
Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen der Blechumformung	1
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 Haupt- formänderungsgeschwindigkeit und logarithmische Haupt- formänderungsbeschleunigung	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 Hautpformänderung φ_g	68
1.11	Dokumentation der Produktgüte	71
	Literatur	71
2	Streckziehen	73
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
3	Tiefen	85
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 Matrize	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

5	Blechbiegen	141
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
6	Schneiden	223
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
7	Feinschneiden	241
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
8	Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung	257
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
9 Fließkriterien	309
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
Sachverzeichnis	323