

# **Abbildung eines Metall-Spritzgießprozesses zur Charakterisierung lokaler Werkstoffeigenschaften**

Vom Fachbereich Maschinenbau der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Tassilo Gilbert  
aus München

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek  
Tag der Einreichung: 24.08.2010  
Tag der mündlichen Prüfung: 20.10.2010

**ULB Darmstadt**



**17527312**

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Magnesium und seine Legierungen	3
2.1.1 Magnesium-Gusslegierungen	5
2.1.2 Werkstoffgefügeausbildung der Magnesium-Aluminium-Legierungen in urformenden Herstellungsverfahren	6
2.1.3 Materialeigenschaften der teilflüssigen Magnesiumlegierung	9
2.1.4 Kontinuumsmechanische Eigenschaften von Magnesium-Gusslegierungen	10
2.2 Metall-Spritzgieß-Fertigungsprozess	12
2.2.1 Prozessbeschreibung	13
2.2.2 Einfluss des Metall-Spritzgießprozesses auf die Werkstoffeigenschaften	15
2.3 Gießprozesssimulation	17
2.3.1 Modellierung von Strömungen und nichtstationären Temperaturfeldern in Gießprozessen	18
2.3.2 Nichtnewtonsche Materialeigenschaften zur Abbildung von Strömungen in Metall-Spritzgießprozessen	20
2.4 Prognose der Werkstoffeigenschaften	22
2.4.1 Prognose der morphologischen Gefügekenngößen	23
2.4.2 Prognose der kontinuumsmechanischen Werkstoffkenngößen	26
2.5 Phänomenologische Materialmodellierung	34
2.5.1 Elastisches und plastisches Werkstoffverhalten	34
2.5.2 Phänomenologisches Werkstoffversagen	39
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>41</b>
<b>4 Metall-Spritzgießprozess als Grundlage der Modellentwicklung</b>	<b>44</b>
4.1 Versuchsaufbau	45
4.1.1 Versuchsträger	46
4.1.2 Eigenschaften des Spritzgießwerkzeugs	47
4.2 Versuchsplanung	48
4.2.1 Auswahl der Prozessparameter	49
4.2.2 Auswahl der globalen Prüfbereiche	51
4.2.3 Auswahl der lokalen Prüfbereiche	55
4.3 Ermittlung der lokalen morphologischen Gefügekenngößen	60
4.3.1 Morphologische Auswertung der primären $\alpha$ -Mischkristallphase	61
4.3.2 Morphologische Auswertung der sekundären $\alpha$ -Mischkristallphase	64
4.3.3 Morphologische Auswertung der Porosität	65
4.4 Ermittlung der lokalen kontinuumsmechanischen Kenngößen	67
4.4.1 Analytische Modellbildung einer lokalen Fließkurve	67

4.4.2	Analytische lokale Versagensmodellierung .....	71
4.5	Virtuelle Abbildung des Metall-Spritzgießprozesses .....	74
4.5.1	Modellaufbereitung.....	75
4.5.2	Simulation des Temperaturhaushalts.....	80
4.5.3	Simulation des Einspritzvorgangs .....	81
4.5.4	Simulation der Nachdruck- und der Erstarrungsphase .....	85
<b>5</b>	<b>Prognose der lokalen morphologischen Gefügekenngößen</b>	<b>89</b>
5.1	Signifikanztests zur Auswahl der Gefügekenngößen für die Materialmodellierung .....	90
5.2	Auffinden von Zusammenhängen zwischen Gießkriterien und Gefügekenngößen.....	94
5.2.1	Vorauswahl der relevanten Gießkriterien durch Signifikanztests .....	96
5.2.2	Vorauswahl der Gießkriterien durch Korrelationsanalysen zur Eliminierung von redundantem Informationsgehalt.....	98
5.2.3	Auswahl der Gießkriterien durch Hauptkomponentenanalysen .....	99
5.2.4	Multivariate lineare Regressionsanalysen zur Ermittlung der Korrelationsfunktionen .....	103
5.2.5	Ergebnisse der multivariaten linearen Regressionsanalysen zur Prognose der Gefügekenngößen.....	105
5.3	Sensitivitätsanalyse der prognostizierten morphologischen Gefügekenngößen.....	124
<b>6</b>	<b>Prognose der lokalen kontinuumsmechanischen Werkstoffeigenschaften</b>	<b>126</b>
6.1	Auffinden von Zusammenhängen zwischen Gefügekenngößen und mechanischen Kenngrößen .....	126
6.1.1	Auswahl der relevanten Gefügekenngößen.....	127
6.1.2	Ergebnisse der multivariaten linearen Regressionsanalysen zur Prognose der lokalen Fließkurve .....	131
6.1.3	Ergebnisse der multivariaten linearen Regressionsanalysen zur Prognose der lokalen Versagensgrenzkurve.....	134
6.2	Sensitivitätsanalyse der prognostizierten kontinuumsmechanischen Werkstoffeigenschaften.....	137
<b>7</b>	<b>Gesamtprozess zur Prognose der mechanischen Kenngrößen aus der Gießsimulation</b>	<b>139</b>
7.1	Ergebnisse des Gesamtprozesses .....	139
7.2	Sensitivitätsanalyse des Gesamtprozesses .....	141
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	<b>146</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>148</b>