

Formelzeichen, allgemeine Indizes und Abkürzungen.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Biegeverfahren	3
2.1.1 Biegeverfahren mit formgebundener Gestalterzeugung	6
2.1.2 Biegeverfahren mit kinematischer Gestalterzeugung	8
2.1.3 Kombiniertes Biegeverfahren	8
2.1.4 Freies endgesteuertes Biegen	11
2.2 Flexibilität der Biegeverfahren	12
2.3 Prozeßsteuerung und -regelung	13
2.4 Schlußfolgerungen aus dem Stand der Technik	15
3 Zielsetzung und Aufgabenstellung	16
4 Theoretische Betrachtungen zum Biegen	17
4.1 Werkstoffmodelle.....	19
4.2 Biegeberechnungen.....	21
4.2.1 Berechnung der Verschiebungen beim Biegen.....	21
4.2.2 Rückfederung beim Biegen.....	25
4.3 Biegelinienberechnung beim Profilbiegen	26
4.3.1 Momentenberechnung	27
4.3.2 Verschiebungsberechnung.....	32
4.3.2.1 Modellbeschreibung.....	33
4.3.2.2 Wahl des freien Parameters (Kraft P).....	39
4.3.2.3 Numerische Simulation des Biegeprozesses.....	40
4.3.2.4 Gelenkbewegungen	41
4.4 Änderung der Profilgeometrie.....	42
4.4.1 Geometrieänderung durch den Biegevorgang	42
4.4.2 Berücksichtigung des Innendrucks beim freien Biegen	43
5 Biegemaschine.....	46
5.1 Konzept.....	47
5.2 Auslegung der Biegemaschine	48
5.2.1 Ermittlung des Biegemoments	48
5.2.2 Maschinenwirkbewegungen	54
5.2.2.1 Relative Bewegung des drehbaren Aufnehmers.....	54
5.2.2.2 Drehung des drehbaren Aufnehmers.....	57
5.2.2.3 Drehung der Linearführung	59
5.2.3 Maschinenaggregate.....	61
5.2.3.1 Biegemoment und Querkraft.....	61
5.2.3.2 Innendruck und Dichtkräfte	66
5.2.4 Maschinenhydraulik.....	68
5.2.5 Funktionsbeschreibung der Biegemaschine	70
5.3 Steuerung der Biegemaschine	71
5.3.1 Anforderungen an die Maschinensteuerung	71
5.3.2 Maschinenlogik.....	71
5.3.3 Prozeßlogik	72
5.3.4 Parametervorgaben.....	73
5.3.5 Maschinensteuerung zum Biegen	74
5.3.6 Software-Entwicklungsumgebung	79
5.4 Prozeßdaten	80
5.4.1 Prozeßdatenerfassung	81
5.4.1.1 Innendruckmessung.....	81
5.4.1.2 Wegmessung	81
5.4.1.3 Kraftmessung	81
5.4.2 Prozeßdatenauswertung	81

6	Experimentelle Untersuchungen	82
6.1	Werkstoff der Profile	83
6.2	Versuchsprogramm	85
6.2.1	Pilotversuche	87
6.2.2	Bestimmung der Umformergebnisse	90
6.2.2.1	Messung des Biegeradien	91
6.2.2.2	Messung der Profilaußenmaße	93
6.2.2.3	Messung der Wölbung	94
6.2.2.4	Messung der Wanddicken	94
6.3	Versuchsaufbau und -ablauf	95
6.3.1	Einkammerprofil	95
6.3.1.1	Biegung um die kleine Achse	97
6.3.1.2	Biegung um die große Achse	104
6.3.1.3	Biegung einer Klothoide um die große Achse	107
6.3.2	Zweikammerprofil	109
6.3.2.1	Biegung um die kleine Achse	110
6.3.2.2	Biegung um die große Achse	111
6.4	Versuchsauswertung	114
6.4.1	Biegegeometrie	114
6.4.2	Betrachtungen zu den Radienübergängen	116
6.4.3	Profilageometrie	120
6.4.3.1	Meßreihen „Außenmaße“	121
6.4.3.2	Meßreihen „Wölbung“	123
6.4.3.3	Meßreihen „Wanddicke“	125
6.4.3.4	Zusammenfassung der Profilageometrieänderungen	128
6.4.4	Einfluß des Innendrucks	130
6.4.4.1	Einfluß des Innendrucks auf die Biegegeometrie	130
6.4.4.2	Einfluß des Innendrucks auf die Querschnittsgeometrie	130
7	FEM-Simulation	133
7.1	Prozeßsimulation von Umformvorgängen	133
7.1.1	Finite-Elemente-Methode	133
7.1.2	Algorithmus der Finite-Elemente-Methode	134
7.1.3	Aufbau und Einsatz eines FE-Modells zur Prozeßanalyse	136
7.1.4	Kritische Betrachtung der Finite-Elemente-Methode	138
7.2	Entwicklung des Simulationsmodells	139
7.2.1	Erstellung des Modells	139
7.2.1.1	Reales System	139
7.2.1.2	Idealisierung des realen Systems	140
7.2.1.3	Eingangsgrößen	141
7.2.1.4	Ausgangsgrößen	142
7.2.1.5	Geometrie und Materialverhalten des Profils und der Aufnehmer	142
7.2.1.6	Struktur und Randbedingungen	146
7.2.1.7	Diskretisierung des Finite-Elemente-Modells	146
7.3	Ergebnisse des FE-Modells	149
7.3.1	Radien an der Innenseite	150
7.3.2	Außenmaße	152
7.3.3	Wölbungen	155
7.3.4	Wanddicken	159
7.3.5	Spannungs- und Dehnungszustände	161
7.3.5.1	Plastische Vergleichsdehnung	162
7.3.5.2	Vergleichsspannung nach v. Mises	164
8	Vergleich der theoretischen Betrachtungen mit den experimentellen und numerischen Ergebnissen	166
9	Zusammenfassung und Ausblick	167
10	Literatur	169