

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse.....	5
2.1	Werkstoff Glas.....	5
2.1.1	Definition des Werkstoffs Glas	6
2.1.2	Struktur	9
2.1.3	Umformrelevante Eigenschaften	10
2.2	Heißformgebung dünner Gläser.....	14
2.2.1	Schwerkraftsenken.....	16
2.2.2	Vakuumunterstütztes Senken	17
2.2.3	Tiefziehen	17
2.2.4	Pressen	18
2.3	Prozessmodelle der Heißformgebung dünner Gläser	19
2.3.1	Einführung in die Modellarten.....	19
2.3.2	Modellierungsansätze in der Heißformgebung dünner Gläser	20
2.4	Gestaltabweichungen.....	24
2.5	Zwischenfazit	25
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4	Systembeschreibung	31
4.1	Prozessbeschreibung und Systemabgrenzung.....	31
4.2	Beschreibung der Systemkomponenten.....	31
4.2.1	Umformanlage.....	32
4.2.2	Formwerkzeug	33
4.2.3	Erwärmungseinrichtungen	35
4.2.4	Greifer- und Transporteinrichtungen	37
4.2.5	Kühlofen.....	37
4.2.6	Glasrohling	38
4.3	Messtechnik	38
4.4	Zwischenfazit der Systembeschreibung	40
5	Entwicklung eines empirischen Prozessmodells	41
5.1	Abstraktion der Prozesskette	41
5.2	Bildung des empirischen Ansatzes	47
5.3	Definition von Prozessstellgrößen	49
5.4	Definition von Prozesszielgrößen	50
5.5	Analyse von Störgrößen.....	51
5.6	Definition von zu bewertenden Prozessgrößen.....	53
5.7	Hauptversuchsdurchführung	54
5.8	Hauptversuchsauswertung.....	58

5.8.1	Strategie der Datengenerierung	59
5.8.2	Daten- und Sensitivitätsanalyse	61
5.8.3	Überprüfung der gewählten Parameterstufen	68
5.8.4	Betrachtung der Messunsicherheiten	69
5.9	Diskussion des empirischen Modells	69
5.9.1	Betrachtung der Formabweichung	70
5.9.2	Betrachtung der Rauheit	75
5.9.3	Betrachtung der Ausdünnung	75
5.10	Zwischenfazit der empirischen Modellbildung	75
6	Analytische Erweiterung des empirischen Modells	77
6.1	Modellerweiterung	77
6.2	Durchführung der Ergänzungsversuche	78
6.2.1	Durchführung der Temperaturergänzungsversuche	78
6.2.2	Durchführung der Druckergänzungsversuche	80
6.3	Auswertung der Ergänzungsversuche	83
6.3.1	Strategie der Datengenerierung	83
6.3.2	Daten- und Sensitivitätsanalyse	84
6.3.3	Diskussion der Messunsicherheiten	88
6.4	Diskussion der Maschinenabbildungsfunktionen	89
6.5	Diskussion der Prozessabbildungsfunktionen	94
6.6	Analytischer Ansatz – Temperaturmodell	95
6.7	Zwischenfazit der Modellerweiterung	100
7	Entwicklung eines numerischen Modells	101
7.1	Aufbau des numerischen Modells	102
7.2	Thermische Validierung des Modells	105
7.3	Thermomechanische Validierung des Modells	111
7.4	Simulativ unterstützte Ursachenanalyse der Formabweichung	113
7.5	Anwendung des numerischen Modells zur Prozessoptimierung	119
7.6	Zwischenfazit der numerischen Modellbildung	123
8	Validierung der Modelle	125
8.1	Definition des Validierungsdemonstrators	125
8.2	Reduktion der Prozessstellgrößen	127
8.3	Versuchsdurchführung	127
8.4	Versuchsauswertung	128
8.5	Simulative Untersuchung	130
8.6	Zwischenfazit der Validierung des Modells	132
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
10	Literaturverzeichnis	143
11	Anhang	153