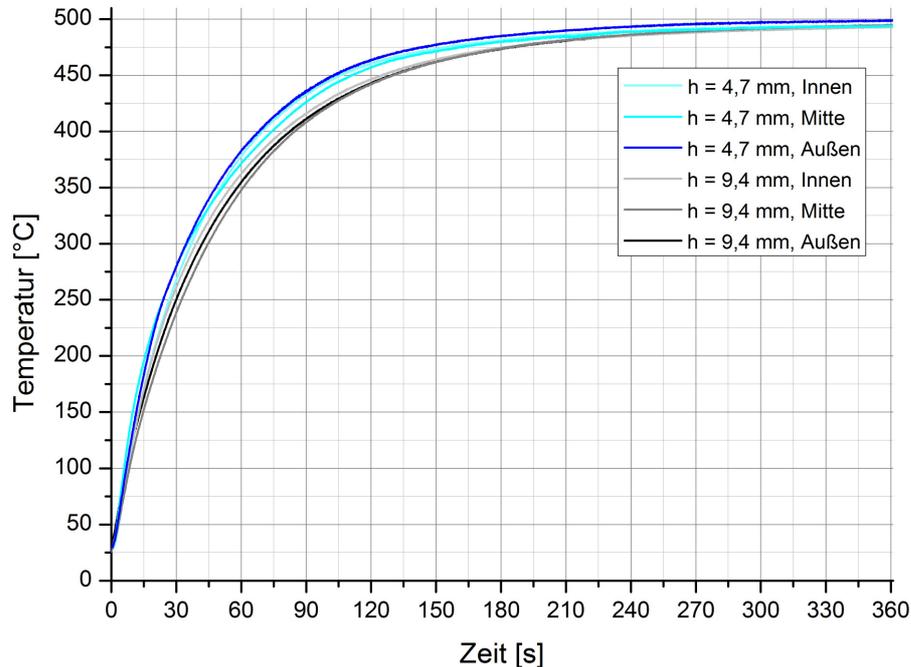


Abbildung 7.9: Erwärmen der Probe im Gesenk.

Der in Abbildung 7.9 gezeigte Temperaturverlauf gilt nur für die Erwärmung einer Probe, die bei Raumtemperatur in das Werkzeug gelegt wird (Raumtemperatur-Probe), in einem 500 °C-Werkzeug. Ist die Temperatur des Werkstücks größer, beispielsweise 450 °C, ist ein flacherer Temperaturverlauf zu erwarten. Jedoch reicht die Darstellung zum Ermitteln von überschlagsmäßigen Anhaltswerten aus, wie im Folgenden nähergebracht werden soll.

Das Zeitfenster zwischen Einlegen des Werkstücks und Kraftaufbringung soll möglichst klein sein. Da der Temperaturanstieg der Probe von der Werkstück- und Matrizen-Temperatur abhängig ist, kann das Zeitfenster anhand Abbildung 7.9 abgeschätzt werden. Beispielsweise beträgt das Zeitfenster bei einer Werkzeug-Temperatur von 500 °C und einer Werkstück-Temperatur von 300 °C für einen Temperaturunterschied von mindestens 150 °C in erster Näherung maximal 10 Sekunden.

### 7.2.2 Auskühlen der Proben in der Transportbox

Dabei gilt es zu untersuchen, wie schnell die Temperatur der Probe nach dem Herausnehmen aus dem Ofen abnimmt, um den zeitlichen Versuchsablauf danach abstimmen zu können. Die Werkstücke werden für diese Versuchsblöcke in eine Transportbox gelegt, die mit einem Deckel verschlossen werden kann (Kapitel 7.1.1). Nach

dem Erwärmen im Ofen erfolgt der Transport zur Matrize. Die Temperatur der Probe in der Box reduziert sich wie in Abbildung 7.10 gezeigt.

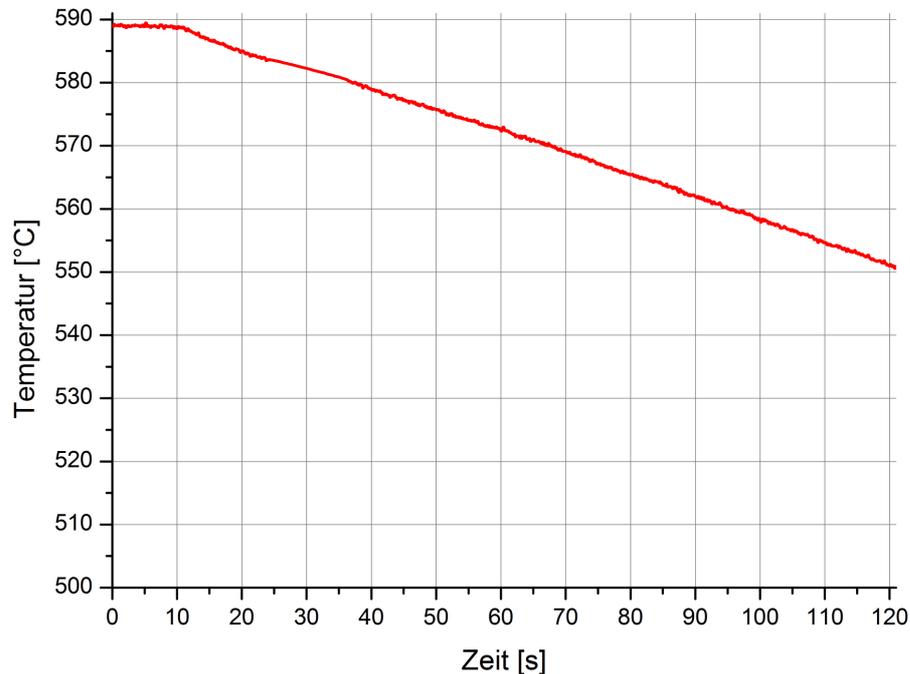


Abbildung 7.10: Temperaturverlauf beim Auskühlen der Proben in der Transportbox.

Die Temperatur der Probe bleibt die ersten zehn Sekunden konstant, anschließend fällt die Temperatur linear mit der Zeit ab. Für die praktische Versuchsdurchführung bedeutet das ein Zeitfenster für den Proben-Transport vom Ofen zur Matrize von 10 bis 15 Sekunden, in denen keine nennenswerte Temperaturänderung der Probe auftritt.

### 7.2.3 Technologische Maßnahmen am Sockel

Der Sockel ist die Versuchseinheit zwischen Matrize und Kraftmessdose (Abbildung 7.1). Da die Kraftmessdose nur einer begrenzten Wärmebelastung ausgesetzt werden kann, muss der Sockel gekühlt werden. Um diese Kühlwirkung zu unterstützen, ist es nach Vorversuchen zweckmäßig, die Kontaktfläche zwischen beheizter Matrize und Sockel so gering wie nötig zu halten. Dazu werden tiefe, radiale Stege im Sockel eingebracht, um die Wärmeleitung zwischen diesen zwei Elementen zu reduzieren. In der Praxis unterstützt ein unbrennbares Isoliermaterial in diesen Stegen die Verminderung des Wärmetransports von Matrize zum Sockel.

Abbildung 7.11 zeigt den Sockel der Versuchsvorrichtung im anfänglichen Zustand mit drei rot eingezeichneten Bereichen, welche die Lage der nachträglich angefertigten, radial verlaufenden Stege symbolisieren.

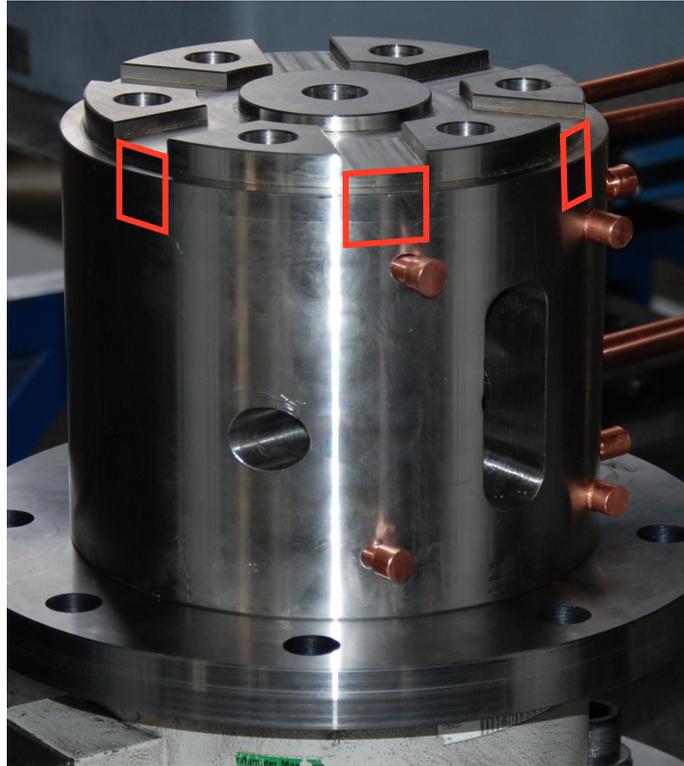


Abbildung 7.11: Sockel der Versuchseinrichtung und eingekreiste Stege für reduzierte Wärmeleitung.

Der nachgebesserte Sockel mit den tiefen Stegen und der weißen Isolierung in den Zwischenräumen ist in Abbildung 7.12 dargestellt.

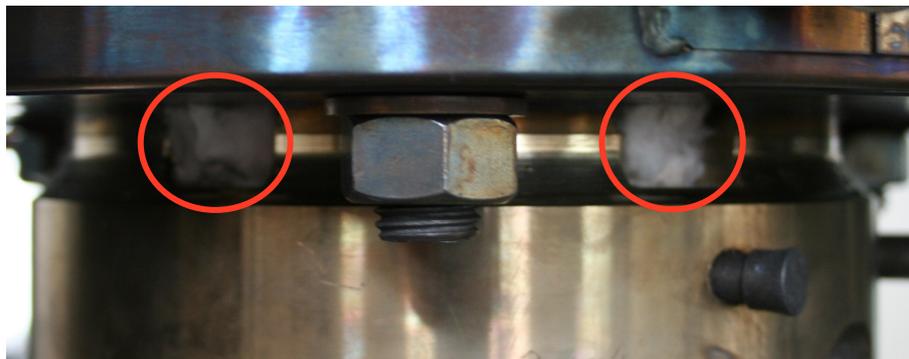


Abbildung 7.12: Sockel mit vertieften Stegen und gekennzeichneter Isolierung.

## 7.3 Ergebnisse und Diskussion

### 7.3.1 Wirken der HWU auf die Presskraft

Um das Wirken der HWU auf die Presskraft abzuklären, werden die während des Pressens aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufe der Proben ausgewertet und bei den verschiedenen Temperaturen miteinander verglichen. Dazu muss abgeklärt werden, wie hoch die effektive Kraft ist, die jede einzelne Probe erfahren hat. Der Pressvorgang kann in zwei Phasen

aufgeteilt werden, wobei in der ersten Phase die Probe verpresst wird. In der zweiten Phase trifft ab einem bestimmten Pressenhub der Anschlag des Stempels auf die Matrize und die Probe wird nicht mehr verformt. Dieses Überprüfen der Presskraft bis der Anschlag aufliegt kann entweder durch die Steigung des Kraftanstiegs, einem Dichtevergleich oder einem Geometrievergleich erfolgen.

Eine rein graphische Auswertung ist die Zuhilfenahme der **Steigung des Kraftanstiegs**. Ab dem sprunghaften Anstieg der Kraft folgt der Kraft-Weg-Verlauf einer charakteristischen Steigung. Diese ist vergleichbar mit einer Federkonstante beim linearen Zusammenhang zwischen Kraft und Weg in der Physik. In diesem Fall entspricht die Steigung der elastischen Einfederung bzw. Steifigkeit der gesamten Versuchsvorrichtung. Werden Kraft-Weg-Verläufe von verpressten Proben mit dem eines Pressvorgangs ohne Probe, bei dem der Anschlag auf die Vorrichtung drückt, dargestellt, ist ab dem Schnittpunkt der Linien der Anschlag auf der Matrize angekommen (Abbildung 7.13).

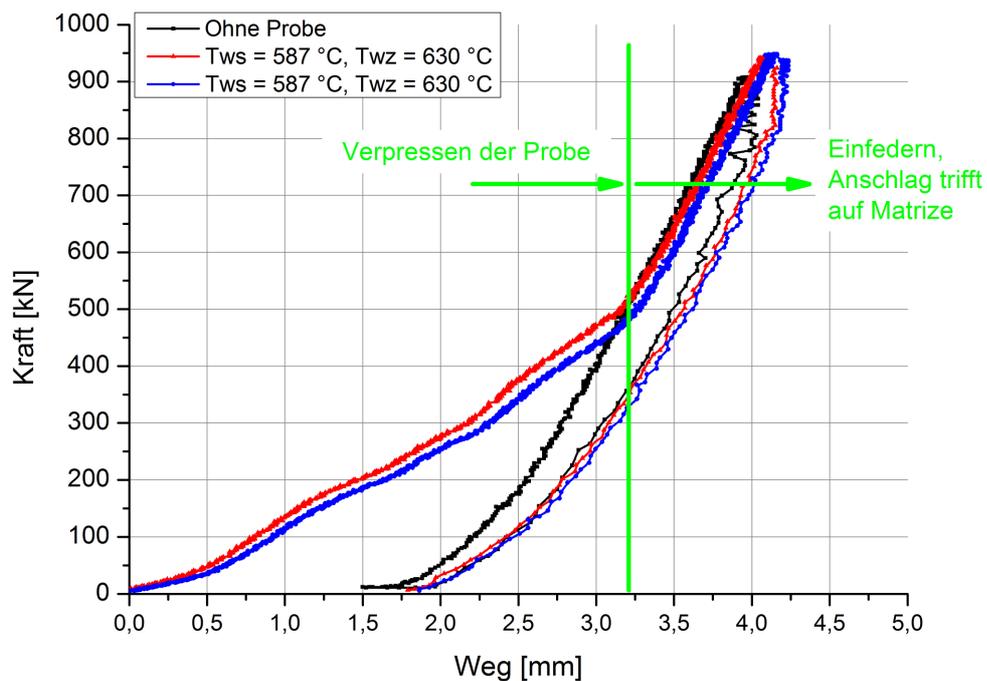


Abbildung 7.13: Kraft-Weg-Diagramm zur Bestimmung der effektiven Kraftaufbringung durch Vergleich der Steigungen.

Ein **Dichtevergleich** umfasst das Verpressen von mehreren Proben auf unterschiedliche Kraftniveaus unterhalb und oberhalb einer sichtbaren Steigungsänderung im Kraft-Weg-Diagramm und das Auswerten der Dichten dieser Proben (Abbildung 7.14). Ab dem Kraftniveau, bei dem sich die Dichtewerte nicht mehr voneinander unterscheiden, trifft der Anschlag auf die Matrize und die effektive Kraftaufbringung auf die Probe ist bestimmt. In Abbildung 7.14 kommt es bis zu einer Presskraft von 600 kN zu einem Dichteanstieg der

verpressten Proben. Ab 600 kN sind die Dichtewerte annähernd gleich und damit erfahren die Proben keine weitere Umformung mehr. Daraus resultiert, dass der Anschlag auf der Matrize aufliegt und die effektive Presskraft erreicht ist.

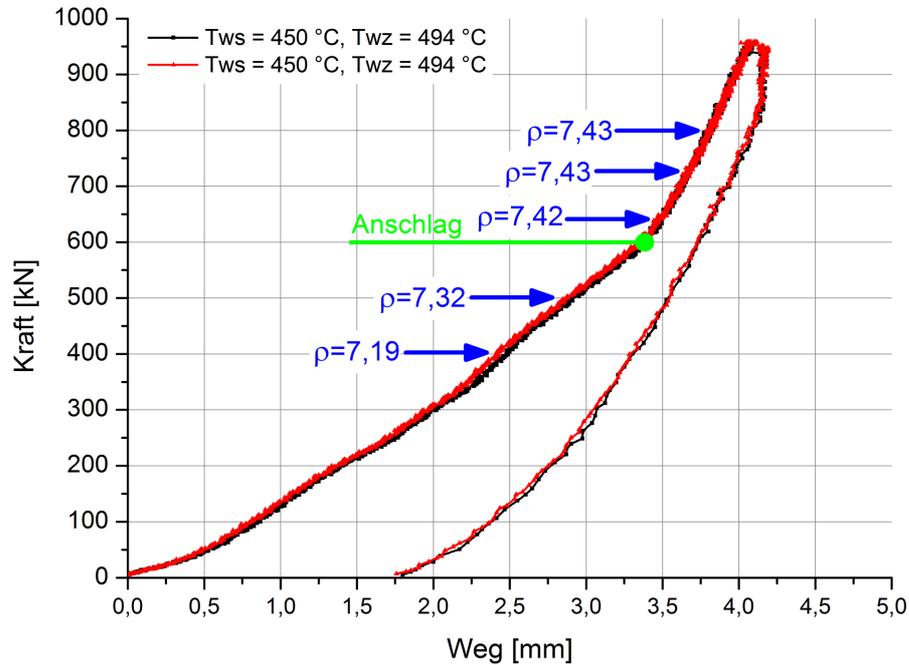


Abbildung 7.14: Kraft-Weg-Diagramm zur Bestimmung der effektiven Kraftaufbringung mit Dichteangaben und markiertem Anschlagpunkt.

Der **Geometrievergleich** sieht ein Verpressen der Proben unterhalb und oberhalb des sprunghaften Anstiegs der Steigung in Abbildung 7.14 vor. Unterhalb von diesem Kraftwert ist eine umlaufende Fase an den Mantelflächen der Proben zu erkennen, da die Proben nicht vollständig in die Matrize gedrückt werden. Oberhalb des Werts weist der Querschnitt, unabhängig von Temperatur und Presskraft, immer gleiche Maße auf.

Werden die Kraft-Weg-Verläufe von Proben verschiedener Temperatur aber gleichen Umformgrades mit den dazugehörigen effektiven Presskräften in eine Grafik eingetragen, wird ein Sinken der Presskräfte ab  $450\text{ °C}$  mit steigender Temperatur festgestellt (Abbildung 7.15).

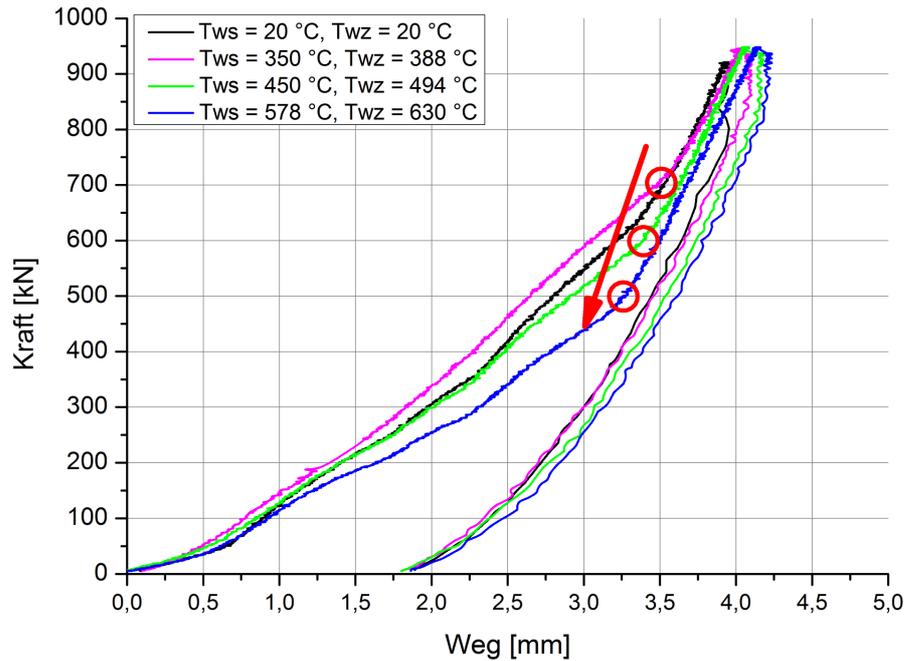


Abbildung 7.15: Kraft-Weg-Verläufe ausgewählter Proben unterschiedlicher Temperatur. Die aufgebrauchten effektiven Presskräfte sind markiert mit Kreisen und der Pfeil symbolisiert das Sinken der Presskraft ab 450 °C mit steigender Temperatur bei gleichen Umformgraden.

Werden aus Abbildung 7.15 die Temperaturwerte und die ermittelten effektiven Presskräfte entnommen und in ein Kraft-Temperatur-Diagramm eingetragen, wird die Kraftersparnis durch die HWU im Vergleich zum Kalt-Kalibrieren deutlich (Abbildung 7.16).

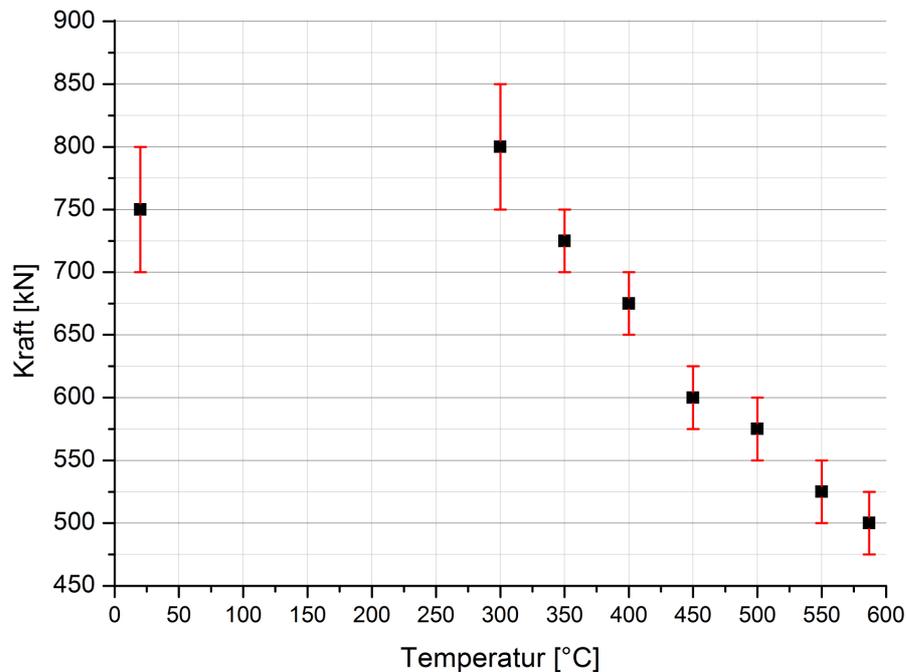


Abbildung 7.16: Kraftersparnis durch die HWU.

Im Gegensatz zu den Raumtemperatur-Proben wird bei 300 °C und 350 °C keine Krafterparnis erzielt, da in diesem Temperaturbereich (Bereich der Blausprödigkeit) ein Anstieg des Umformwiderstandes verzeichnet wird. Erst bei höheren Temperaturen, ab etwa 450 °C, wird eine Krafterparnis durch die HWU festgestellt. Ab dieser Grenztemperatur wird ein Nutzen hinsichtlich Presskrafterparnis durch die HWU erreicht. Liegt eine Werkstück-Temperatur von 587 °C vor, wird eine Krafterparnis von ca. 30 %, verglichen mit dem Kalt-Kalibrieren, erzielt.

Dieses Verhalten ist mit der Abhängigkeit der Fließspannung vom Umformgrad erklärbar (Abbildung 7.17). Im Bereich des Halbwarm-Kalibrierens mit einem Umformgrad von  $\phi \approx 0,1$  liegen die Fließspannungen von 250 °C, 300 °C und 400 °C Proben über jener von Raumtemperatur. Das stimmt mit dem in Abbildung 7.16 erkannten Sinken der Presskräfte erst ab 450 °C überein.

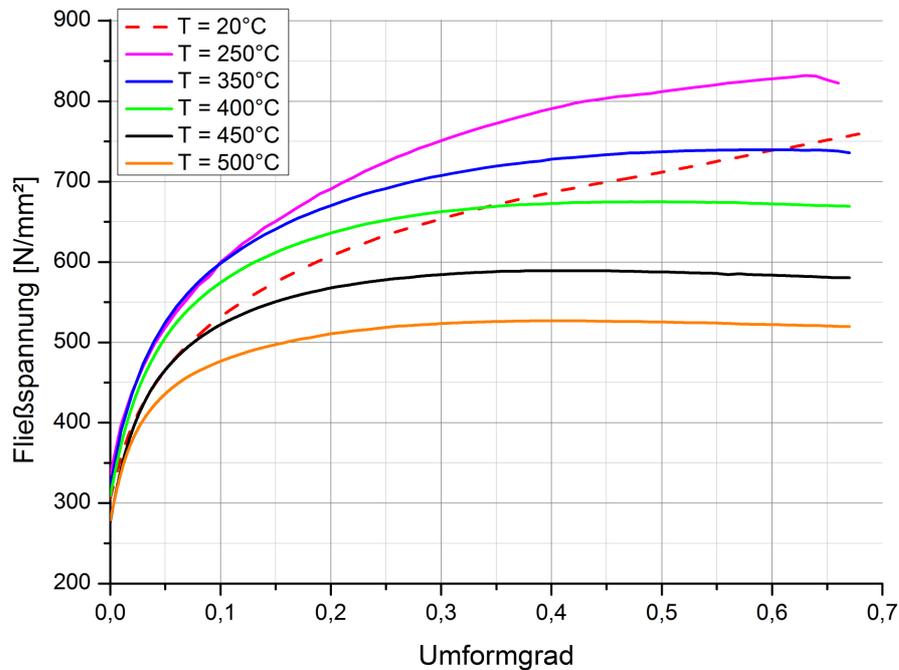


Abbildung 7.17: Abhängigkeit der Fließspannung vom Umformgrad für verschiedene Temperaturen bei einer Umformgeschwindigkeit von  $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .

### Diskussion

Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen wird eine Presskraftreduzierung ab 450 °C erzielt. Nach Abbildung 7.17 ist bei 400 °C ab einem Umformgrad von  $\phi \approx 0,3$  bereits eine Presskrafterparnis zu erwarten, da die Fließspannung ab diesem Umformgrad unter jener von 20 °C liegt.

Allgemein können durch die HWU gleiche Dichtewerte bei reduzierten Presskräften im Vergleich zum Kalt-Kalibrieren erreicht werden. Das wiederum senkt die mechanischen Werkzeugbelastungen. Insbesondere wächst der Nutzen der HWU durch höhere Umformgrade.

### Problemstellungen

Bei der Auswertung der 20 °C- und 300 °C-Proben ist es schwierig die effektive Presskraft zu ermitteln, da die Kraft-Weg-Verläufe sehr steil ansteigen. Als weiterer Nachteil sei angeführt, dass es nicht möglich ist die Probentemperatur während des Kalibrierens zu messen.

### 7.3.2 Temperaturbereiche für Werkstücke und Werkzeuge der HWU

Um die eingestellten Temperaturgradienten zwischen Werkstück und Werkzeug zu analysieren, werden die Schliffbilder der Proben miteinander verglichen. Die Proben haben durch das weggesteuerte Verpressen alle die gleiche globale Dichte von  $7,43 \text{ g/cm}^3$ .

In Abbildung 7.18 sind vier Schliffbilder bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen von Werkstück und Werkzeug des Bereichs M1, der in der Mitte des Probenquerschnitts liegt, dargestellt. Die Poren sind gleichmäßig verteilt und die Temperaturgradienten wirken sich nicht auf diesen Bereich der Proben aus.

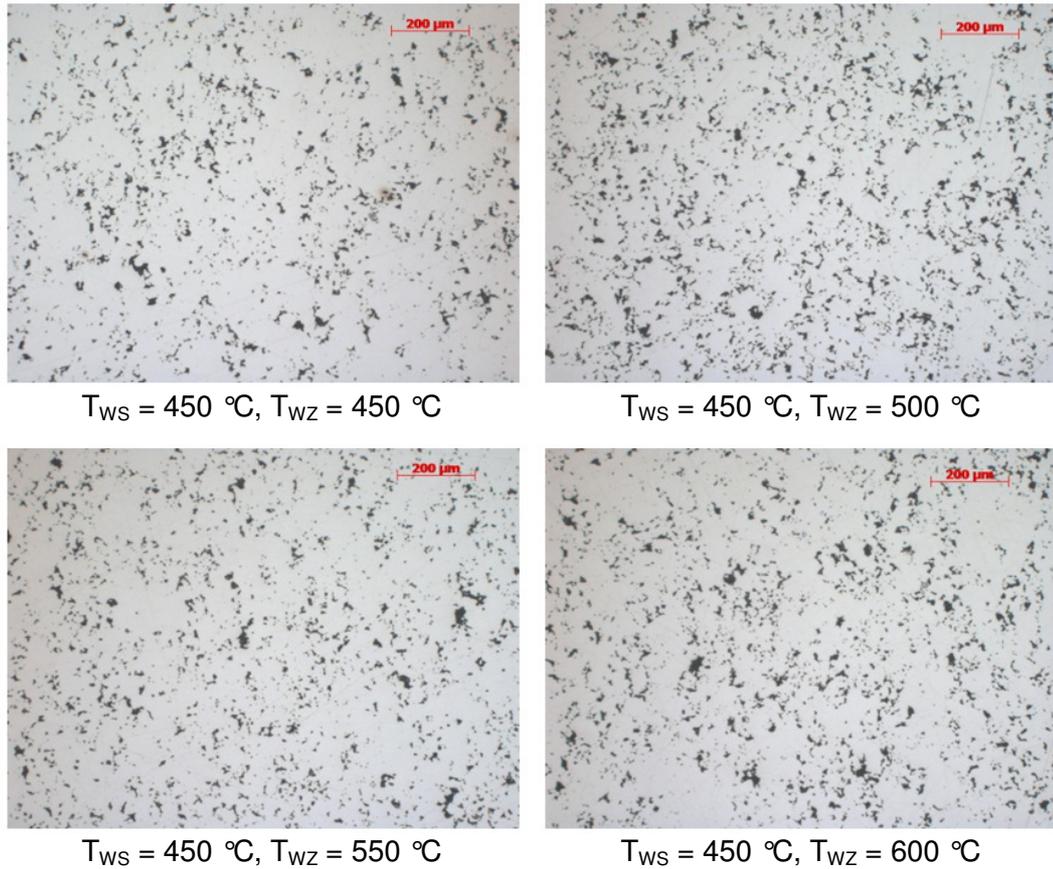


Abbildung 7.18: Schliiffbildauswertung des Bereichs M1 in 100-facher Vergrößerung für den Block II.

Die Schliiffbilder in Abbildung 7.19 zeigen den Bereich M2, der am Rand der Probe liegt. Bei einem Temperaturunterschied von 150 °C tritt eine geringe Randzonenverdichtung bis in eine Tiefe von ca. 200 µm auf. Bei geringen Temperaturgradienten bis hin zur Probe ohne Temperaturunterschied zwischen Werkstück und Werkzeug sind keine Effekte erkennbar.

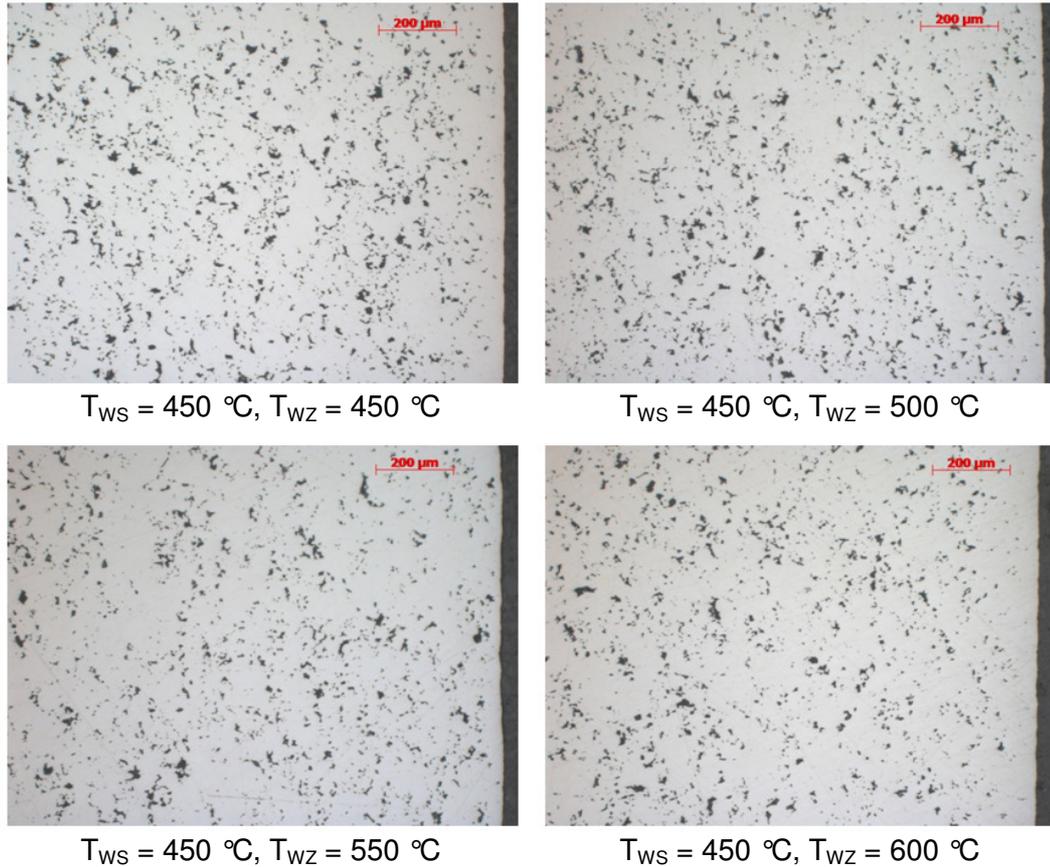


Abbildung 7.19: Schliffbildauswertung des Bereichs M2 in 100-facher Vergrößerung für den Block II.

### Diskussion

Ein Temperaturgradient zwischen Werkstück und Werkzeug unter 150 °C erweist sich als wirkungslos. Um höhere Dichtewerte am Rand zu erzielen sollte ein Temperaturgradient von 150 °C gewährleistet werden. Da aber der maximale Temperaturunterschied aufgrund der Heizvorrichtungen auf 150 °C beschränkt ist, kann nicht abgesehen werden, wie höhere Temperaturgradienten auf die Randdichte wirken.

Eine allgemeine Aussage, welche konkrete Werkstück- oder Werkzeug-Temperatur zu wählen ist, kann nicht getroffen werden. Vielmehr ist der Temperaturbereich prozessabhängig und wird von mehreren Haupteinflussfaktoren bestimmt. Diese sind Wirtschaftlichkeit, Schmiermittelauswahl, gewünschte Kraftersparnis, Dichtesteigerung und/oder Umformbarkeit, mechanische und thermische Werkzeugbelastungen, Taktzeiten und Heizvorrichtungen. Die Wahl des Temperaturbereichs ist immer ein teils gegenseitig ausschließendes Zusammenspiel aus diesen Faktoren. Grundsätzlich ist für das Halbwarm-Kalibrieren mit kleinem Umformgrad ( $\varphi < 0,2$ ) eine Mindesttemperatur von 450 °C zu wählen, um eine Kraftersparnis zu erreichen. Unter Berücksichtigung der Fließkurven ist

davon auszugehen, dass für Halbwarm-Kalibrierprozesse mit höheren Umformgraden bereits eine Temperatur von 400 °C in einer Krafterparnis resultiert. Temperaturen über Raumtemperatur bis 350 °C sollten aufgrund der Blausprödigkeit stets vermieden werden.

### Problemstellungen

Die Werkstück-Temperatur während des Pressvorgangs ist unbekannt und kann nach dem Einlegen der Probe in das Werkzeug vom ursprünglichen abweichen. Somit kann es zu einer Änderung des Temperaturgradienten zwischen Werkstück und Werkzeug kommen, die nicht gemessen werden kann.

### 7.3.3 Dichtesteigerung durch die HWU bei gleicher Presskraft

Die Dichtewerte der erwärmten und bei 600 kN sowie 900 kN verpressten Proben werden jener der Raumtemperatur-Proben gegenübergestellt (Abbildung 7.20).

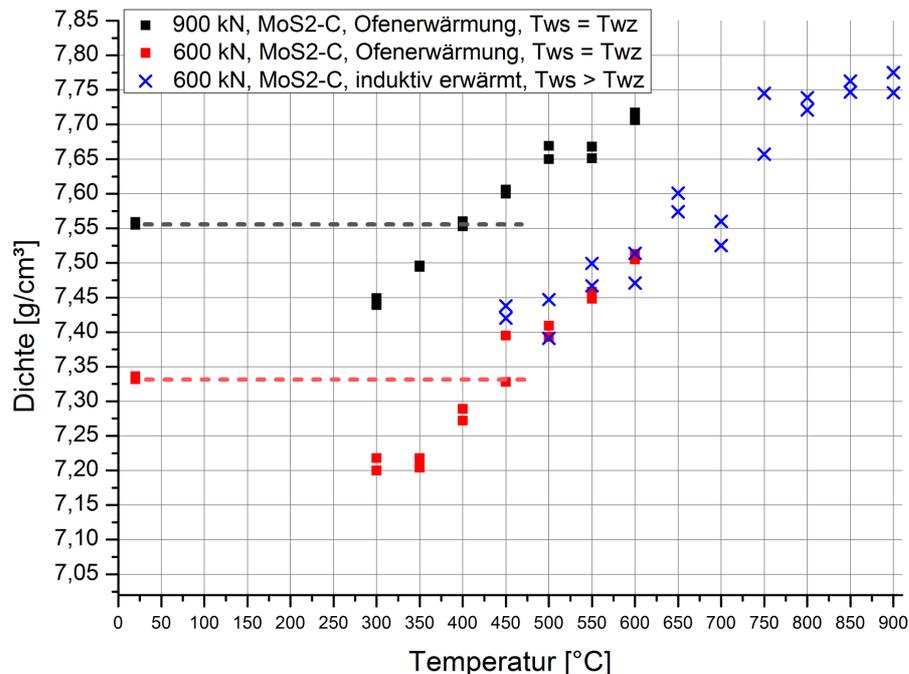


Abbildung 7.20: Mittels HWU erzielte Dichtewerte bei 600 kN und 900 kN mit dem Raumtemperatur-Bezugsniveau der Zylinder-Proben.

Die bei Raumtemperatur verpressten Proben weisen eine höhere Dichte bei gleicher Presskraft auf als die Proben bei 300 °C und 350 °C. Dieser Dichteabfall ist mit dem Fließspannungsanstieg im Temperaturbereich der Blausprödigkeit erklärbar und bestätigt die aus Kapitel 7.3.1 getroffenen Aussagen über die Grenztemperatur, ab der ein Nutzen der HWU verzeichnet wird. Bei einer Presskraft von 600 kN liegt die Grenztemperatur, ab welcher die Dichtewerte der Raumtemperatur-Proben übertroffen werden, bei 450 °C. Ist die Presskraft um 300 kN höher, sinkt die Grenztemperatur auf 400 °C. Die Dichtewerte nehmen

mit der Temperatur zu und der erzielte Maximalwert ist  $7,75 \text{ g/cm}^3$  ab einer Werkstück-Temperatur von  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Werkzeug-Temperatur von  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Allgemeine Erkenntnisse aus Abbildung 7.20 sind, dass der HWU-Prozess für die verwendeten Proben und Umformgrade ab einer Grenztemperatur bei gleicher Presskraft höhere Dichten ermöglicht. Umgekehrt wird beispielsweise bei einer Temperatur von  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Kraftersparnis von ca. 30 % bei gleicher Enddichte gegenüber dem kalten Prozess erzielt.

### Diskussion

Das Sinken der Grenztemperatur mit steigender Presskraft ist auf den Umformgrad zurückzuführen, denn höhere Kräfte bewirken ein stärkeres Stauchen der Proben. In Kapitel 7.3.1 wird eine Verbesserung des Nutzens der HWU mit steigendem Umformgrad erkannt. Dies wird mit der verminderten Grenztemperatur bei höheren Umformgraden bestätigt. Entgegen der Literatur weisen die Zylinder-Proben bei hohen Temperaturen bis  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  den Schmiedeeffekt nicht auf. Hierfür können folgende Ursachen genannt werden. Zum einen begünstigt die in den Randbereichen auftretende Scherung deren Verdichtung. Zum anderen ist der Temperaturunterschied mit  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  von Werkstück und Werkzeug im Gegensatz zum Schmiedeprozess mit bis zu  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  wesentlich geringer.

### Problemstellungen

Ungenauigkeiten treten beim kraftgesteuerten Pressen durch die Abbruchbedingung auf. Die Presskraftwerte bei  $600 \text{ kN}$  weisen eine Standardabweichung von  $6,4 \text{ kN}$  auf und die bei  $900 \text{ kN}$  beträgt  $4,8 \text{ kN}$ .

## 8. Experimenteller Teil: Umformvermögen

Ziel dieses Abschnitts ist die Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf das Umformvermögen beim Halbwarm-Kalibrieren von unterschiedlichen Vorformen.

### 8.1 Versuchsdurchführung und experimenteller Aufbau

#### 8.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf

Der Versuchsaufbau ist mit der 1 MN-Hydraulikpresse, dem Konvektionsofen, den Proben-Transportboxen, der Stempereinheit, dem Sockel, dem Auswurfsystem, der Temperaturmessung und dem Kraftaufnehmer gleich wie bei den Versuchen „Prozesstemperaturen und globale Verdichtung“ gestaltet (vgl. Kapitel 7.1.1). Einziger Unterschied ist die verwendete Form der Matrize, die einen konusförmigen Abschnitt aufweist (Abbildung 8.1).

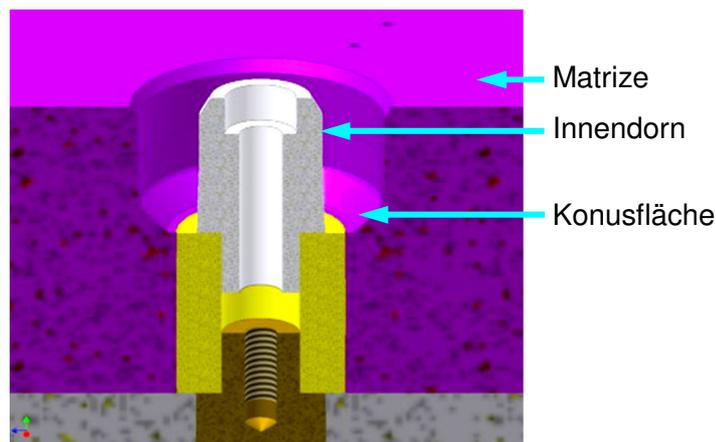


Abbildung 8.1: Detail der Matrize für Kegel-Proben mit Dorn für die Versuche zur Umformbarkeit.

Der Ablauf vom Erwärmen der Proben, dem Transport vom Ofen zur Matrize, dem Einlegen der Proben durch eine Falltür der Probenbox bis hin zum Verpressen der Proben ist ebenfalls gleich wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben.

#### 8.1.2 Proben

Grundsätzlich werden kegelige Proben (Kegel-Proben) mit einer Geometrie wie in Abbildung 8.2 gezeigt verpresst. Werkstoff und Ausgangsdichtewerte sind gleich wie bei den vorhergehenden Versuchen (vgl. Kapitel 7.1.2). Nach erfolgreichem Verpressen der Kegel-Proben werden zudem auch Zylinder-Proben wie in Kapitel 7.1.2 verpresst.

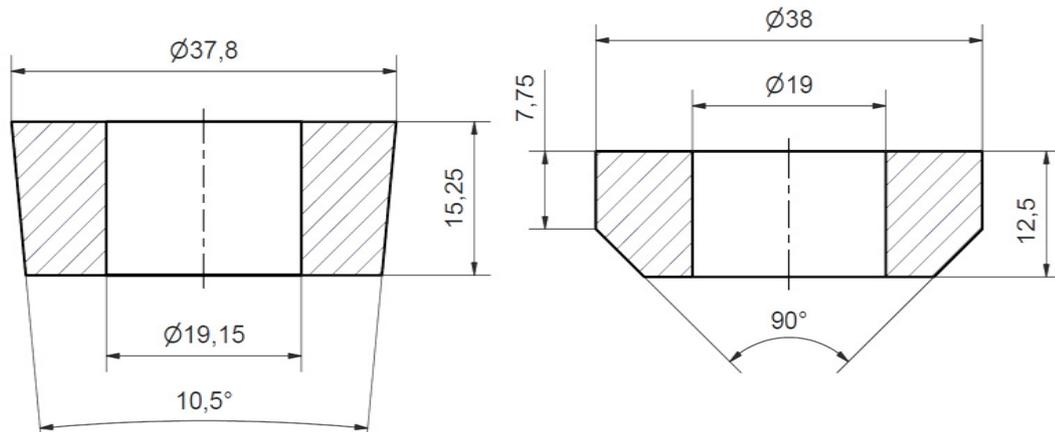


Abbildung 8.2: Ausgangsgeometrie (links) und Endgeometrie (rechts) der Kegel-Proben (Angaben in mm).

### 8.1.3 Versuchsblock IV

Um den Einfluss der Temperatur auf das Umformvermögen zu erfassen, werden kegelige und zylindrische Vorformen zur gleichen Endgeometrie verpresst. Dazu werden je 16 Kegel-Proben weggesteuert und kraftgesteuert mit einer Presskraft von 900 kN verpresst. Für beide Pressvarianten werden je zwei Proben bei 20 °C und 300 °C bis 600 °C in 50 °C-Schritten kalibriert, um das Ändern des Umformvermögens mit der Temperatur zu erfassen. Bewertet wird die Umformbarkeit anhand der Formfüllung der Matrize und an entstehenden Rissen an der Oberfläche der Proben. Je besser die Formfüllung, desto größer ist die Umformbarkeit. Um die Idee, aus unterschiedlichen Vorformen eine Endform mit der gleichen Matrize herzustellen, zu überprüfen, werden zusätzlich Zylinder-Proben mit einer Temperatur von 500 °C verformt. Bei erfolgreichem Verpressen dieser Proben werden Zylinder-Proben bei Raumtemperatur verpresst, was bisher als nicht möglich gilt. Bei allen Versuchen ist die Werkstück-Temperatur gleich der Werkzeug-Temperatur. Die Gründe für sowohl weg- als auch kraftgesteuertes Verpressen der Proben sind die gute Vergleichbarkeit der Bauteilkonturen beim weggesteuerten Prozess, da alle Proben den gleichen Umformgrad erfahren und ein Erkennen eines Dichteanstiegs durch das kraftgesteuerte Verfahren, in Folge eines temperaturbedingten erniedrigten Umformwiderstandes. Als Schmiermittel wird der MoS<sub>2</sub>-Grafitspray eingesetzt, außer bei Raumtemperatur. Bei diesen Proben wird ein Schmieröl benutzt, das von der Firma Miba Sinter Austria GmbH in der Praxis eingesetzt und für diese Versuche bereitgestellt wird. Die Presse wird mit einer Stempelgeschwindigkeit von 2 mm/s betrieben.

### 8.1.4 Auswertung

Das den Versuchen nachgeschaltete Säubern der Proben, die Dichtebestimmung und die Maßnahmen zur Schlifferstellung erfolgen analog zu den vorangegangenen Versuchen (vgl. Kapitel 7.1.4). Die Schliffbilder werden vom Ausschnitt M1, der die Schrägung der verpressten Proben abdeckt, angefertigt (Abbildung 8.3).

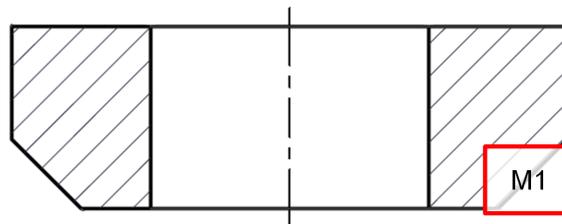


Abbildung 8.3: Bereich der Schliffbildauswertung am Probenquerschnitt für den Block IV.

## 8.2 Ergebnisse und Diskussion

### Formfüllung

Werden die weggesteuert verpressten Kegel-Proben bei den verschiedenen Temperaturen miteinander verglichen, sind Konturunterschiede erkennbar. Die Proben weisen zwar alle den gleichen Umformgrad auf, doch füllen sie die Kegel-Matrize nicht gleich gut aus. Betroffen ist vorwiegend der konusförmige Abschnitt der Matrize bzw. die kegelige Fläche der Presslinge. In Abbildung 8.4 sind vier ausgewählte, bei unterschiedlichen Temperaturen von 20 °C bis 550 °C, verpresste Kegel-Proben dargestellt. Die Probe bei Raumtemperatur weist im Vergleich mit den übrigen Kegel-Proben die schlechteste Formfüllung auf. Davon betroffen ist vor allem der Bereich der Schrägung, erkennbar an einem großen Übergangsradius vom zylindrischen Abschnitt zur Kegelfläche. Die Formfüllung ist bei den Proben mit 350 °C und 450 °C besser. Die beste Formfüllung der ausgewählten Proben weist diejenige mit 550 °C auf. Charakteristisch dafür ist ein scharfer Übergang der Seitenfläche zur Kegelfläche. Im Allgemeinen steigt die Formfüllung mit der Temperatur.

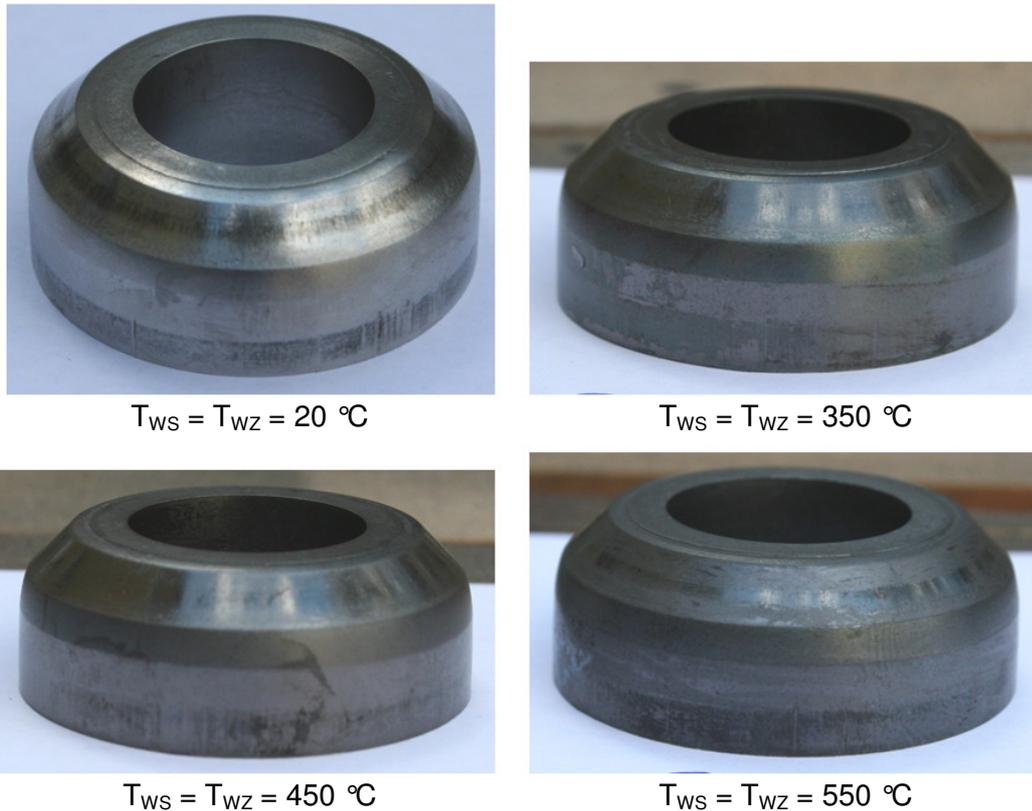


Abbildung 8.4: Konturvergleich der weggesteuert verpressten Kegel-Proben bei verschiedenen Temperaturen.

Weiters wird die Formfüllung bei Raumtemperatur einer Zylinder-Probe untersucht, mit dem Ergebnis, dass der Umformwiderstand der Probe zu hoch ist, um sich der Matrize vollständig anzupassen. Die Kegelfläche wird nur teilweise nachgebildet und es entstehen runde Übergänge zwischen der Seitenfläche, der Kegelfläche und dem Boden der Zylinder-Probe (Abbildung 8.5).



Abbildung 8.5: Bei 20 °C weggesteuert verpresste Zylinderprobe.

Noch ausgeprägter ist die Konturausfüllung beim Vergleich der kraftgesteuerten Versuche. Hierzu werden vier bei 900 kN kraftgesteuert verpresste Kegel-Proben miteinander verglichen (Abbildung 8.6). Bei 20 °C kommt es zur Ausbildung einer ausgeprägten, runden

Fläche zwischen Seitenfläche und Kegelfläche der Probe. Mit zunehmender Temperatur wird diese Fläche immer kleiner, bis sie bei 550 °C annähernd der Rundung des Werkzeugs entspricht. Die Probe bei 550 °C weist eine sehr gute Formfüllung auf und ist gekennzeichnet durch ausgeformte und definierte Übergänge zwischen den verschiedenen Flächen. Bei diesem Konturvergleich der Kegel-Proben ist die verbesserte Formfüllung mit steigender Temperatur deutlich erkennbar.

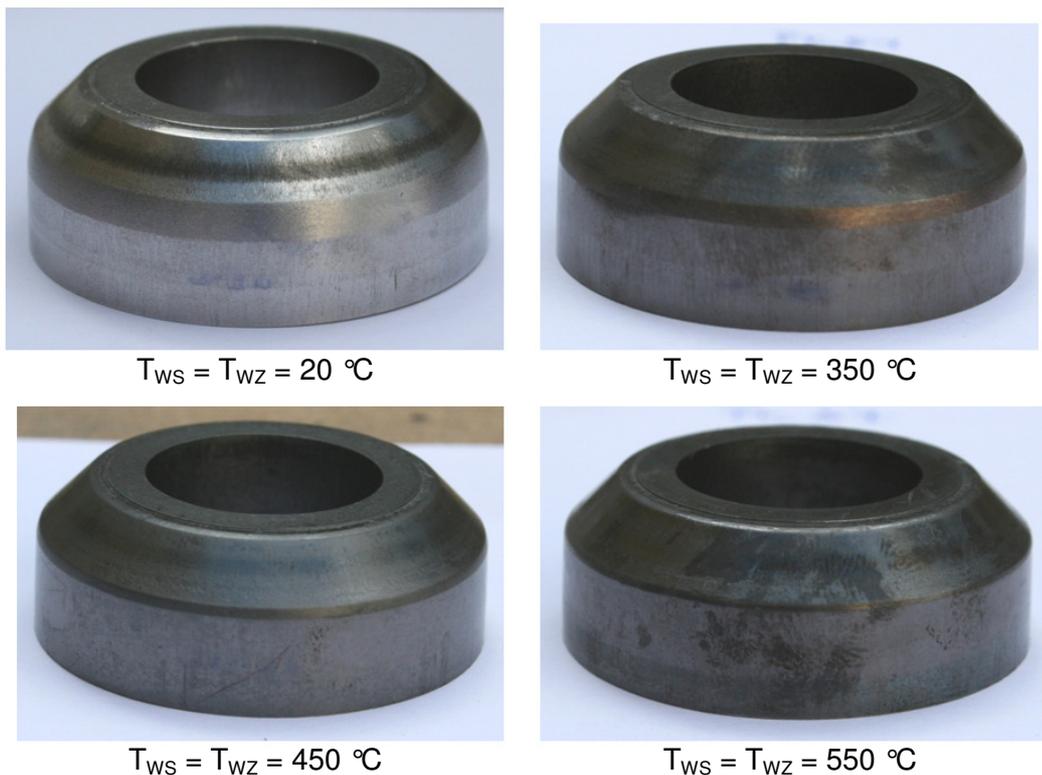


Abbildung 8.6: Konturvergleich der kraftgesteuert verpressten Kegel-Proben bei verschiedenen Temperaturen.

Um die Idee einer Formgebung unterschiedlicher Vorformen zum gleichen Endprodukt durch die gleiche Matrize experimentell zu untersuchen, werden zwei Zylinder-Proben bei 500 °C kraftgesteuert auf 900 kN verpresst und mit den Kegel-Proben verglichen. Die Zylinder-Proben erreichen die beste Formfüllung aller Proben des Versuchsblocks IV und die Dichtewerte liegen ca. 0,3 bis 0,4 g/cm<sup>3</sup> über den Kegel-Proben der gleichen Temperatur. Damit ein Vergleich mit Raumtemperatur-Proben durchgeführt werden kann, wird eine Zylinder-Probe bei Raumtemperatur mit 900 kN gepresst und der Geometrie der 500 °C-Zylinder-Probe gegenübergestellt (Abbildung 8.7).

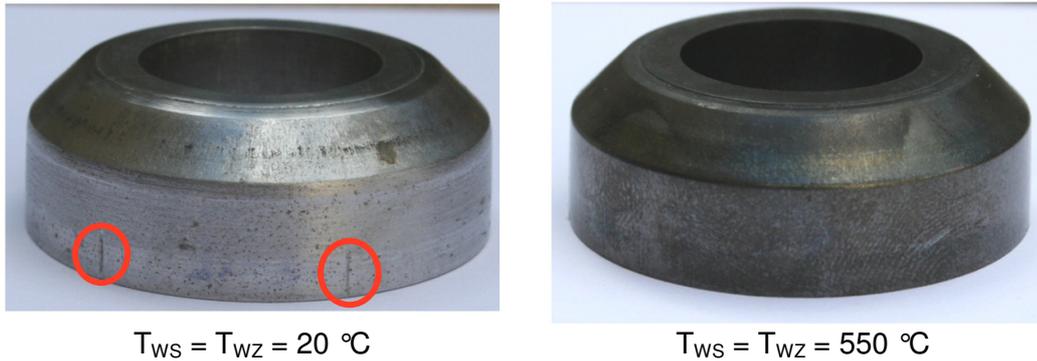


Abbildung 8.7: Konturvergleich von Zylinder-Proben bei Raumtemperatur und 500 °C.

Die bei Raumtemperatur verpresste Zylinder-Probe weist eine geringere Dichte auf und zudem ist die Formfüllung deutlich schlechter als die der 500 °C-Zylinder-Probe. Im Zuge dieses Pressvorgangs wird die Matrize beschädigt, sodass diese ohne Nachbearbeitung nicht mehr eingesetzt werden kann (Abbildung 8.8). Auch die Probe wird leicht beschädigt, erkennbar durch zwei senkrechte Riefen (markiert in Abbildung 8.7). Das lässt auf eine geringe Umformbarkeit schließen.



Abbildung 8.8: Kegel-Matrize mit gekennzeichneten Beschädigungen.

### Globale Dichtesteigerung

Werden die globalen Dichtewerte der verpressten Kegel-Proben des Blocks IV in das Dichte-Temperatur-Diagramm aus Kapitel 7.3.3 eingefügt, ist ein Dichteanstieg mit zunehmender Temperatur bei gleicher Presskraft ersichtlich (Abbildung 8.9). Die Dichtewerte liegen tendenziell über jenen der mit 900 kN verpressten Zylinder-Proben mit dazugehöriger Matrize. Die Grenztemperatur, ab der die HWU einen Nutzen gegenüber Kalt-Kalibrieren bringt, liegt bei 350 °C. Nur die Kegel-Proben bei 300 °C liegen unter den Dichtewerten der Raumtemperatur-Proben. Es muss beachtet werden, dass die Proben für das

Raumtemperatur-Bezugsniveau nicht mit dem gleichen Schmiermittel versehen werden wie alle übrigen, sondern mit einem Schmieröl (RT-Öl) von der Firma Miba Sinter Austria GmbH.

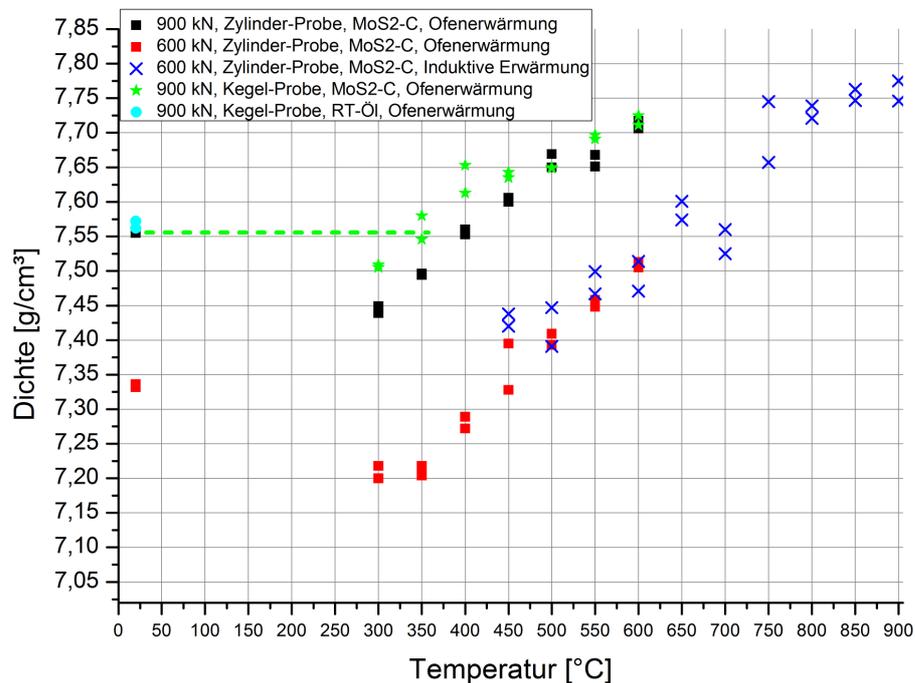


Abbildung 8.9: Mittels HWU erzielte Dichtewerte bei 600 kN und 900 kN mit dem Raumtemperatur-Bezugsniveau der Kegel-Proben.

### Lokale Dichtesteigerung

Die verpressten Kegel-Proben erfahren die größte Umformung im Bereich der schrägen Fläche, die durch das Pressen neu erzeugt wird. In Schlibfbildern dieser Bereiche sind lokale Dichteunterschiede erkennbar. Die Abbildung 8.10 zeigt den Bereich M1 von vier weggesteuert verpressten Kegel-Proben bei unterschiedlichen Temperaturen. Die lokale Verdichtung der Raumtemperatur-Probe ist gering im Vergleich zu den Dichteanstiegen, die mit 350 °C oder 450 °C erzielt werden. Im Schlibfbild der mit 550 °C verpressten Kegel-Probe ist die lokale Verdichtung am größten und reicht über 2 mm, normal auf die schräge Fläche gemessen, in das Probeninnere. Das bedeutet, dass die lokale Dichte durch ein Halbwarm-Kalibrieren mit dafür entworfenen Kegel-Matrizen und Vorformen gesteigert werden kann.

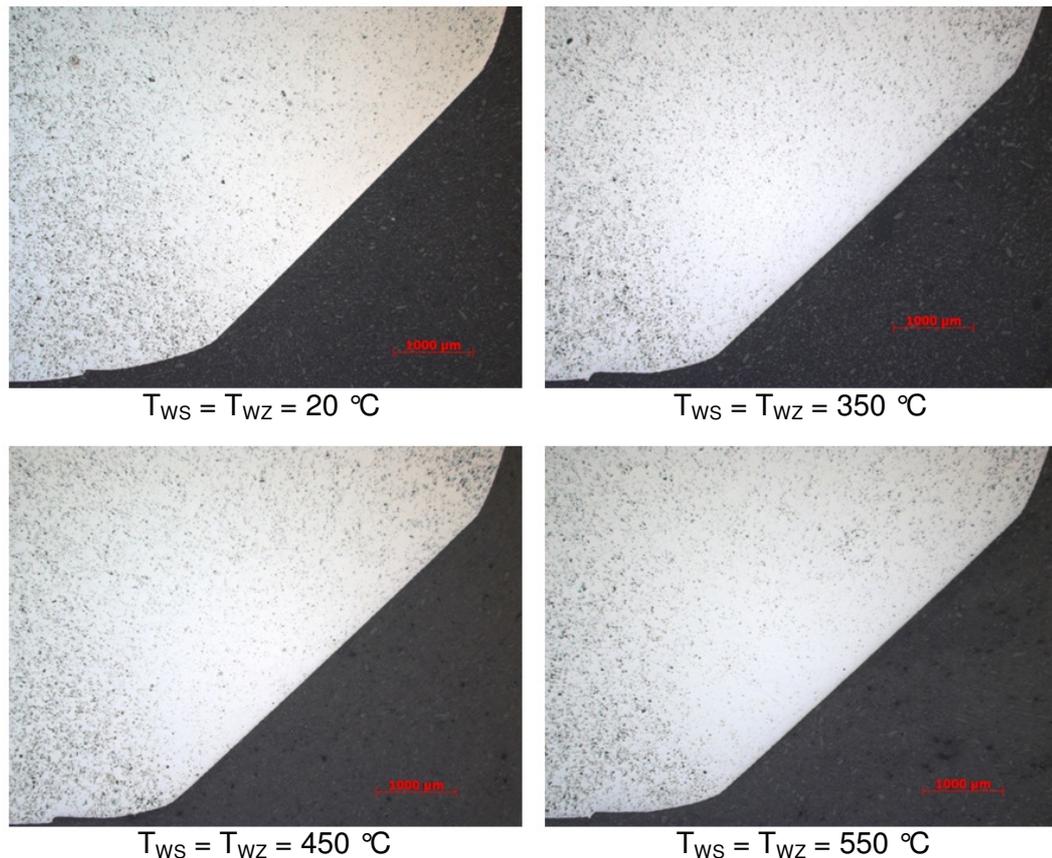


Abbildung 8.10: Schlibbildauswertung des Bereichs M1 in 20-facher Vergrößerung für den Block IV.

Aus den Versuchen zum Umformvermögen resultiert, dass die HWU die Formfüllung steigert, das Verpressen von unterschiedlichen Vorformen zum gleichen Endprodukt und komplexeren Geometrien ermöglicht, die globale Dichte erhöht und einen lokalen Dichteanstieg bewirken kann.

### Diskussion

Die Zylinder-Proben weisen eine höhere Dichte bei gleicher Presskraft auf als die Kegel-Proben. Ursache dafür ist die Scherung an den Kontaktflächen. Weiters haben die Zylinder-Proben im unteren Bereich der Vorform mehr Material, wodurch sie stärker verformt werden. Bei Temperaturen ab 400 °C, wenn die Fließspannung gering genug ist, füllen diese Proben die Kegel-Matrize sehr gut aus. Die Idee, aus unterschiedlichen Vorformen eine Endform mit der gleichen Matrize herzustellen, wurde experimentell erfolgreich überprüft und kann durch die HWU bewerkstelligt werden. Somit könnte in der Praxis mit mehreren unterschiedlichen Sinterbauteilen durch Halbwarm-Kalibrieren ein Endprodukt hergestellt werden. Auch umgekehrt, also mit einer Vorform und verschiedenen Matrizen resultierend in mehreren Endprodukten, wäre der Ablauf vorstellbar. Dadurch könnten Werkzeuge für die Vorformen eingespart werden. Eine Begründung für die höhere Dichte der Kegel-Proben bei

900 kN aus Block IV, verglichen mit den Zylinder-Proben bei gleicher Presskraft aus Block III, muss im Umformgrad gesucht werden. Im vorliegenden Kapitel zum Umformvermögen erfahren die Kegel-Proben an den Kegelflächen einen Umformgrad von  $\varphi \approx 0,3$  bis  $\varphi \approx 0,5$ . Da der Nutzen der HWU aber mit steigendem Umformgrad zunimmt (vgl. Kapitel 7.3.1), wird auch die Dichtesteigerung bei gleicher Presskraft mit ansteigendem Umformgrad verbessert. Die Umformgrade aus Block III sind  $\varphi \approx 0,1$  und damit geringer als jene, die im Block IV vorherrschen. Darum weisen die Kegel-Proben mit der Kegel-Matrize höhere Dichten als die Zylinder-Proben aus Block III auf. Das wird auch durch die sinkende Grenztemperatur im Block IV auf 350 °C bestätigt.

### Problemstellungen

Kritisch muss der Vergleich mit den Raumtemperatur-Proben betrachtet werden, da diese mit einem anderen Schmiermittel versehen werden als alle übrigen. Dieses Schmieröl ist für das Kalt-Kalibrieren optimiert und liefert im kalten Prozess beste Reibwerte. Hingegen ist der MoS<sub>2</sub>-Grafitsspray kein prozessoptimierter, sondern ein universeller Schmierstoff, der gute Reibwerte über weite Temperaturbereiche aufweist.

## 9. Experimenteller Teil: Lokale Verdichtung

Ziel dieses Versuchsblocks ist das Einstellen von lokalen Dichtegradienten im Bauteil. Dazu werden die Möglichkeiten des gradierten Erwärmens des Bauteils mittels Induktor und reinem Werkzeugkontakt untersucht.

### 9.1 Induktives Erwärmen der Bauteile

Durch induktives Erwärmen der Proben sollen schnelle Aufheizraten erreicht und gezielt die Randbereiche auf Temperatur gebracht werden. Dadurch entsteht eine gradierte Fließspannungsverteilung, die in einem nachgeschalteten Kalibriervorgang ausgenützt wird, um lokales Verdichten zu bewirken.

#### 9.1.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf

Die Versuchsvorrichtung mit der 1 MN-Hydraulikpresse, der Stempereinheit, der Matrize, dem Sockel, dem Auswurfsystem, der Temperaturmessung und dem Kraftaufnehmer ist die selbe wie in den zuvor beschriebenen Versuchen „Prozesstemperaturen und globale Verdichtung“ (vgl. Kapitel 7.1.1). Für die Erwärmung der Proben wird ein Induktor verwendet, der schwenkbar hinter der Versuchseinrichtung aufgestellt ist. Der Induktor wird durch ein Thermoelement geregelt, das an der Probe angepunktet ist. Zusätzlich ist eine Halteschere an der Matrize angebracht, auf der die Proben positioniert und erwärmt werden. Die wesentlichen Elemente der Versuchsvorrichtung sind in Abbildung 9.1 dargestellt.

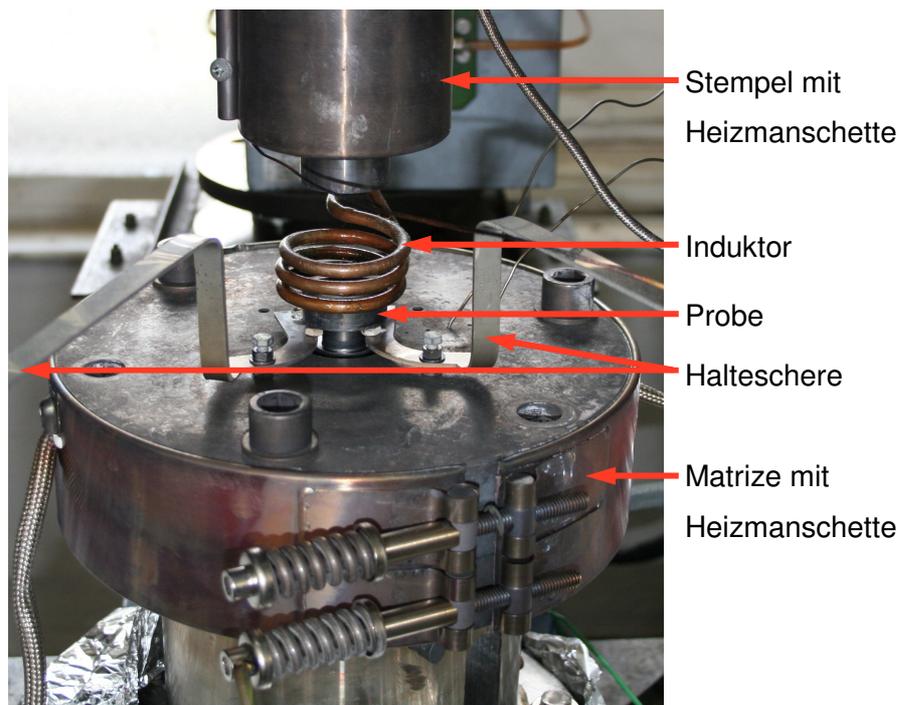


Abbildung 9.1: Versuchsvorrichtung zum induktiven Erwärmen der Proben.

## Experimenteller Ablauf

Die mit einem Thermoelement und Schmiermittel versehenen Proben werden auf der Halteschere positioniert und durch den Innendorn, der über die Halteschere herausragt, zentriert. Anschließend wird der Induktor über die Probe geschwenkt, eingerichtet, nach unten geklappt und der Aufheizvorgang beginnt. Nach dem Aufheizen klappt der Induktor nach oben und wird rasch zur Seite gedreht. Zeitgleich wird die Halteschere geöffnet, damit die Probe entlang des Innendorns in die Matrize gleitet und der Pressvorgang mit der maximalen Stempelgeschwindigkeit gestartet. Dabei wird zu Beginn des Pressens die Probe mit dem Innendorn nach unten in die Matrize gedrückt.

### 9.1.2 Proben

Verwendet werden die gleichen gesinterten Zylinder-Proben wie in Kapitel 7.1.2. beschrieben.

### 9.1.3 Versuchsblock V

Beim induktiven Erwärmen von Bauteilen werden die Randbereiche erhitzt und von dort aus wird die Wärme in das Innere der Bauteile durch Wärmeleitung übertragen. Diese Temperaturunterschiede bedingen auch eine gradierte Fließspannungsverteilung in der Probe, die radial zum Rand hin abnimmt. Werden die Proben während der Ausbildung von radialen Temperaturgradienten verpresst, können die Bereiche mit niedriger Fließspannung leicht verformt und damit verdichtet werden, wobei die kühleren Bereiche mit höheren Fließspannungen einer Verdichtung entgegenwirken.

Zuerst werden Voruntersuchungen unternommen, die den Temperaturgradienten im Bauteil analysieren sollen. Im darauffolgenden Versuchsblock V werden die Überlegungen zur gradierten Fließspannungsverteilung experimentell hinterfragt und dazu zehn Proben, bei einer Werkzeug-Temperatur von 450 °C, induktiv erwärmt und verpresst. Haltezeit des Induktors ist keine vorgesehen. Als Schmiermittel wird der MoS<sub>2</sub>-Grafitsspray verwendet und als Stempelgeschwindigkeit wird die größtmögliche mit 6,4 mm/s gewählt.

### 9.1.4 Auswertung

Um einen radialen Temperaturunterschied quantifizieren zu können, werden im Zuge der Vorversuche während des induktiven Erwärmens der Proben einerseits mit einer Wärmebildkamera Aufnahmen aufgezeichnet und andererseits Messungen mittels Thermoelementen durchgeführt. Das den Versuchen nachgeschaltete Säubern der Proben und die Maßnahmen zur Schlifferstellung sind analog zu den vorangegangenen Versuchen

(vgl. Kapitel 7.1.4). Die Schlibfbilder werden von den Ausschnitten M1, der an der Randinnenseite der Probe liegt und von M2, an der Außenseite, jeweils auf halber Höhe der Probe angefertigt (Abbildung 9.2).

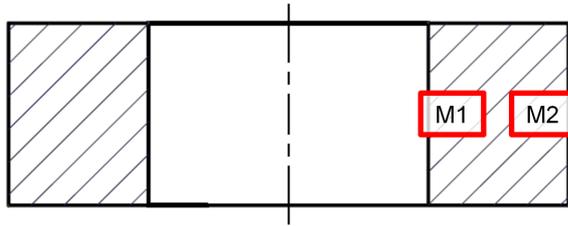


Abbildung 9.2: Bereich der Schlibfbildauswertung am Probenquerschnitt für den Block V.

### 9.1.5 Voruntersuchungen

Für die nachstehenden Versuche zum induktiven Randzonenverdichten ist es essenziell zu wissen, ob ein Temperaturunterschied am Rand der Probe mit dem zur Verfügung stehenden Induktor erzielbar ist. Dazu wird der Temperaturgradient mittels Thermoelementen und Thermografie bestimmt.

#### Messung des Temperaturgradienten mittels Thermoelementen

Dazu wird eine Probe mit sechs Thermoelementen versehen (Abbildung 9.3). Drei der Thermoelemente sorgen für die Bestimmung der Temperatur in radialer Richtung und die übrigen liefern Werte der Höhenrichtung.

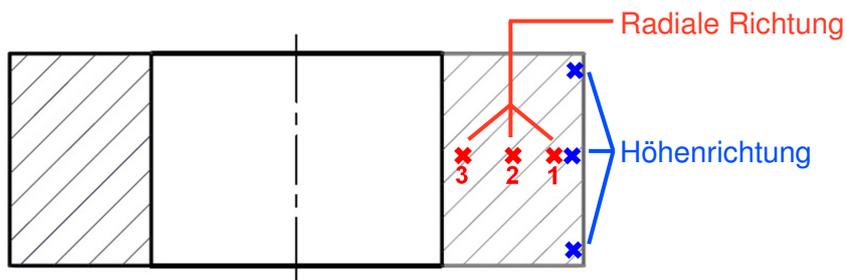


Abbildung 9.3: Anordnung der Messpunkte zur Bestimmung des Temperaturgradienten in radialer und axialer Richtung.

Das Werkzeug wird auf 450 °C erwärmt, um möglichst gleiche Bedingungen wie in den darauffolgenden Versuchen herzustellen. Die Versuchsprobe mit den angebrachten Thermoelementen wird auf die Halteschere gelegt und von Raumtemperatur bis auf 850 °C induktiv aufgeheizt. Gleichzeitig werden die Temperaturänderungen an den sechs Stellen aufgezeichnet. Die Auswertung der Messpunkte in Höhenrichtung an der Seitenfläche der Zylinder-Probe zeigt vernachlässigbar kleine Temperaturabweichungen auf. Die in der radialen Anordnung gibt Aufschluss über die Temperaturverteilung in Richtung

Probeninneres. In Abbildung 9.4 wird der Temperaturverlauf der radialen Messpunkte 1, 2 und 3 während des Erwärmens dargestellt.

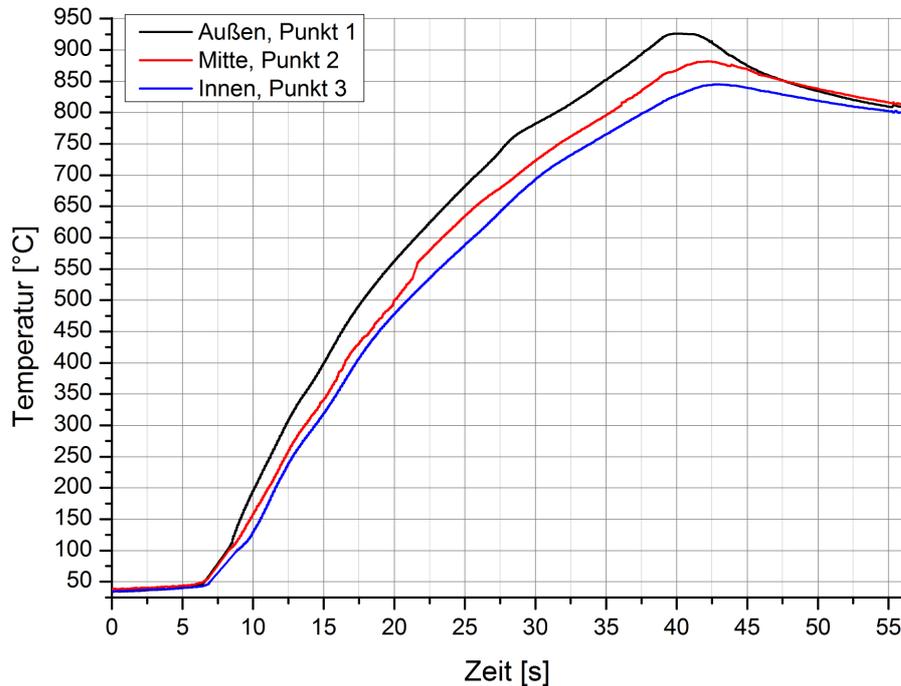


Abbildung 9.4: Temperaturverlauf der radialen Messpunkte durch induktives Erwärmen.

In den ersten sieben Sekunden werden alle drei Messpunkte nahezu gleich auf 50 °C gebracht. Ab dieser Temperatur weisen die Messpunkte bis zur Solltemperatur unterschiedliche Temperaturen auf, wobei die Differenz zwischen dem außen liegenden Punkt 1 und dem innen liegenden Punkt 3 am größten ist. Der Messpunkt in der radialen Mitte des Probenquerschnitts liegt zwischen den Temperaturwerten der beiden anderen. Nach ca. 25 Sekunden beträgt der radiale Temperaturgradient in etwa 100 °C. Aus diesem Vorexperiment resultiert, dass ein Einstellen eines radialen Dichtegradienten mit dem vorhandenen Induktorsystem möglich ist.

### Thermografische Analyse des Temperaturgradienten

Für diesen Versuch wird ein induktives Erwärmen einer Probe von 20 °C auf 850 °C durchgeführt. Während des Aufheizvorgangs wird mit einer Wärmebildkamera die Temperaturänderung der Probenoberfläche aufgezeichnet. In Abbildung 9.5 sind Momentaufnahmen der Kameraaufzeichnung in Wärmebild und in Echtbild bei einer Aufheizdauer von 30 Sekunden miteinander verglichen.

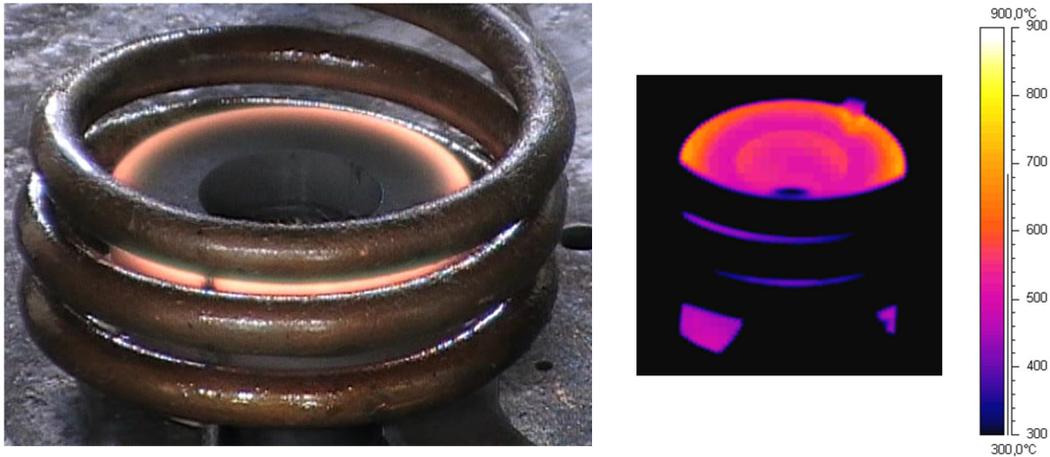


Abbildung 9.5: Momentaufnahmen von einem aufgezeichneten Video während induktiver Erwärmung einer Probe auf 850 °C in Echtbild (links) und in Wärmebild (rechts).

In der Echtbildaufnahme ist zu erkennen, dass der Probenrand schon eine Glühverfärbung aufweist, während der Querschnitt radial nach innen noch metallisch-grau ist. Die Wärmebildaufnahme beziffert den vorher genannten Temperaturunterschied. Die hell-orangen, ringförmigen Randbereiche sind auf einer Temperatur von ca. 700 °C und die pinken Flächen Richtung Probenkern stellen erst eine Temperatur von etwa 500 °C dar. Der mittels Thermografie gemessene Temperaturunterschied ist mit 200 °C höher als der zuvor durch die Thermoelemente erkannte Temperaturgradient. Grund hierfür ist, dass das äußere Thermoelement mit einem radialen Abstand von 2 mm vom Probenrand die Temperatur der Probe liefert, während die Temperatur-Höchstwerte der Wärmebildkamera an den heißesten Probenbereichen, die am äußersten Rand der Probe liegen, gemessen werden. Die Aufzeichnungen lassen direkt auf einen Temperaturgradienten schließen.

### 9.1.6 Ergebnisse und Diskussion

Es werden Zylinder-Proben mittels Induktor, der auf das Leistungsmaximum eingestellt ist, in ca. 35 Sekunden erwärmt. Da die radiale Temperaturverteilung einer zu verpressenden Probe während des Aufheizens nicht gemessen werden kann, wird der Erwärmvorgang unterbrochen, sobald eine radiale Temperaturverteilung durch eine Glühverfärbung zu erkennen ist (vgl. Echtbild in Abbildung 9.5). Von diesen verpressten Proben werden die Schlibfbilder auf lokale Dichteunterschiede analysiert. Abbildung 9.6 zeigt den Ausschnitt M2 auf halber Querschnittshöhe vom erwärmten, äußeren Randbereich einer Zylinder-Probe. Die Probe ist in diesem Bereich stark verdichtet und die vorhandenen Poren sind gleichmäßig verteilt. In Abbildung 9.7 ist der Bereich M1, der auf der weniger stark erwärmten Innenseite der Probe liegt, dargestellt. Dieser Ausschnitt weist im Vergleich zum äußeren Randbereich M2 größere Anteile an Poren auf.

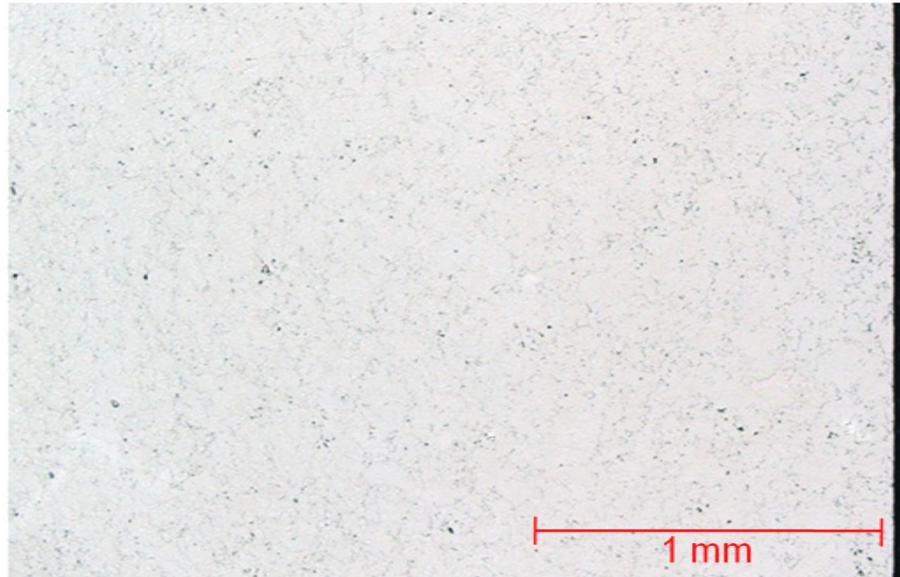


Abbildung 9.6: Schliffbildauswertung des äußeren Bereichs M2 in 50-facher Vergrößerung der induktiv randzonenerwärmten Probe.

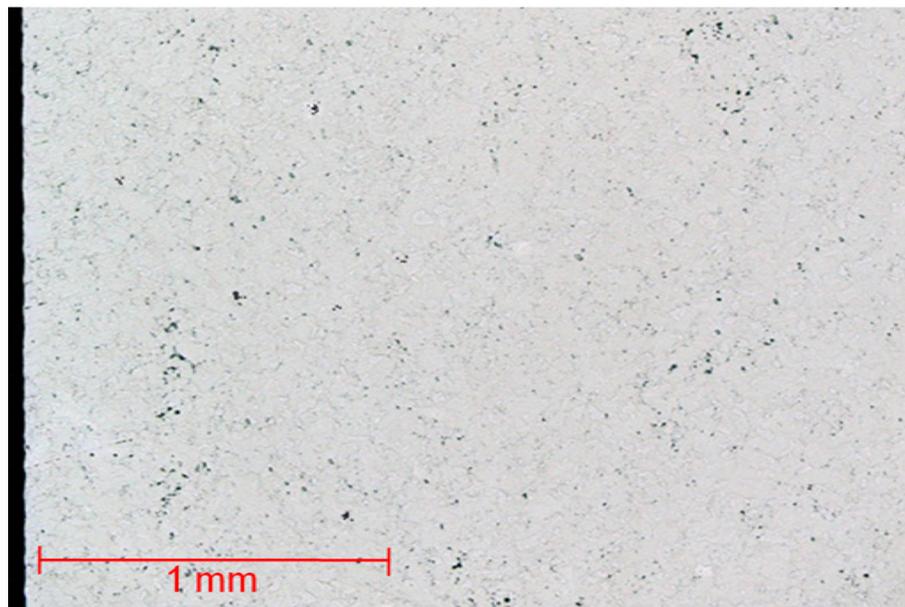


Abbildung 9.7: Schliffbildauswertung des inneren Bereichs M1 in 50-facher Vergrößerung der induktiv randzonenerwärmten Probe.

Der genannte Dichteunterschied zwischen den zwei Bereichen ist gegeben, aber nicht stark ausgeprägt. Gründe hierfür sind der geringe Umformgrad, den der äußere Randbereich der Zylinder-Probe erfährt und der zu kleine Temperaturgradient. Mit einer abgestimmten Kombination aus Probe und Matrize können höhere Umformgrade in diesem Bereich erreicht werden. Angedacht werden beispielsweise Querschnittsänderungen der Matrize analog zum Fließpressverfahren. So können die aus Kapitel 8 gewonnen Erkenntnisse einer Dichtesteigerung durch höhere Umformgrade mit den aktuellen Resultaten der

Randzonenerwärmung verbunden und ein größtmöglicher Nutzen des Halbwarm-Kalibrierens erhalten werden. Aus diesen Überlegungen wäre ein gezieltes Randzonenerwärmen mit anschließendem Kalibrieren mit erhöhten Umformgraden in den erwärmten Bereichen eine aussichtsreiche Lösung für das lokale Verdichten von Sinterbauteilen. Ein weiterer Grund für den nicht stark ausgeprägten Dichteunterschied zwischen innerem und äußerem Randbereich liegt in der Presskraft. Wird diese zu hoch gewählt, erfährt die Probe eine hohe globale Dichte und Unterschiede in der lokalen Dichte verschiedener Bereiche der Probe werden minimiert. Die Vorteile der induktiven Erwärmung sind das gezielt einstellbare Aufheizen von Bauteilbereichen, die schnelle Aufwärmzeit ohne Zunderbildung bis 900 °C und die einfache Prozessimplementierung eines Induktorsystems. Dem gegenüber steht eine bedingte Haltezeit für homogen durcherwärmte Bauteile. Mit einem speziell für diesen Prozess ausgelegten Induktorsystem sind noch größere Temperaturunterschiede im Bauteil möglich, die höhere Dichtegradienten erwarten lassen.

Durch Kalt-Kalibrieren ist ohne Berücksichtigung eines Aufmaßes nur ein gleichmäßiger, globaler Dichteanstieg erzielbar. Durch den Einsatz der HWU ist ohne geometrische Aufmaße der Vorform eine globale Dichtesteigerung erreichbar und durch Randzonenerwärmen kann auch ein lokaler Dichteanstieg eingestellt werden. Dadurch wird das Prozessspektrum des Kalibrierens wesentlich erweitert.

### Problemstellungen

Das Hauptproblem bei der Versuchsdurchführung ist der, für induktives Randzonenerwärmen ungeeignete, experimentelle Versuchsaufbau. Die Presse hat eine maximale Stempelgeschwindigkeit von 6,4 mm/s, was deutlich unter den Verfahrensgeschwindigkeiten der in der Praxis eingesetzten Pressen liegt. Der Pressvorgang dauert ca. 8,5 Sekunden, bis der Stempel auf die Probe trifft. Während dieser Zeit kühlen die Proben wieder aus bzw. findet ein Temperatenausgleich im Bauteil statt und der eingestellte Temperaturgradient wird vermindert. Bei einem optimierten Ablauf des Erwärm- und Pressvorgangs können bessere Ergebnisse des Temperaturgradienten und damit eine bessere Randverdichtung in Aussicht gestellt werden.

Weiters müssen eingebrachte Temperaturspannungen durch die rasche Erwärmung im Bauteil berücksichtigt werden. Ein Abbau der Spannungen kann durch eine Wärmebehandlung erreicht werden. Dies sollte aber kein Nachteil sein, denn es werden ohnedies zahlreiche Produktgruppen nach dem Kalibrieren einer Wärmebehandlung zur gezielten Einstellung der Eigenschaften unterzogen.

## 9.2 Erwärmen der Bauteile durch Werkzeugkontakt

Bei dieser Variante der lokalen Verdichtung durch selektive Erwärmung der Randbereiche wird keine externe Heizvorrichtung benötigt, sondern das Werkstück wird bei Raumtemperatur in ein aufgewärmtes Werkzeug eingelegt und so ein Temperaturgradient eingestellt. Diese Temperaturunterschiede sollen während des Kalibrierens zu lokaler Verdichtung führen.

### 9.2.1 Versuchsvorrichtung und experimenteller Ablauf

Die gesamte Pressvorrichtung mit der 1 MN-Hydraulikpresse, der Stempeleinheit, der Matrize, dem Sockel, dem Auswurfsystem, der Temperaturmessung und dem Kraftaufnehmer ist die selbe wie in den zuvor beschriebenen Versuchen (vgl. Kapitel 7.1.1). Da die Proben nicht aufgeheizt werden müssen, wird keine Heizvorrichtung benötigt.

#### Experimenteller Ablauf

Die Matrize wird auf die Solltemperatur gebracht und die Proben mit Schmiermittel versehen. Das Werkstück wird dann in die erwärmte Matrize gelegt und es wird eine bestimmte Zeitdauer abgewartet, bis der erwünschte radiale Temperaturgradient eingestellt ist. Anschließend beginnt der Pressvorgang.

### 9.2.2 Proben

Verwendet werden die gleichen gesinterten Zylinder-Proben wie in Kapitel 7.1.2.

### 9.2.3 Versuchsblock VI

Im Versuchsblock VI ist das Verpressen von acht Zylinder-Proben vorgesehen. Die Werkstück-Temperatur beträgt 20 °C und die Werkzeug-Temperatur 400 °C bis 550 °C in 50 °C-Schritten. Durch das Einlegen der Proben in das aufgewärmte Werkzeug soll ein radialer Temperaturgradient eingestellt werden. Dann sollte die Fließspannung am Rand niedriger als im Probenkern sein und das nachgeschaltete Kalibrieren sollte zu einer Dichtesteigerung im Randbereich führen. Als Schmiermittel wird der MoS<sub>2</sub>-Grafitsspray verwendet und als Stempelgeschwindigkeit wird die größtmögliche mit 6,4 mm/s gewählt.

### 9.2.4 Auswertung

Das den Versuchen nachgeschaltete Säubern der Proben und die Maßnahmen zur Schlifferstellung sind analog zu den vorangegangenen Versuchen (vgl. Kapitel 7.1.4).

## 9.2.5 Voruntersuchungen

Um festzustellen, ob der Temperaturgradient, der durch reinen Werkzeugkontakt mit der Probe eingestellt wird, für ein Randzonenverdichten ausreicht, wird die Versuchsprobe aus Kapitel 9.1.5 bei einer Werkzeug-Temperatur von 400 °C bis 550 °C in 50 °C-Schritten jeweils eingelegt und die Temperatur an sechs verschiedenen Messpunkten (vgl. Abbildung 9.3) aufgezeichnet. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Höhen an der Seitenfläche der Probe zeigen für alle Werkzeug-Temperaturen, dass es kaum einen Temperaturunterschied gibt. In radialer Richtung weist die Probe bei allen Werkzeug-Temperaturen einen Temperaturgradienten auf, der aber sehr klein ist. Als Beispiel soll der radiale Temperaturverlauf für das Erwärmen durch Werkzeug-Kontakt in einer auf 500 °C erwärmten Matrize gezeigt werden (Abbildung 9.8).

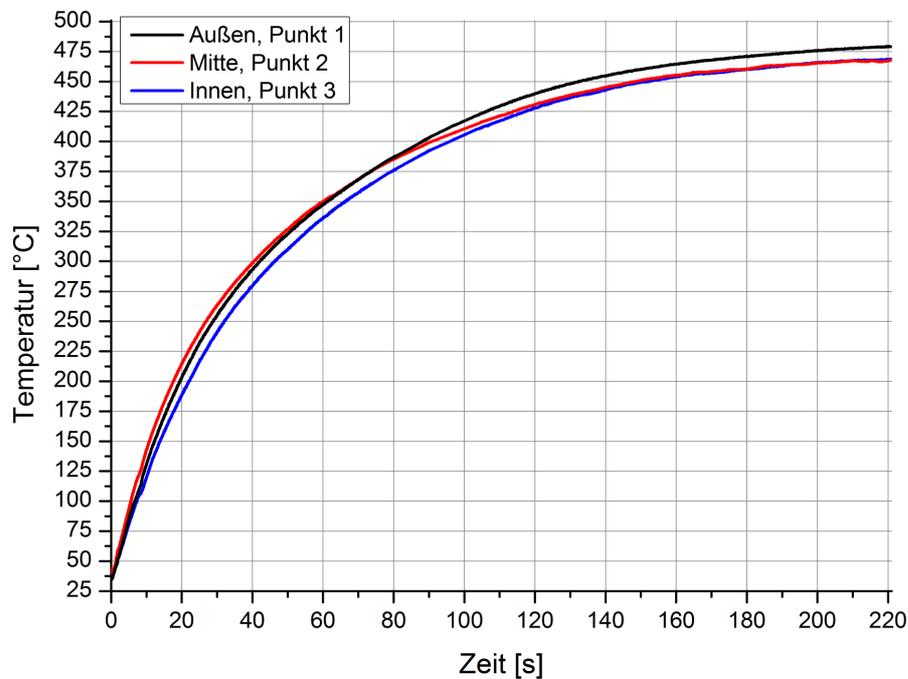


Abbildung 9.8: Temperaturverlauf der radialen Messpunkte durch Erwärmen im Werkzeug bei 500 °C.

Die Werkstück-Temperatur steigt anfangs linear mit geringen Temperaturunterschieden von außen nach innen an. Dieser Temperaturgradient ist aber im gesamten Aufwärmvorgang nie größer als 10 °C bis 15 °C und damit zu klein, um durch reinen Werkzeug-Kontakt eine gradierte Fließspannung in der Probe hervorzurufen.

## 9.2.6 Ergebnisse und Diskussion

Durch reinen Werkzeug-Kontakt ist mit den Zylinder-Proben kein radialer Temperaturgradient einstellbar. Das kann unter anderem folgende Gründe haben. Zum

einen ist das Verhältnis des Querschnitts zum Volumen der Zylinder-Proben groß, sodass die Wärme vom Werkzeug schnell und gleichmäßig in das Bauteil gelangt. Zum anderen wärmt der Dorn die Proben von innen ebenfalls auf. Für Anwendungen in der Praxis ist diese Variante der Erwärmung aber durchaus denkbar. Beispielsweise haben Zahnräder, vereinfacht dargestellt, Zähne in dreiecksform und bieten somit relativ viel Oberfläche zur Wärmeaufnahme. Zur Wärmeabgabe Richtung Probenkern weisen sie aber einen kleinen Querschnitt auf, sodass es möglicherweise zu einem Hitzestau kommen kann und damit zu einem Temperaturgradienten. Diese theoretischen Überlegungen hätten in der Praxis die Vorteile, dass durch Erwärmen der Randbereiche durch Werkzeug-Kontakt keine externe Heizvorrichtung benötigt wird und ein Verpressen ohne Zeitverlust möglich ist, was eine Reduzierung der Taktzeiten zur Folge hätte.

## 10. Vorschläge zur industriellen Umsetzung

Um aus den Forschungsergebnissen dieser Arbeit einen industriellen Nutzen zu erlangen, werden vier Betrachtungsweisen vorgeschlagen. Welche angewendet wird ist abhängig von den Zielsetzungen bei der Herstellung, den Produkten und den Forderungen an das Bauteil bzw. Werkzeug. Für jede Umsetzung des Halbwarm-Kalibrierens in die Praxis sollten Schmiermittel, Werkstoff, Geometrie des Werkstücks und der Matrize optimiert werden. Mit dem Berücksichtigen der Prozessimplementierung bestehender Anlagen und der Wirtschaftlichkeit werden wichtige Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche industrielle Umsetzung geschaffen. Im Folgenden werden die vier Varianten überblicksmäßig vorgestellt. Diese stellen keine speziellen Lösungen dar, sondern müssen für konkrete Aufgabenstellungen produktspezifisch entwickelt werden.

### Variante 1: Dichtesteigerung

Ziel ist es, die globale Dichte des Bauteils durch Halbwarm-Kalibrieren im Gegensatz zum Kalt-Kalibrieren bei gleicher Presskraft zu erhöhen. Wird dazu eine Werkstück-Temperatur von mindestens 450 °C gewählt, führt dies zu einer globalen Dichtesteigerung. Die Werkzeug-Temperatur sollte entweder gleich hoch wie die des Werkstücks sein oder zumindest 450 °C bei höheren Temperaturen des Werkstücks betragen. Sind fast volllichte Bauteile das Ziel des Halbwarm-Kalibrierens, werden Dichtewerte von 7,75 g/cm<sup>3</sup> ab einer Werkstück-Temperatur von 800 °C erreicht.

### Variante 2: Presskraftersparnis

Um gleiche globale Dichtewerte wie beim Kalt-Kalibrieren zu erreichen, jedoch mit niedrigeren Presskräften, damit die Werkzeugbelastungen reduziert werden, wird eine Werkstück-Temperatur ab 450 °C empfohlen. Das Werkzeug sollte dabei eine Temperatur von 400 °C nicht unterschreiten. Eine Presskraftersparnis von mindestens 30 % wird mit einer Werkstück-Temperatur ab 600 °C erzielt.

### Variante 3: Randzonenverdichten

Für Bauteile, bei denen ein lokales Verdichten der hoch beanspruchten Bereiche ausreicht, ist ein induktives Erwärmen der Randbereiche und rasches Kalibrieren zweckmäßig und führt zu einer Randzonenverdichtung. Höhere Werkstück-Temperaturen als 900 °C sollten vermieden werden, da die Gefahr der Zunderbildung besteht. Das Werkzeug sollte mindestens auf 400 °C gehalten werden. Weiters muss ein optimierter und aufeinander abgestimmter Prozessablauf des Induktorsystems und der Presseinrichtung sichergestellt werden.

#### Variante 4: Steigern des Formänderungsvermögens

Durch die HWU wird die Umformbarkeit der Bauteile erhöht und das Verpressen komplizierter Geometrien ermöglicht. Dabei sollte die Werkstück-Temperatur mindestens 550 °C betragen und das Werkzeug eine Temperatur von 400 °C aufweisen. Um die Grenzumformgrade mittels Halbwarm-Kalibrieren zu eruieren sind weitere Forschungstätigkeiten nötig.

Da der Grad der Formfüllung nicht nur von der Probertemperatur und der Werkzeug-Temperatur abhängt, sondern auch von der Geometrie der Vorform und der Matrize, sind konstruktive Maßnahmen bzw. Simulationsansätze ebenfalls von großer Bedeutung, um eine entsprechende Formfüllung zu erreichen.

## 11. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit wurde das Kalt-Kalibrieren als bestehendes Nachverdichtungsverfahren von Sinterbauteilen mit dem Ansatz der Halbwarmumformung (HWU) modifiziert und experimentell in Hinsicht auf globale und lokale Dichtesteigerung, Presskraftersparnis und gesteigertes Formänderungsvermögen geprüft.

Das Kalibrieren stellt die häufigste Sekundäroperation in der Sinterbauteilherstellung dar, jedoch sind die Werkzeugbelastungen schon heute grenzwertig. Darum werden Möglichkeiten zur Reduzierung dieser Belastungen und zur Erweiterung der Prozessgrenzen gesucht. Durch die Modifizierung des Kalibrierprozesses mit der HWU ist es möglich gleiche Dichtewerte bei reduzierten Presskräften, im Vergleich zum Kalt-Kalibrieren, zu erreichen. Das bedeutet eine Entlastung für die Werkzeuge.

Ein allgemein gültiger optimaler Temperaturbereich für Werkstück und Werkzeug beim Halbwarm-Kalibrieren existiert nicht, denn der Temperaturbereich ist prozessabhängig und wird von mehreren Haupteinflussfaktoren bestimmt. Diese sind Wirtschaftlichkeit, Schmiermittelauswahl, gewünschte Kraftersparnis, Dichtesteigerung und/oder Umformbarkeit, mechanische und thermische Werkzeugbelastungen, Taktzeiten und Heizvorrichtungen. Die Wahl des Temperaturbereichs ist immer ein teils gegenseitig ausschließendes Zusammenspiel aus diesen Faktoren. Um eine Kraftersparnis zu erreichen, ist für das Halbwarm-Kalibrieren mindestens eine Grenztemperatur zu wählen, die mit steigendem Umformgrad sinkt. Für das Halbwarm-Kalibrieren bedeutet das einen Temperaturbereich zwischen 400 °C bis 450 °C in Abhängigkeit vom Umformgrad. Bei einer Werkstück-Temperatur von 600 °C kann eine Kraftersparnis von einem Drittel, im Vergleich zum Kalt-Kalibrieren, erzielt werden. Temperaturen über Raumtemperatur bis 350 °C sollten jedenfalls aufgrund der Blausprödigkeit vermieden werden. Entgegen der Literatur weisen die Zylinder-Proben bei hohen Temperaturen bis 900 °C trotz kühlerem Werkzeug den Schmiedeeffekt nicht auf. Somit ist es in der Praxis möglich mit größeren Werkstück-Temperaturen als Werkzeug-Temperaturen hohe Verdichtung ohne Randporosität zu erzeugen.

Um den Forderungen nach immer höher belastbaren Bauteilen nachzukommen, ist es notwendig, die globale und lokale Dichteverteilung im Sinterbauteil belastungsgerecht einstellen zu können. Hierzu wird gezeigt, dass ab einer Grenztemperatur bei gleicher Presskraft höhere globale Dichtewerte durch die HWU möglich sind. Als Erweiterung des

Prozessspektrums wird das lokale Randzonenerwärmen mit anschließendem Kalibrieren experimentell abgeklärt.

Durch induktives Erwärmen der Randbereiche ist ein Temperaturgradient einstellbar. Dieser bedingt eine gradierte Fließspannung in radialer Richtung im Bauteil und während des Kalibriervorgangs erfahren die wärmeren Bereiche höhere Dichtewerte. Das Ausnützen einer solchen Temperaturverteilung im Bauteil ist auf andere Sekundärverfahren übertragbar. Angedacht wird die Implementierung in einem Fließpressprozess, der den Vorteil einer Querschnittsreduzierung hat und somit das Bauteil höhere Umformgrade, speziell in den Randbereichen, erfährt. Die Querschnittsänderung würde die erhitzten Randbereiche stärker verformen und höhere Randdichten wären die Folge.

Das Erwärmen der Randbereiche des Bauteils durch Werkzeugkontakt ist experimentell nicht möglich. Gründe hierfür sind im Versuchsaufbau zu suchen. Für Anwendungen in der Praxis wie beispielsweise Zahnräder ist diese Art von Erwärmung durchaus denkbar und hat den Vorteil, dass keine externen Heizvorrichtungen installiert werden müssen.

Das Kalt-Kalibrieren ermöglicht ohne Berücksichtigung eines Aufmaßes nur einen globalen Dichteanstieg. Durch die Erweiterung des Kalibrierprozesses mit der HWU ist ohne geometrische Aufmaße der Vorform eine globale Dichtesteigerung erreichbar und durch Randzonenerwärmen kann auch ein lokaler Dichteanstieg eingestellt werden. Dadurch wird das Prozessspektrum des Kalibrierens erweitert und das flexible Einstellen von Eigenschaften sichergestellt.

Ein Novum ist zum Thema Umformvermögen gelungen. Durch das Halbwarm-Kalibrieren wird nicht nur die globale und lokale Dichte erhöht und die Formfüllung gesteigert, sondern durch die HWU wird auch das Verpressen von unterschiedlichen Vorformen zum gleichen Endprodukt und das Pressen von komplizierten Geometrien aus Zylinder-Proben möglich gemacht.

Der Nutzen der HWU wird durch ein Erhöhen des Umformgrades verbessert. Dadurch werden verschiedene Verdichtungsverfahren je nach Umformgrad von der HWU profitieren. Das Fließpressverfahren oder Querwalzen von Sinterbauteilen erfährt demnach durch die HWU einen größeren Nutzen als der Kalibrierprozess. Gemäß den experimentellen Untersuchungen zur Umformbarkeit und zur Randzonenerwärmung kann die HWU die größte Wirkung beim Randzonenerwärmen in Verbindung mit hohen lokalen Umformgraden erzielen.

Als Schmiermittel für die Experimente wird stets ein Molybdändisulfid-Grafit Spray verwendet. Dieses Trennmittel entspricht den Anforderungen dieser Arbeit am besten und erweist sich als äußerst universell. Es soll jedoch nicht als allgemeingültig bestes Schmiermittel verstanden werden. Vielmehr muss ein Schmiermittel auf den jeweiligen Prozess abgestimmt werden. Wichtige Einflussgrößen für ein optimiertes Schmiermittel sind Temperaturbereiche, Kontaktkräfte, Relativbewegung der Reibpartner, Oberflächenvergrößerung und die Reinigung.

Für das Erwärmen der Bauteile werden ein Konvektionsofen und ein Induktor eingesetzt. Der Induktor hat eine kurze Aufwärmzeit und die Möglichkeit des gezielten Randzonenerwärmens zum Vorteil, hingegen muss mit diesem Aufheizsystem bei gleichmäßiger Bauteilerwärmung eine Haltezeit vorgesehen werden. Die Stärke des Ofens liegt in der homogenen Durcherwärmung der Bauteile. Dem stehen lange Aufheizdauer und die fehlende Möglichkeit zum Randzonenerwärmen gegenüber. Weiters sei die noch nicht überprüfte Ausnützung der Sinterwärme für anschließende Halbwarm-Kalibriervorgänge erwähnt.

Das Werkzeug für das Halbwarm-Kalibrieren muss für besondere Anforderungen geeignet sein. Die wichtigsten sind die entsprechende Einsatztemperatur, die Temperaturwechselbelastungen und die mechanischen Kräfte. Um die Wärmeleitung zwischen Werkzeug und Aufnehmer so gering wie möglich zu halten, ist ein Vorsehen von dünnen, langen Stegen mit isolierendem Material in den freien Räumen zwischen den Werkzeugen sehr effektiv. Ebenfalls wird eine Keramik-Isolierung zur Reduzierung der Wärmeleitung erfolgreich eingesetzt.

Durch die universell und flexibel einsetzbare HWU wird das Prozessspektrum des Kalt-Kalibrierens erweitert. Die neu erlangten Erkenntnisse über das Halbwarm-Kalibrieren sind auch auf andere Sekundärverfahren anwendbar, mit dem Vorteil, dass die bestehenden Anlagen weiter in Verwendung bleiben könnten. Nächste Forschungsschwerpunkte könnten das Untersuchen der HWU im Querwalzprozess, ein Bestimmen der Grenzformgrade in Hinblick auf komplexe Geometrien oder ein Abklären, zur Nutzung der Sinterhitze im anschließenden Halbwarm-Kalibrierprozess, sein. Aus rein analytischer Sicht könnten dieser Arbeit nachgeschaltete Studien über Werkstoffe und Schmiermittel maßgeblich am Erfolg der HWU in Nachbearbeitungsverfahren der Sinterbauteilherstellung beteiligt sein.

## Abkürzungsverzeichnis

PM	Pulvermetallurgie
HWU	Halbwarmumformung
WZ	Werkzeug
WS	Werkstück
MoS <sub>2</sub> -C	Molybdändisulfid-Grafitspray
C	Grafit-Gleitlack
BN	Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis
Min	Mineralöl mit Festschmierstoffen
$m_A$	Masse des Körpers „A“ [g]
$V$	Gesamtvolumen des Körpers [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_A$	Dichte des Körpers „A“ $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$
$m_B$	Masse des Körpers „B“ [g]
$\rho_{th}$	theoretische Dichte des Körpers $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$
$\rho_{rel}$	relative Dichte des Körpers [-]
$\rho_{rel\%}$	relative Dichte des Körpers in Prozent [-]
$P$	Porosität [-]
$P\%$	Porosität in Prozent [-]
$F_R$	Reibkraft [N]
$F_N$	Normalkraft [N]
$\mu$	Reibungszahl [-]
$\varphi$	Umformgrad [-]
$h$	Endhöhe nach Stauchung [mm]
$h_0$	Ausgangshöhe der Probe [mm]
$h_1$	Endhöhe der Probe [mm]
$\Delta h\%$	Höhenänderung in Prozent [-]
$\Delta d\%$	Änderung des Innendurchmessers in Prozent [-]
$d_0$	Ausgangs-Innendurchmesser der Probe [mm]
$d_1$	End-Innendurchmesser der Probe [mm]

## Literaturverzeichnis

- [Bei99] Beiss, P.: Oberflächenverdichten, Pulvermetallurgische Formgebung im Wandel, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, 83-198
- [Bro86] Broszeit, E.; Steindorf, H.; Schlieper, G.: Surface rolling of sintered materials, Horizons of powder metallurgy, Part I, Düsseldorf, 1986, 403-406
- [Buc07] Buchmayr, B.: Skriptum zur Vorlesung Umformtechnik für Werkstoffwissenschaftler, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, 2007
- [Cap06] Capus, J.M.: Surface-densified PM gears: new hope in new transmissions, Metal Powder Report, Vol. 61, No. 5, 2006, 18-21
- [Crc10a] Datenblatt CRC MoS<sub>2</sub> Grafit Montagespray, Fa. CRC Industries Deutschland GmbH, <http://www.crcind.com/wwwcrc/tds/TCI4%20GRAPHASSP.PDF>, 25. Oktober 2010, 21.38 Uhr MEZ
- [Crc10b] Datenblatt CRC Grafit 33, Fa. CRC Industries Deutschland GmbH, <http://www.crcind.com/wwwcrc/tds/TKC4%20GRAPHIT33.PDF>, 25. Oktober 2010, 21.42 Uhr MEZ
- [Doe86] Doege, E.; Meyer-Nolkemper, H.; Saeed, I.: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe, Hanser, München, 1986
- [Fer99] Ferguson, H.; Smith, S.K.: Precision cold forging of a P/M preform to produce a high density spur gear, International Congress & Exposition: P/M gears in power transfer applications, Detroit, 1999
- [Geb07] Gebhardt, A.: Skript zur Vorlesung Werkstoffkunde III, [http://www.fh-aachen.de/index.php?id=3509&no\\_cache=1&file=739&uid=8106](http://www.fh-aachen.de/index.php?id=3509&no_cache=1&file=739&uid=8106), 07. Jänner 2007, 10.20 Uhr MEZ, Kap. 3
- [Ger94] German, R.M.: Powder metallurgy science, 2<sup>nd</sup> ed., Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1994
- [Gro10] Groche, P.: Urformen, TU Darmstadt, <http://limb-online.de/files/tdf/2.%20Urformen.PDF>, 25. Oktober 2010, 20.43 Uhr MEZ
- [Gul06] Gulde, M.: Elektrostatisches Auftragen von pulverförmigen Schmierstoffen in der Warmmassivumformung und in daran angrenzenden Verfahren, Diss., Fakultät Maschinenbau der Universität Hannover, 2006, 22-32
- [Har93] Harrer, O.: Optimieren von Drahtumformverfahren, Diss., Leoben, 1993, 6-8
- [Hei09] Heinrich, H.: Halbwarmumformung von Stahl: Prozessgrundlagen, <http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsaeetze/halbwarm.pdf>, 09. Oktober 2010, 15.00 Uhr MEZ

- [Hen10] Datenblatt HeBoCoat 400EBA/401EBA, Fa. HENZE Boron Nitride Products GmbH, [www.henze-bnp.de](http://www.henze-bnp.de), 01. Dezember 2008
- [Jon97] Jones, P. et al.: Densification strategies for high endurance P/M components, International Journal of Powder Metallurgy, Vol. 33, No. 3, 1997, 37-44
- [Klo08] Klocke, F.; Gorgels, C.; Kauffmann, P.: Plasticity of PM materials, EURO PM 2008: Proceedings, Vol. 3, 2008
- [Klo10a] Klocke, F.: Urformen - Pulvermetallurgie, [http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/629c52491e476b86c1256f580026aef2/ftii\\_v2.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/629c52491e476b86c1256f580026aef2/ftii_v2.pdf), 10. Oktober 2010, 16.53 Uhr MEZ
- [Klo10b] Klocke, F.: Massivumformung, [http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/629c52491e476b86c1256f580026aef2/ftii\\_v4.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/629c52491e476b86c1256f580026aef2/ftii_v4.pdf), 09. Oktober 2010, 15.08 Uhr MEZ
- [Kop82] Kopp, R.; Tzscheuschler, H.: Stand und Einsatzmöglichkeiten des Warmziehens, Draht 33, Ausgabe 3, 1982, 116-119
- [Kot03] Kotthoff, G.: Neue Verfahren zur Tragfähigkeitssteigerung von gesinterten Zahnrädern, Diss., Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, 2003, Kap. 1-2
- [Kro66] Kroneis, M.; Krainer E.: Über die Warmformgebung von Stählen im Temperaturbereich des  $A_{c1}$ -Punktes, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 111.Jahrgang, Heft 11, 1966, 523-534
- [Kug09] Kugler, H.: Umformtechnik, Fachbuchverlag Leipzig, München, 2009
- [Lan93] Lange, K.: Umformtechnik Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion, 2. Aufl., Springer, Berlin, 1993, 185-187
- [Len80] Lenel, F.V.: Powder metallurgy, Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1980, Kap. 1
- [Lor95] Lorenz, B.: Ein Beitrag zur Theorie der Umformung pulvermetallurgischer Anfangsformen, Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, 1995, Kap. 1-4
- [Mar04] Marquardt, M.; Mack, C.; Wangler, L.: Pulvermetallurgie Sintern, Technische Ausarbeitung, FH Konstanz, 2004
- [Mat93] Matzer, F.: Skriptum zur Vorlesung Pulvermetallurgie, Lehrstuhl für Metallkunde und metallische Werkstoffe, Montanuniversität Leoben, 1993
- [Mit08] Mitterer, C.: Skriptum zur Vorlesung Pulvermetallurgie, Lehrstuhl für Metallkunde und metallische Werkstoffe, Montanuniversität Leoben, 2008
- [Ngu89] Nguyen, Q.T.: Entwicklung des Warmpressens zur Herstellung hochdichter und hochfester Sinterformteile, Diss., Institut für chemische Technologie anorganischer Stoffe, Wien, 1989, Kap. 1-4
- [Par00] Parteder, E.: Ein Modell zur Simulation von Umformprozessen pulvermetallurgisch hergestellter hochschmelzender Metalle, Diss., Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, RWTH Aachen, 2000

- [Pea02] Pease, L.F.; West, W.G.: Fundamentals of powder metallurgy, Metal Powder Industries Federation, Princeton, 2002, Kap. 6
- [Pla07] Planitzer, F.: Alternative Verfahren zum Nachverdichten von Zahnrädern aus P/M-Werkstoffen, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, 2007
- [Pöh08] Pöhlandt, K.: Werkstoffe, in: Lange, K. (Hrsg.): Fließpressen, Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke, Springer, Berlin 2008
- [Rat07] Ratzl, R.: Skriptum zur Vorlesung Pulvermetallurgische Konstruktionswerkstoffe, Montanuniversität Leoben, 2007, Kap. 2
- [Sar99] Saritas, S.; Dogan C.; Varol, R.: Improvement of fatigue properties of PM steels by shot peening, Powder Metallurgy, Vol. 42, No. 2, 1999, 126-130
- [Sch07a] Schikorr, W.: Fertigungstechnik, [http://www.fh-stralsund.de/dokumentenverwaltung/dokumanagement/psfile/file/4/7\\_Abtragen411348e400ef5.pdf](http://www.fh-stralsund.de/dokumentenverwaltung/dokumanagement/psfile/file/4/7_Abtragen411348e400ef5.pdf), 07. Februar 2007, 16.16 Uhr MEZ
- [Sch07b] Schatt, W.; Wieters, K.P.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie, Technologien und Werkstoffe, 2. Aufl, Kap. 1, Springer, Berlin, New York, 2007
- [Sch07c] Schatt, W.; Wieters, K.P.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie, Technologien und Werkstoffe, 2. Aufl, Kap. 8, Springer, Berlin, New York, 2007
- [Sch07d] Schatt, W.; Wieters, K.P.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie, Technologien und Werkstoffe, 2. Aufl, Kap. 7, Springer, Berlin, New York, 2007
- [Sch08] Schöck, J.; Kammerer, J.: Kap. 6 Verfahren, in: Lange, K. (Hrsg.): Fließpressen, Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke, Springer, Berlin 2008
- [Shu05] Shuangyu, L. et al.: A study on microstructures and properties of P/M valve seats of hot forging by laser irradiation, Optics & Laser Technology, Vol. 39, No. 4, 2007, 758-762
- [Spu81] Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 1 Urformen, Hanser, Wien, München, 1981, Kap. 4
- [Ven87] Venugopal, P. et al.: Force and energy during the cold choker extrusion of sintered iron preforms, Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 15, No. 3, 1987, 357-374
- [Wal07] Wallner, S.: Finite Elemente Simulation des Kalibrierprozesses für pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, 2007
- [Wal08] Wallner, S.; Hatzenbichler, T.; Buchmayr, B.: Untersuchung von Fließbedingungen zur Verdichtung von PM-Werkstoffen, XXVII Verformungskundliches Kolloquium, Donnersbach, 2008

[Wes10] Datenblatt HP 517, Fa. Wessely GmbH, [http://www.wessely.co.at/cms/cms/dbfs.php?file=dbfs:/neudaten/pi\\_hp517\\_de.pdf](http://www.wessely.co.at/cms/cms/dbfs.php?file=dbfs:/neudaten/pi_hp517_de.pdf), 25. Oktober 2010, 21.30 Uhr MEZ

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Die drei Hauptgründe für die PM nach [Mit08].	1
Abbildung 2.1: Verfahrensabläufe der PM nach [Sch07a].	4
Abbildung 2.2: Dichte von Stahlwerkstoffen in Abhängigkeit der Prozesskette nach [Gro10].	6
Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen der Dichte und wichtigen Eigenschaften von Eisensinterwerkstoffen nach [Sch07c].	8
Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Zugfestigkeit (strichlierte Linie) und der Bruchdehnung (volle Linie) von der Sinterzeit für gesintertes Eisenpulver bei 800 °C nach [Geb07].	9
Abbildung 3.1: Bildsamkeit über der Temperatur von unlegierten Stählen gemäß [Kro66].	14
Abbildung 4.1: Schematischer Zylinderstauchversuch.	19
Abbildung 4.2: Einfluss der Schmierung beim Stauchen nach [Doe86].	20
Abbildung 4.3: Auswertung von Ringstauchversuchen zur Ermittlung der Reibungszahl nach [Buc07].	20
Abbildung 6.1: Geometrie der Ringstauchproben (Angaben in mm).	24
Abbildung 6.2: Versuchsaufbau der Ringstauchexperimente.	25
Abbildung 6.3: Vergleich der vier Schmiermittel.	28
Abbildung 6.4: Mit MoS <sub>2</sub> -Grafitspray als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und $\varphi = 0,81$ .	29
Abbildung 6.5: Mit Grafit-Gleitlack als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und $\varphi = 0,78$ .	29
Abbildung 6.6: Mit dem Beschichtungsmittel auf Bornitrid-Basis als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und $\varphi = 0,82$ .	30
Abbildung 6.7: Mit dem Mineralöl mit Festschmierstoffen als Schmiermittel verpresste Ringstauchprobe bei 600 °C und $\varphi = 0,77$ .	30
Abbildung 6.8: Charakterisierung des MoS <sub>2</sub> -Grafitsprays.	31
Abbildung 7.1: Vollschnitt der Versuchsvorrichtung der HWU-Versuche.	33
Abbildung 7.2: Versuchseinrichtung für das Halbwarm-Kalibrieren.	34
Abbildung 7.3: Stempeleinrichtung mit Keramikscheiben.	35
Abbildung 7.4: Detail der Matrize für Zylinder-Proben mit Dorn.	35
Abbildung 7.5: Transportbox der Proben mit Deckel und Zange (links) und im Vollschnitt (rechts).	36
Abbildung 7.6: Ausgangsgeometrie (links) und Endgeometrie (rechts) der Zylinder-Proben (Angaben in mm).	37
Abbildung 7.7: Bereiche der Schlifffilmbauswertung am Probenquerschnitt für die Blöcke I bis III.	38

---

Abbildung 7.8: Versuchsprobe mit sechs Bohrungen zur Ermittlung der Aufheizkurve im Gesenk. ....	39
Abbildung 7.9: Erwärmen der Probe im Gesenk. ....	40
Abbildung 7.10: Temperaturverlauf beim Auskühlen der Proben in der Transportbox. ....	41
Abbildung 7.11: Sockel der Versuchseinrichtung und eingezeichnete Stege für reduzierte Wärmeleitung.....	42
Abbildung 7.12: Sockel mit vertieften Stegen und gekennzeichnete Isolierung. ....	42
Abbildung 7.13: Kraft-Weg-Diagramm zur Bestimmung der effektiven Kraftaufbringung durch Vergleich der Steigungen.....	43
Abbildung 7.14: Kraft-Weg-Diagramm zur Bestimmung der effektiven Kraftaufbringung mit Dichteangaben und markiertem Anschlagpunkt. ....	44
Abbildung 7.15: Kraft-Weg-Verläufe ausgewählter Proben unterschiedlicher Temperatur. ...	45
Abbildung 7.16: Kraftersparnis durch die HWU. ....	45
Abbildung 7.17: Abhängigkeit der Fließspannung vom Umformgrad für verschiedene Temperaturen bei einer Umformgeschwindigkeit von $\dot{\varphi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .....	46
Abbildung 7.18: Schliffbildauswertung des Bereichs M1 in 100-facher Vergrößerung für den Block II.....	48
Abbildung 7.19: Schliffbildauswertung des Bereichs M2 in 100-facher Vergrößerung für den Block II.....	49
Abbildung 7.20: Mittels HWU erzielte Dichtewerte bei 600 kN und 900 kN mit dem Raumtemperatur-Bezugsniveau der Zylinder-Proben. ....	50
Abbildung 8.1: Detail der Matrize für Kegel-Proben mit Dorn für die Versuche zur Umformbarkeit. ....	52
Abbildung 8.2: Ausgangsgeometrie (links) und Endgeometrie (rechts) der Kegel-Proben (Angaben in mm). ....	53
Abbildung 8.3: Bereich der Schliffbildauswertung am Probenquerschnitt für den Block IV. ...	54
Abbildung 8.4: Konturvergleich der weggesteuert verpressten Kegel-Proben bei verschiedenen Temperaturen. ....	55
Abbildung 8.5: Bei 20 °C weggesteuert verpresste Zylinderprobe.....	55
Abbildung 8.6: Konturvergleich der kraftgesteuert verpressten Kegel-Proben bei verschiedenen Temperaturen. ....	56
Abbildung 8.7: Konturvergleich von Zylinder-Proben bei Raumtemperatur und 500 °C.....	57
Abbildung 8.8: Kegel-Matrize mit gekennzeichneten Beschädigungen. ....	57
Abbildung 8.9: Mittels HWU erzielte Dichtewerte bei 600 kN und 900 kN mit dem Raumtemperatur-Bezugsniveau der Kegel-Proben.....	58
Abbildung 8.10: Schliffbildauswertung des Bereichs M1 in 20-facher Vergrößerung für den Block IV. ....	59

---

Abbildung 9.1: Versuchsvorrichtung zum induktiven Erwärmen der Proben.....	61
Abbildung 9.2: Bereich der Schliffbildauswertung am Probenquerschnitt für den Block V. ....	63
Abbildung 9.3: Anordnung der Messpunkte zur Bestimmung des Temperaturgradienten in radialer und achsialer Richtung.....	63
Abbildung 9.4: Temperaturverlauf der radialen Messpunkte durch induktives Erwärmen.....	64
Abbildung 9.5: Momentaufnahmen von einem aufgezeichneten Video während induktiver Erwärmung einer Probe auf 850 °C in Echtbild (links) und in Wärmebild (rechts). ....	65
Abbildung 9.6: Schliffbildauswertung des äußeren Bereichs M2 in 50-facher Vergrößerung der induktiv randzonenerwärmten Probe.....	66
Abbildung 9.7: Schliffbildauswertung des inneren Bereichs M1 in 50-facher Vergrößerung der induktiv randzonenerwärmten Probe.....	66
Abbildung 9.8: Temperaturverlauf der radialen Messpunkte durch Erwärmen im Werkzeug bei 500 °C.....	69

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der PM nach [Geb07, Mar04, Sch07a]. .....	12
Tabelle 2.2: Anwendungen der PM nach [Mar04]. .....	13
Tabelle 3.1: HWU im Vergleich zur Kalt- und Warmumformung nach [Buc07]. .....	15
Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile der HWU nach [Buc07, Klo10b].....	16
Tabelle 5.1: Übersicht des Versuchskonzepts.....	23