

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen der Blechumformung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung	1
1.1.1 Klassifizierung der Verfahren der Umformtechnik	3
1.1.2 Prozessbeschreibung	5
1.2 Tribologie	6
1.2.1 Reibungsformen	6
1.2.2 Tribologisches System	7
1.2.3 Verschleißmechanismen	8
1.2.4 Schmierung	8
1.2.5 Parameter, die die Reibung beeinflussen	9
1.2.6 Einfluss des Schmierstoffs auf die Reibung	10
1.2.7 Einfluss der Blech-Oberflächenstruktur auf die Reibung	11
1.2.8 Blechoberflächen	12
1.2.9 2D-Oberflächenbeschreibung	17
1.2.10 Beschreibung von Blechoberflächen	19
1.3 Spannung, Formänderung, Umformgeschwindigkeit und Umformbeschleunigung	25
1.3.1 Kraft-Längenänderungs-Diagramm des einachsigen Zugversuchs	25
1.3.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm des einachsigen Zugversuchs	26
1.3.3 Logarithmische Formänderungen	29
1.3.4 Logarithmische Formänderungsgeschwindigkeit	30
1.3.5 Logarithmische Formänderungsbeschleunigung	31
1.3.6 Logarithmische Hauptformänderung, logarithmische Hauptformänderungsgeschwindigkeit und logarithmische Hauptformänderungsbeschleunigung	31
1.3.6.1 Logarithmische Hauptformänderung	31
1.3.6.2 Logarithmische Hauptformänderungsgeschwindigkeit	31
1.3.6.3 Logarithmische Hauptformänderungsbeschleunigung	31
1.4 Fließgesetz	32
1.5 Anisotropie	32
1.6 Fließkurve	36
1.6.1 Fließspannung	36
1.6.2 Ermittlung des Einsetzens plastischen Fließens	38
1.6.3 Hydraulisches und pneumatisches Tiefen	39

1.6.4	Kaltumformung .....	43
1.6.5	Halbwarm-Umformung .....	44
1.6.6	Warmumformung .....	47
1.6.7	Superplastische Blechumformung, ein Verfahren der Warm-Umformung .....	48
1.7	Fließbedingungen (Fließhypothesen) .....	50
1.8	Fließortfläche, Fließortkurve .....	52
1.9	Grenzformänderungsdiagramm .....	53
1.9.1	Ermittlung der Grenzformänderungskurven .....	54
1.9.2	Markieren von Kreisrastern .....	60
1.9.2.1	Elektrochemisches Markieren von Kreisrastern .....	60
1.9.2.2	Lasermarkieren von Kreisrastern .....	60
1.9.3	Anwendung des Grenzformänderungsdiagramms bzw. der Grenzformänderungskurve .....	61
1.9.3.1	Optimierung von Formänderungspfaden .....	62
1.9.3.2	Umformbarkeit .....	62
1.9.3.3	Prozesssicherheit (Robuster Fertigungsprozess) .....	64
1.9.4	Unterstützung des Eintuschierens von Ziehwerkzeugen .....	65
1.10	Erweiterung des Grenzformänderungsdiagramms .....	66
1.10.1	Logarithmische Dickenformänderung .....	66
1.10.2	Logarithmische Hauptformänderung $\phi_g$ .....	68
1.11	Dokumentation der Produktgüte .....	71
	Literatur .....	71
<b>2</b>	<b>Streckziehen .....</b>	<b>73</b>
2.1	Einfaches Streckziehen .....	73
2.2	Tangential-Streckziehen .....	77
2.3	Cyril-Bath-Streckziehanlage .....	79
2.4	NC-steuerbares segmentiertes Streckziehen .....	81
	Literatur .....	84
<b>3</b>	<b>Tiefen .....</b>	<b>85</b>
3.1	Tiefen rotationssymmetrischer halbkugelförmiger Blechformteile .....	85
3.1.1	Tiefungsverfahren .....	85
3.1.2	Tiefungskennwert .....	86
3.2	Mechanisches Tiefen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile .....	87
3.3	Hydraulisches Tiefen .....	88
3.3.1	Hydraulisches Tiefen halbkugelförmiger Blechformteile .....	89
3.3.2	Hydraulisches Tiefen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile .....	89
3.3.3	Kombination von hydraulischem Tiefen und hydromechanischem Tiefziehen .....	92

3.3.4	Kombination von konventionellem Tiefziehen und hydraulischem Tiefen .....	93
3.4	Pneumatisches Tiefen .....	96
3.4.1	Superplastische Umformung .....	96
3.4.2	Matrizenverfahren .....	97
3.4.3	Patrizenverfahren .....	98
3.4.4	Anwendungen .....	98
Literatur	.....	99
4	Tiefziehen .....	101
4.1	Tiefziehen rotationssymmetrischer Blechformteile .....	101
4.1.1	Verfahrensablauf und Werkzeuggestaltung .....	101
4.1.2	Geometrische Verhältnisse .....	104
4.1.3	Einsatz eines Niederhalters .....	105
4.1.4	Spannungsverhältnisse .....	106
4.1.5	Tiefziehverhältnisse .....	109
4.1.6	Ziehspalt .....	109
4.1.7	Ermittlung der mittleren Fließspannung .....	112
4.1.8	Ziehstempel-Teilkräfte und Ziehstempel-Gesamtkraft .....	114
4.1.9	Arbeitsdiagramm der Niederhalterkraft .....	119
4.2	Tiefziehen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile .....	120
4.2.1	Ziehprozess .....	120
4.2.2	Zieheinrichtungen im Pressentisch .....	121
4.2.3	Steuerung des Werkstoffflusses .....	123
4.2.4	Tribologisches System im Niederhalterbereich .....	124
4.2.5	Verteilung Flächenpressung unter dem Niederhalter .....	125
4.2.6	Segmentelastischer Niederhalter .....	126
4.2.7	Prismatisch verrippte Matrizie .....	128
4.2.8	Ziehwerkzeuge mit integrierter Zieheinrichtung .....	129
4.3	Hydromechanisches Tiefziehen .....	131
4.3.1	Verfahrensprinzip .....	131
4.3.2	Verlauf des Gegendrucks über dem Stempelweg .....	132
4.3.3	Bildung einer Wulst entgegen Tiefziehrichtung .....	133
4.3.4	Kräfte beim hydromechanischen Tiefziehen .....	135
4.3.5	Einfluss des Gegendrucks .....	136
4.3.6	Grenzziehverhältnisse beim hydromechanischen Tiefziehen .....	136
4.3.7	Einsatz von segmentelastischen Niederhaltern und Vielpunkt-Zieheinrichtungen beim hydromechanischen Tiefziehen .....	136
4.3.8	Tendenzen und Zielsetzungen .....	138
Literatur	.....	139

<b>5 Blechbiegen</b>	<b>141</b>
5.1 Einleitung	141
5.2 Grundlagen des Blechbiegens	144
5.2.1 Berechnungsmethoden	145
5.2.2 Formänderungen, Spannungen und Biegemomente für das elastisch-plastische Biegen mit reinen Momenten	145
5.2.3 Rückfederung beim reinen Momentenbiegen	149
5.2.4 Erweiterungen der elementaren Theorie zur Berechnung des reinen Momentenbiegens	153
5.2.5 Mehrachsige Berechnungsansätze	155
5.3 Einfluss- und Störgrößen	157
5.4 Prozess-Simulation und Prozessplanung	161
5.4.1 Kollisionskontrolle und Biegefolgenbestimmung	162
5.4.2 Werkstückhandhabung	164
5.4.3 Prozess-Simulation und NC-Datenbestimmung	164
5.4.4 Analytische und halbanalytische Verfahren	166
5.4.5 Finite-Elemente-Methode	170
5.4.6 Zuschnittsermittlung	172
5.4.7 Fertigungsgrenzen und Fertigungsfehler	175
5.5 Prozessregelung	176
5.6 Qualitätskriterien für Blechbiegeteile	182
5.7 Blechbiegeverfahren	183
5.7.1 Frei- und Gesenkbiegen	184
Freibiegen	184
Prägebiegen im V-Gesenk	187
Biegen mit elastischen Matrizen	189
Dreipunktbiegen	190
U-Biegen mit und ohne Gegenhalter	191
Z- oder N-Biegen	194
Maschinen- und Werkzeuge zum Frei- und Gesenkbiegen	194
5.7.2 Schwenkbiegen	199
5.7.3 Walzrunden	201
5.7.4 Walzprofilieren	204
5.8 Falzen und Bördeln	210
5.8.1 Falzen	210
5.8.2 Bördeln	212
5.9 Biegerichten	214
Literatur	216
<b>6 Schneiden</b>	<b>223</b>
6.1 Zerteilen	223
6.2 Scherschneiden (Normalschneiden)	226

6.2.1	Einführung .....	226
6.2.2	Ablauf des Scherschneidvorgangs .....	227
6.2.3	Schnittflächenkenngrößen .....	229
6.2.4	Schneidkraft .....	230
6.2.4.1	Kräfte beim Scherschneiden .....	230
6.2.4.2	Einflussgrößen auf die Schneidkraft .....	233
6.2.4.3	Schneidkraft-Stempelweg-Verlauf .....	235
6.2.5	Verschleiß und Verschleißminderung .....	238
Literatur	.....	239
<b>7</b>	<b>Feinschneiden .....</b>	<b>241</b>
7.1	Einführung .....	241
7.2	Grundlagen des Feinschneidens .....	242
7.2.1	Verfahrensablauf .....	242
7.2.2	Schnittflächenqualität .....	244
7.2.3	Verfahrensmerkmale .....	245
7.3	Schnittteilgestaltung und Bauteilwerkstoffe .....	249
7.4	Werkzeuge .....	251
7.5	Pressentechnik .....	252
Literatur	.....	256
<b>8</b>	<b>Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung .....</b>	<b>257</b>
8.1	Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung .....	257
8.1.1	Stand der Technik .....	257
8.1.2	Geschichtliche Entwicklung .....	257
8.1.3	Heutiger Stand und Entwicklungstendenzen im Bereich der Blechumformung .....	258
8.1.4	Alternative numerische Methoden .....	260
8.2	Numerische Modellierung von umformtechnischen Prozessen .....	261
8.2.1	Nichtlineare, zeitlich abhängige Randwertprobleme .....	261
8.2.2	System gekoppelter partieller Differentialgleichungen .....	262
8.2.3	Inhalt des Kapitels .....	262
8.3	Kontinuumsmechanische Grundlagen .....	263
8.3.1	Modellierung des Bewegungs- und Deformationszustandes .....	263
8.3.2	Dehnungsmaße .....	264
8.3.3	Spannungsmaße .....	266
8.3.4	Energetisch konjugierte Spannungs- und Dehnungsmaße .....	267
8.3.5	Kontinuitätsbedingung .....	268
8.3.6	Werkstoffgesetz .....	268
8.3.7	Impulsbilanz und Gleichgewichtsbedingungen .....	270

8.3.8	Wärmeleitung und Energiebilanz .....	270
8.3.9	Zusammenfassung der prozessbeschreibenden differentiellen Gleichungen .....	271
8.4	Finite Elementformulierung .....	272
8.4.1	Zeitliche und örtliche Diskretisierung des Problems .....	272
8.4.2	Elementformulierungen .....	273
8.4.2.1	Grundlage der isoparametrischen Elemente .....	273
8.4.2.2	Eigenschaften von Schalenelementen .....	274
8.4.2.3	Methoden zur Integration der Elementeigenschaften .....	276
8.5	Implizite quasistatische FEM-Verfahren .....	278
8.5.1	Schwache Formulierung des Problems .....	278
8.5.1.1	Überführung in eine integrale Form (Galerkin-Ansatz) ....	278
8.5.1.2	Herleitung nach dem Variationsprinzip .....	280
8.5.2	Iterative Lösungsverfahren des impliziten Problems .....	281
8.6	Lösung von thermo-mechanisch gekoppelten Problemen .....	282
8.6.1	Anwendungsgebiete in der Blechumformung .....	282
8.6.2	FEM-Formulierung und Lösungsvorgehen .....	282
8.6.3	Modellierung thermischer Randbedingungen .....	284
8.7	Explizite FEM-Verfahren .....	284
8.8	Vergleich der expliziten und impliziten Methoden .....	286
8.9	Modellierung der Kontaktbedingung .....	287
8.9.1	Beschreibung der Werkzeuggeometrie .....	287
8.9.1.1	Starre und deformierbare Kontaktflächen .....	287
8.9.1.2	Diskrete und glatte Kontaktflächen .....	288
8.9.2	Kontaktsuche und Kontakttoleranzen .....	288
8.9.3	Mathematische Behandlung von Verschiebungsrandbedingungen ...	289
8.9.4	Modellierung der Reibkräfte .....	290
8.9.4.1	Reales Reibverhalten bei Blechumformprozessen .....	290
8.9.4.2	Mathematische Reibmodelle .....	290
8.9.4.3	Numerische Implementierung .....	292
8.10	Materialmodelle und Materialdaten .....	293
8.10.1	Spezifikation des Verfestigungsverhaltens .....	294
8.10.1.1	Kaltfließkurven .....	294
8.10.1.2	Erweiterte Fließkurvenmodelle zur Beschreibung von Dehnraten und Temperatureinflüssen .....	295
8.10.1.3	Verfestigungsverhalten von metastabilen TRIP-Stählen ....	295
8.10.1.4	Modellierung des Presshärtevorganges .....	296
8.10.2	Fließortkurve und Anisotropie .....	297
8.10.2.1	Hill 1948-Modell .....	298
8.10.2.2	Nicht-quadratische Fließortkurvenmodelle .....	298
8.10.2.3	Fließortkurven-Modelle für Metalle mit hexagonaler (hex)Gitterstruktur .....	300

8.10.2.4 Beschreibung des kinematischen und anisotropen Verfestigungsverhaltens .....	301
8.10.3 Versagensvoraussage .....	301
8.10.3.1 Simulation von Falten und Einfallstellen .....	302
8.10.3.2 Voraussage von Grenzdehnungszuständen .....	302
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen .....	305
Literatur .....	306
<b>9 Fließkriterien .....</b>	<b>309</b>
9.1 Fließkriterien – Definition .....	310
9.1.1 von Mises-Fließkriterium .....	313
9.1.2 Hill'48 Fließkriterium .....	313
9.1.3 Barlat 1989 Fließkriterium .....	315
9.1.4 BBC 2005 Fließkriterium .....	316
9.2 Empfehlungen zur Auswahl eines Fließkriteriums .....	318
9.2.1 Mechanische Parameter für die Fließkriterien .....	318
9.3 Ausblick .....	320
Literatur .....	321
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>323</b>