

# **Analyse des tribologischen Größeneffekts beim Blechumformen**

Vom Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

Dissertation  
von  
M.-Eng. Zhenyu Hu

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. F. Vollertsen

Prof. Dr.-Ing. G. Hirt (RWTH Aachen)

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Januar 2009

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Reibung beim Tiefziehen	3
2.1.1 Reibzahlmessungen für die Blechumformung	3
2.1.2 Einfluss der Reibung auf den Tiefziehprozess	4
2.2 Mikrokaltumformung	5
2.2.1 Mikromassivumformung	5
2.2.2 Mikroblechumformung	6
2.3 Größeneffekte	7
2.3.1 Skalierung der Umformprozesse	7
2.3.2 Größeneffekt auf Materialeigenschaften	8
2.3.3 Größeneffekt auf Tribologie	10
2.4 FEM-Simulation von Mikroumformung	12
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>15</b>
<b>4 Experimentelle Untersuchungsmethode</b>	<b>17</b>
4.1 Versuchsprinzip	17
4.1.1 Streifenzugversuch	17
4.1.2 Streifenziehen mit doppelter Umlenkung	19
4.1.3 Tiefziehen	23
4.1.4 Tiefziehen rechteckiger Werkstücke	24
4.2 Werkzeuge	26
4.2.1 Werkstoff	26
4.2.2 Mechanische Eigenschaften	26
4.2.3 Messung der Werkzeuggeometrie	27
4.3 Werkstück	29
4.3.1 Werkstoff	29
4.3.2 Fließspannung	29
4.3.3 Korngröße	30
4.3.4 Rauheit	31
4.3.5 Härte	32
4.3.6 Elementanalyse	32
4.4 Schmierstoffe	33
<b>5 FEM Methode</b>	<b>35</b>

<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>37</b>
6.1	Streifenzugversuch	37
6.2	Streifenziehen mit doppelter Umlenkung	39
6.3	Tiefziehen	42
6.3.1	Einfluss der Skalierung auf die Reibung	42
6.3.2	Einfluss der Skalierung auf die Streuung	44
6.3.3	Einfluss der Schmierstoffviskosität auf die Reibung	46
6.3.4	Einfluss der Schmierstoffmenge auf die Reibung	47
6.3.5	Einfluss der Niederhalterkraft auf die Reibung	48
6.3.6	Wechselwirkung auf die Reibung	50
6.4	Tiefziehen rechteckiger Werkstücke	51
<b>7</b>	<b>Analyse der Reibung im Umformprozess</b>	<b>55</b>
7.1	Analytisches Modell für Streifenziehen	55
7.1.1	Analytisches Modell mit homogener Flächenpressungsverteilung am Ziehradius	55
7.1.2	Analytisches Modell mit inhomogener Flächenpressungsverteilung am Ziehradius	58
7.2	Analytisches Modell für das Tiefziehen	65
7.3	Ermittlung der Reibfunktionen	69
<b>8</b>	<b>Implementierung in die FEM</b>	<b>75</b>
8.1	Reibfunktionen aus dem Streifenziehen mit doppelter Umlenkung	75
8.1.1	Reibfunktionen aus Modell mit homogener Flächenpressungsverteilung	75
8.1.2	Reibfunktionen aus dem Modell mit inhomogener Flächenpressungsverteilung	76
8.2	Reibfunktionen aus dem Tiefziehen	77
8.2.1	Skalierte Tiefziehversuche	77
8.2.2	Wechselwirkung auf die Reibung	82
8.3	Fertigungsfehler der Werkzeuge vs. Stempelkraft	85
8.4	Eigenschaften des Probenmaterials vs. Stempelkraft	88
<b>9</b>	<b>Ursachen des tribologischen Größeneffekts</b>	<b>91</b>
<b>10</b>	<b>Einfluss der Schmierfilmdicke</b>	<b>93</b>
<b>11</b>	<b>Auswahl der Reibfunktion für das Tiefziehen rechteckiger Werkstücke</b>	<b>97</b>
<b>12</b>	<b>Einfluss der Skalierung auf die Umformgrenze</b>	<b>103</b>
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>107</b>
<b>14</b>	<b>Literatur</b>	<b>109</b>