

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik und Forschung	4
2.1	Anwendungsbereiche gebogener Rohr- und Profilbauteile	4
2.2	Innerbetrieblicher Produktionsprozess	6
2.3	Grundlagen der Biegeumformung von Rohren	8
2.3.1	Biegeumformung von Rohren	8
2.3.2	Fertigungsfehler und Versagensarten	15
2.4	Konstruktion und Modellierung von Biegegeometrien	18
2.4.1	Fertigungsgerechtes Konstruieren im Produktentstehungsprozess	18
2.4.2	Einordnung, Beschreibung und Konstruktion von Biegebauteilen	20
2.4.3	Modellierung der Biegelinie	23
2.5	Einordnung und Vorstellung ausgewählter Biegeverfahren	27
2.5.1	Formgebundene Biegeverfahren	28
2.5.2	Kinematische Biegeverfahren	30
2.6	Drei-Rollen-Schubbiegen	37
2.6.1	Wirkweise und Funktionsprinzip	37
2.6.2	Krümmungsverlauf am gebogenen Bauteil	39
2.6.3	Prozessauslegung und -korrektur	43
2.7	Qualitätsverbesserung durch integrierte Fertigungsmesstechnik	45
2.8	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung.....	47
3	Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	49
4	Versuchseinrichtungen und Halbzeuge	52
4.1	Versuchshalbzeuge	52
4.1.1	Geometrische und mechanische Eigenschaften.....	52
4.1.2	Materialverhalten.....	55
4.2	Versuchsanlagen und -werkzeuge	56
4.2.1	Materialprüfmaschine Zwick Z250	56
4.2.2	CNC-Biegemaschine	57
4.2.2.1	Verwendete Versuchswerkzeuge	58
4.2.2.2	Maschinenkinematik und -parameter	60

4.2.2.3	Maschinen- und Werkzeugsteifigkeit.....	66
4.3	Messmittel, -methoden und -programme.....	70
4.3.1	Induktiver Wegaufnehmer SM222.10.....	70
4.3.2	Druckkraftsensor C9A.....	70
4.3.3	Portable Koordinatenmessmaschine FARO EDGE 2,7 M.....	71
4.4	Aufbau und Validierung des FE-Simulationsmodells.....	72
5	Quantitative Bewertung von freiformgebogenen Bauteilen.....	76
5.1	Bestimmung der Biegelinie.....	77
5.1.1	Eingangsdaten aus FE-Simulation und realen Experimenten.....	77
5.1.2	Approximation der Messdatenpunkte.....	78
5.2	Ermittlung von Biege- und Krümmungsmerkmalen.....	80
5.3	Signifikanz und Auswahl der Approximationsparameter.....	83
5.3.1	Herstellung von Prüfobjekten.....	83
5.3.2	Einflussanalyse bezüglich der Parameter.....	84
5.3.3	Auswahl eines geeigneten Glättungsparameters.....	87
5.3.4	Analyse der geometrischen Abweichung.....	90
6	Sensitivitätsanalyse.....	93
6.1	Form- und Lageabweichungen.....	93
6.2	Prozessrelevante Einflussparameter.....	97
6.3	Einzelbogen - Beschreibung und Auswertung der Versuchsreihen.....	99
6.3.1	Versuchsreihe V1: Einfluss des Biegewinkels.....	100
6.3.2	Versuchsreihe V2: Einfluss des Biegeradius.....	101
6.3.3	Versuchsreihe V3: Einfluss der Anfahrstrategie.....	104
6.3.4	Versuchsreihe V4: Einfluss eines überlagerten Anfahrweges.....	106
6.3.5	Versuchsreihe V5: Einfluss des Überschleifen von NC-Bewegungssätzen.....	109
6.3.6	Versuchsreihe V6: Prozessgeschwindigkeit.....	112
6.3.7	Versuchsreihe V7: Einfluss der freien Spannlänge.....	113
6.3.8	Versuchsreihe V8: Einfluss der mechanischen Halbzeugeigenschaften.....	116
6.3.9	Versuchsreihe V9: Einfluss der geometrischen Halbzeugeigenschaften.....	118
6.4	Bogen-in-Bogen-Geometrie - Beschreibung und Auswertung der Versuchsreihen.....	120
6.4.1	Versuchsreihe V10: Einfluss unterschiedlicher Radienfaktoren.....	120

6.4.2	Versuchsreihe V11: Einfluss des Anfahrweges	123
6.5	Schlussfolgerung für eine biegegerechte Modellierung der Biegelinie	123
7	Entwicklung eines Produktplanungssystems	127
7.1	Ableitung eines Biegemodells	129
7.2	Bewertung der Anwendbarkeit und Approximationsgüte	132
7.2.1	Einzelbögen	133
7.2.2	Mehrradien-Geometrien	136
7.2.3	Schlussfolgerung für eine fertigungsgerechte Gestaltung	138
7.3	Produktplanung mittels KBE-Anwendung	138
7.3.1	Prozessverständnis	139
7.3.2	Datenverständnis	140
7.3.3	Datenvorbereitung	140
7.3.4	Modellierung	140
7.3.5	Evaluierung	142
7.3.6	Bereitstellung	143
8	Kompensations- und Korrekturmethode	144
8.1	Vorgehensweise	146
8.1.1	Kompensation durch Korrektur der Zwischenlängen	146
8.1.2	Kompensation durch Korrektur der Biegeradien und Zwischenlängen	148
8.2	Validierung der Vorgehensweise	149
8.2.1	Drei-Radien-Geometrie	149
8.2.2	Bogen-in-Bogen-Geometrie	152
8.3	Bewertung der Ergebnisse	155
9	Validierung der Methode zur biegegerechten Produktplanung	156
9.1	Versuchsvorbereitung und -durchführung	156
9.1.1	Demonstrator	157
9.1.2	Erweiterter Standardversuch	157
9.1.3	Trainingsdaten	158
9.2	Biegeversuche	158
9.2.1	Biegen ohne Kompensation	158
9.2.2	Biegen mit Kompensation	160

10	Verbesserungspotenzial in der praktischen Anwendung	163
11	Zusammenfassung und Ausblick	166
12	Literaturverzeichnis	169
13	Normen und Richtlinien	180
14	Anhang.....	182