

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorabveröffentlichungen von Inhalten</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen thermisch gestützter Umformprozesse.....	3
2.1.1 Elastisches und plastisches Umformverhalten .....	3
2.1.2 Gefügeänderungen bei der Warmumformung.....	6
2.1.3 Thermische Behandlung metallischer Werkstoffe .....	9
2.2 Charakterisierungsmethoden bei erhöhten Temperaturen .....	14
2.2.1 Ermittlung und Einflussfaktoren auf das Fließverhalten.....	14
2.2.2 Bestimmung von Versagenskriterien .....	16
2.3 Innenhochdruck-Warmumformung von Rohren.....	18
2.3.1 Wirkmedien – Einteilung und Limitierungen .....	18
2.3.2 Prozessverfahren und -varianten .....	19
2.3.3 Thermisch basierte Umformung mittels Innendruck .....	21
2.4 Innenhochdruck-Charakterisierung von Rohren.....	24
2.4.1 Beschreibung der Spannungs-Dehnungszustände.....	24
2.4.2 Bestimmung von Versagenskriterien .....	26
2.5 Fazit aus dem Stand der Technik .....	28
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>29</b>
<b>4 Prozessauslegung und Randbedingungen</b>	<b>31</b>
4.1 Prozessanforderungen und -gestaltung .....	31
4.2 Werkstoffauswahl .....	33
4.2.1 Werkstückwerkstoff .....	33
4.2.2 Matrizenwerkstoff .....	34
4.3 Anforderungen an die Werkstoffcharakterisierung .....	35
4.3.1 Ermittlung temperaturabhängiger Emissionskoeffizienten.....	36
4.3.2 Temperaturverteilung konduktiv erwärmer Rohre.....	37
4.4 Zwischenfazit .....	38
<b>5 Charakterisierung thermisch-mechanischer Eigenschaften</b>	<b>39</b>
5.1 Ermittlung des Fließverhaltens durch Warmzugversuche .....	40
5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	40
5.1.2 Bestimmung temperaturabhängiger Elastizitätsmoduln.....	41
5.1.3 Bestimmung und Extrapolation von Fließkurven .....	41
5.1.4 Ableiten notwendiger Drücke für die Innenhochdruck-Umformung.....	43

5.1.5 Charakterisierung der thermischen Entfestigung .....	44
5.2 Temperaturabhängige Gefügeentwicklung .....	46
5.3 Untersuchung tribologischer Bedingungen.....	48
5.4 Zwischenfazit .....	50
<b>6 Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung von Rohren</b>	<b>51</b>
6.1 Bestimmung von Versagenskriterien .....	51
6.1.1 Expansionsversuch (HTB-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter ..	52
6.1.2 Rohrzugversuch (PTT-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter .....	56
6.1.3 Auswertemethodik der Grenzformänderung.....	59
6.1.4 Grenzformänderungsschaubilder bei erhöhten Temperaturen .....	67
6.2 Fließkurvenermittlung mittels Expansionsversuch .....	69
6.2.1 Analytische Beschreibung und Auswertung der Fließkurven.....	69
6.2.2 Experimentelle Regelung der Dehnrate .....	72
6.2.3 Auswertung und Extrapolation der Fließkurven .....	76
6.3 Zwischenfazit .....	79
<b>7 Isotherme Innenhochdruck-Pneumoumformung</b>	<b>81</b>
7.1 Prozessablauf und -parameter .....	81
7.2 Numerische Prozessanalyse .....	84
7.2.1 Aufbau des numerischen Modells .....	84
7.2.2 Analyse des Umformprozesses .....	86
7.2.3 Einfluss relevanter Prozessparameter auf die Ausformung .....	90
7.3 Experimentelle Modellvalidierung .....	96
7.4 Ableiten von Prozessfenstern.....	102
7.5 Einstellung von Produkteigenschaften.....	104
7.6 Zwischenfazit .....	106
<b>8 Druckgestütztes-Hochtemperatur-Profilbiegen</b>	<b>109</b>
8.1 Theoretische Prozessauslegung.....	109
8.2 Numerische Prozessanalyse .....	110
8.2.1 Bestimmung der thermischen Randbedingungen.....	110
8.2.2 Aufbau des Modells.....	112
8.2.3 Numerische Analyse der Umformung.....	114
8.3 Experimentelle Prozessumsetzung.....	117
8.3.1 Validierung des numerischen Modells .....	117
8.3.2 Maßhaltigkeit der Biegeradien .....	120
8.4 Ableiten von Prozessfenstern.....	121
8.5 Zwischenfazit .....	123
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>10 Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>

<b>Anhang</b>	<b>139</b>
Anhang A	Extrapolationskoeffizienten .....
Anhang B	MATLAB-Skript für die Radienauswertung .....
Anhang C	Python Skript zur Auswertung der Wandstärkenverläufe .....
Anhang D	Thermische Werkstoffkennwerte.....
<b>Lebenslauf</b>	<b>145</b>