

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole .....</b>	<b>xix</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Stand der Technik in der konventionellen Tiefziehtechnik.....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Verfahrensbeschreibung der Tiefziehtechnik .....	7
2.1.2 Reibung und Tribosystem .....	10
2.1.3 Schmierstoffe für die Tiefziehtechnik .....	14
<b>2.2 Aktuelle Forschung im Bereich der Tiefziehtechnik .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Schmierstoffseitige Maßnahmen .....	18
2.2.2 Werkstückseitige Maßnahmen .....	18
2.2.3 Werkzeugseitige Maßnahmen .....	19
<b>2.3 Physikalische Grundlagen für die Tiefziehtechnik mit flüchtigen Schmierstoffen.....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Tribochemische Reaktionen an metallischen Oberflächen.....	20
2.3.2 Reinigung von Werkstücken .....	22
2.3.3 Fluidströmung in Mikroinjektoren .....	25
2.3.4 Hartstoffbeschichtungen von Werkzeugen .....	33
2.3.5 Benetzung von Oberflächen.....	36
<b>3 Materialien und Methoden.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Verwendete Schmierstoffe und Werkstoffe .....</b>	<b>39</b>
3.1.1 Mineralölbasierte Schmierstoffe .....	39
3.1.2 Kohlenstoffdioxid als flüchtiger Schmierstoff .....	40
3.1.3 Reinigungsmittel Tickopur .....	42
3.1.4 Werkstückwerkstoffe DC04, V2A und Aluminium .....	42
3.1.5 Werkzeugwerkstoff 1.2379 .....	43
<b>3.2 Prozessperipherie und Prozesscharakterisierung .....</b>	<b>43</b>
3.2.1 Simulationssoftware Comsol Multiphysics .....	43

3.2.2	Programmiersystem LabVIEW .....	44
3.2.3	Hochgeschwindigkeitskamera .....	45
3.2.4	Methoden zur Oberflächencharakterisierung .....	45
3.2.5	Profilmessung .....	46
<b>4</b>	<b>Versuchsanlagen .....</b>	<b>47</b>
4.1	Lasersystem für die Herstellung von Mikroinjektoren .....	47
4.2	Streifenziehanlage für die Reibwertermittlung .....	49
4.3	Streifenziehanlage mit einer optischen Zugänglichkeit .....	52
4.4	ICP-Plasmaanlage für die Herstellung von Hartstoffbeschichtungen .....	53
4.5	Druckreaktor für die Untersuchung der Benetzung .....	55
<b>5</b>	<b>Untersuchungen zur Vorbehandlung und Reinigung von Werkstücken .....</b>	<b>59</b>
5.1	Versuchsdurchführung .....	59
5.1.1	Vorreinigung der Werkstücke .....	59
5.1.2	Beölung der Werkstücke .....	61
5.1.3	Reinigung der Werkstücke .....	62
5.2	Ergebnisse und Diskussion .....	63
<b>6</b>	<b>Untersuchungen der Fluidströmung in Mikroinjektoren .....</b>	<b>67</b>
6.1	Simulation der Fluidströmung in Mikroinjektoren .....	67
6.1.1	Temperaturmessungen im ausströmenden Fluid .....	68
6.1.2	Simulation der Fluidströmung mit Comsol .....	70
6.1.2.1	Implementierung einer konvergenten Düse .....	73
6.1.2.2	Implementierung einer zylindrischen Düse .....	74
6.1.2.3	Implementierung einer divergenten Düse .....	74
6.2	Ergebnisse und Diskussion .....	76
6.2.1	Fluidströmung in einer konvergenten Düse .....	76
6.2.2	Fluidströmung in einer zylindrischen Düse .....	80
6.2.3	Fluidströmung in einer divergenten Düse .....	83
6.2.4	Vergleich der Fluidströmungen bei unterschiedlichen Düsen .....	86
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zum Schmierstoffverhalten in der Wirkfuge .....</b>	<b>89</b>
7.1	Versuchsdurchführung .....	89
7.2	Ergebnisse und Diskussion .....	90
<b>8</b>	<b>Untersuchungen zur Beschichtung und Benetzung von Werkzeug- oberflächen .....</b>	<b>103</b>
8.1	Beschichtung von Werkzeuoberflächen .....	104
8.1.1	Versuchsdurchführung .....	104
8.1.2	Ergebnisse und Diskussion .....	105

<b>8.2</b>	<b>Benetzung von Werkzeugoberflächen .....</b>	<b>107</b>
8.2.1	Versuchsdurchführung.....	107
8.2.2	Ergebnisse und Diskussion .....	110
<b>8.3</b>	<b>Reibwerte von unbeschichteten und beschichteten Werkzeugoberflächen.....</b>	<b>113</b>
8.3.1	Versuchsdurchführung.....	113
8.3.2	Ergebnisse und Diskussion .....	114
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
9.1	Zusammenfassung .....	121
9.2	Ausblick.....	124
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>a</b>
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>i</b>
11.1	Detailübersicht der Reinigungsversuche .....	i
11.2	Implementierung der Fluidströmung .....	s
11.3	Wechselplättchen im Streifenziehversuch .....	v
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>w</b>
	<b>Wissenschaftliche Beiträge.....</b>	<b>y</b>