

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Lösungsweg	6
2	VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG KOMPLEXER STABFÖRMIGER KUNSTSTOFFHOHLKÖRPER	8
2.1	Verfahren zur Herstellung thermoplastischer Hohlkörper	8
2.1.1	Die Fluidinjektionstechnik	8
2.1.1.1	Die Gasinjektionstechnik	11
2.1.1.2	Die Wasserinjektionstechnik	11
2.1.1.3	Die Projektinjektionstechnik	12
2.1.2	Fertigungstechnologien für endlosfaserverstärkte thermoplastische Hohlkörper	15
2.2	Verfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter duroplastischer Hohlkörper	17
2.3	Verfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter elastomerer Hohlkörper	19
3	DIE FLUIDINJEKTIONSTECHNIK IN DER PUR-VERARBEITUNG.....	22
3.1	Grundlagen zur PUR-Chemie	22
3.2	Marktübersicht.....	23
3.2.1	Faserverstärkte Strukturbauteile mit PUR-Matrix	23
3.2.2	PUR-Schlauchleitungen.....	26
3.3	Herausforderungen bei der Nutzung der FIT in der Polyurethanverarbeitung.....	26
3.4	Bisherige Erkenntnisse zur Nutzung der Gasinjektionstechnik bei der Verarbeitung reaktiver Polyurethane	29
3.5	Theoretische Betrachtung prozessbedingter Vorteile der PIT gegenüber der GIT	30
3.6	Grundlagenuntersuchungen zur Validierung der erzielbaren Bauteilqualitäten.....	33
3.6.1	Verfahrensablauf bei der Herstellung endlosfaserverstärkter PUR-Hohlkörper.....	33
3.6.2	Werkzeugtechnik zur Durchführung der Grundlagenuntersuchungen.....	35
3.6.3	Anlagentechnik zur Durchführung der Vorversuche	37
3.6.4	Matrixmaterial für die Vorversuche	37
3.6.5	Auswahl möglicher Faserhalbzeuge	38
3.6.6	Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen.....	38
3.6.7	Erkenntnisse zur Prozessführung und Werkzeuggestaltung	41
4	VERFAHRENSTECHNIK ZUR HERSTELLUNG ENDLOSFASERVERSTÄRKTER HOHLKÖRPER AUS POLYURETHAN	42
4.1	Versuchsplanung	42
4.2	Anlagentechnik	43
4.2.1	Dosieranlage	44
4.2.2	Formträger	44
4.2.3	Gasdosierstation	44
4.2.4	Automatisierung des Fertigungsablaufs.....	44
4.3	Werkzeugtechnik.....	45

4.3.1	Gas-Injektor	47
4.3.2	Vorrichtung zur kavitätsseitigen Fixierung des Preforms	48
4.3.3	Werkzeugeinsätze zur Herstellung verschiedener Probekörpergeometrien	49
4.3.3.1	Gerades Bauteil	49
4.3.3.2	Gerades Bauteil mit Abzweigung	50
4.3.3.3	Komplexes, praxisnahes Bauteil mit einer vierfachen Umlenkung	51
4.3.3.4	Komplexes, praxisnahes Bauteil mit integrierten Versteifungselementen	51
4.4	Versuchsmaterialien	52
4.4.1	Auswahl der Polyurethane	52
4.4.2	Charakterisierung der PUR-Systeme	53
4.4.2.1	Duroplastisches PUR	54
4.4.2.2	Weich-elastisches PUR	56
4.4.2.3	Zäh-elastisches PUR	58
4.4.3	Verwendete Faserhalbzeuge	59
4.4.3.1	Glasfaserrundgeflechte	61
4.4.3.2	Kohlenstofffaserrundgeflecht	62
4.4.3.3	Aramidfaserrundgeflecht	63
4.4.4	Verwendete Projektile	63
4.5	Analyseverfahren	64
4.5.1	Bestimmung der geometrischen Eigenschaften	64
4.5.1.1	Bestimmung der Restwanddicke	64
4.5.1.2	Bestimmung des Hohlraumdurchmessers	65
4.5.1.3	Bestimmung der Exzentrizität des Hohlraums	65
4.5.1.4	Bestimmung der Ovalität	66
4.5.2	Bestimmung der Bauteilmasse	66
4.5.3	Bestimmung des Fasergewichts- bzw. Faservolumenanteils	66
4.5.4	Untersuchung der mechanischen Eigenschaften	66
4.5.4.1	Bestimmung der Biegeigenschaften	66
4.5.4.2	Bestimmung des Berstdrucks	68
4.5.5	Mikroskopische Untersuchungen	69
4.5.5.1	Bestimmung der Imprägnierqualität	69
4.5.5.2	Bestimmung der Oberflächenrauheit	70
5	ERGEBNISSE DER VERFAHRENSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNGEN	71
5.1	Allgemeingültige Aussagen zum Formteilbildungsprozess	71
5.1.1	Einfluss der Vorreaktionszeit	71
5.1.2	Einfluss des Füllgrades	74
5.1.3	Einfluss des Verfahrens	75
5.1.4	Einfluss der Nachdruckhöhe	76
5.2	Die Restwanddickenverteilung gerader Bauteilgeometrien	77
5.2.1	Einfluss des Matrixmaterials auf die Restwanddickenverteilung	78
5.2.2	Einfluss des Preforms auf die Restwanddickenverteilung	80
5.2.3	Einfluss des Projektildurchmessers auf die Restwanddickenverteilung	81
5.2.4	Einfluss des Verfahrens auf die Restwanddickenverteilung	83

5.2.5	Einfluss des Nachdrucks auf die Restwanddickenverteilung	84
5.3	Die Restwanddickenverteilung praxisnaher Bauteilgeometrien	84
5.3.1	Einfluss der Bauteilkomplexität auf die Restwanddickenverteilung	84
5.3.2	Ausformung von zusätzlichen Extremitäten	87
5.4	Untersuchung des Bauteilgewichtes	89
5.4.1	Einfluss des PUR-Systems und des Preforms auf das Bauteilgewicht	90
5.4.2	Einfluss des Projekttils auf das Bauteilgewicht	91
5.4.3	Einfluss des Prozesses auf das Bauteilgewicht	91
5.5	Erzielbare Fasergewichts- bzw. -volumengehalte	92
5.6	Untersuchung der Biegeeigenschaften	93
5.6.1	Einfluss der Verstärkungsfaser	94
5.6.2	Einfluss des Projektildurchmessers	95
5.6.3	Einfluss des Verfahrens	96
5.6.4	Einfluss der Nachdruckhöhe	98
5.7	Untersuchung der Berstdruckfestigkeit	99
5.7.1	Einfluss des PUR-Systems auf die Berstdruckeigenschaften	99
5.7.2	Einfluss des Preforms auf die Berstdruckeigenschaften	100
5.7.3	Einfluss des Verfahrens auf die Berstdruckeigenschaften	103
5.8	Qualitative Untersuchung der Imprägnierqualität	104
5.8.1	Einfluss der PUR-Matrix und der Endlosfaserverstärkung auf die Imprägnierung	105
5.8.2	Einfluss des Verfahrens auf die Imprägnierqualität	108
5.9	Untersuchung der Hohlraumrauheit	111
6	VERGLEICH MIT THERMOPLASTISCHEN BAUTEILEN	114
6.1	Herstellung von thermoplastischen Vergleichsprobekörpern	114
6.2	Vergleich der Restwanddickenverteilung an geraden Bauteilgeometrien	114
6.3	Vergleich der Restwanddickenverteilung von komplexen Bauteilgeometrien	115
6.4	Vergleich der Bauteilgewichte	116
6.5	Vergleich der Biegefestigkeit	117
6.6	Vergleich der Berstdruckfestigkeit	119
6.7	Vergleich der Hohlkörperoberfläche	121
6.8	Abschließender Vergleich des Eigenschaftsprofils	123
7	FAZIT UND AUSBLICK	124
7.1	Fazit	124
7.2	Ausblick	125
7.3	Zusammenfassung	127
7.4	Summary	129
8	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES	131
8.1	Abkürzungen	131
8.2	Formelzeichen	132
8.3	Indizes	132
9	LITERATUR	133

10	ANHANG.....	144
10.1	Hohlraumdurchmesser und Ovalität.....	144
10.2	Einfluss der Projektilgeometrie auf die Berstdruckfestigkeit	146
10.3	Maschineneinstellung zur Herstellung thermoplastischer Vergleichsprobekörper	146
10.4	Maschineneinstellung zur Durchführung der Berstdruckversuche.....	147