

1	INJEKTIONSBOXEN ALS WEGBEREITER FÜR EINE ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE PULTRUSION	1
2	GRUNDLAGEN DER FASERIMPRÄGNIERUNG IM PULTRUSIONSPROZESS	3
2.1	Einordnung der Herstellungsverfahren von endlosfaserverstärkten Kunststoffprodukten mit kontinuierlicher Faserimprägnierung	3
2.1.1	Beschreibung der Faserimprägnierung	4
2.1.2	Herstellungsverfahren mit kontinuierlicher Faserimprägnierung	5
2.2	Der Pultrusionsprozess zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Kunststoffprofilen	6
2.2.1	Relevante Materialien für die Pultrusion	8
2.2.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Pultrusionsprozesses	14
2.3	Imprägnieroptionen für die Pultrusion	14
2.3.1	Offenes Bad und Werkzeugeinlauf	15
2.3.2	Injektionsboxen	18
2.3.3	Imprägnierungsassoziierte Produktfehler	22
2.4	Untersuchung der Prozesscharakteristika von Injektionsboxen	23
2.4.1	Beschreibungsebenen des Prozesses	24
2.4.2	Entstehung der Abzugskraft im Pultrusionsprozess	25
2.4.3	Druckaufbau in der offenen Injektionsbox	26
2.5	Zusammenfassung des Stands der Technik	29
3	BESCHREIBUNG DER STRÖMUNGEN IN OFFENEN INJEKTIONSBOXEN	30
3.1	Eingrenzung der Problemstellung	30
3.1.1	Zielsetzung bei der Auslegung einer offenen Injektionsbox	31
3.1.2	Parameterraum für die Injektionspultrusion	32
3.2	Differenzierung von Imprägnierung und Druckaufbau in der offenen Injektionsbox	33
3.2.1	Dreidimensionale geometrische Spaltentwicklung	35
3.2.2	Abschätzung der Imprägnierung in Injektionsboxen	36
3.3	Zielsetzung zur Untersuchung des Strömungsverhaltens in Injektionsboxen	37
4	EXPERIMENTELLE ANALYSE DES STRÖMUNGSFELDES IN EINER MODULAREN, TRANSPARENTEN INJEKTIONSBOX	39
4.1	Entwicklung eines Prüfstands zur experimentellen Untersuchung des Strömungsfeldes in Injektionsboxen	39
4.1.1	Anforderungsdefinition für den Prüfstand	40
4.1.2	Umsetzung des Prüfstands mit Integration in die existierende Pultrusionsanlage	41
4.2	Prozessparameterauswahl	45
4.3	Materialauswahl und -charakterisierung	46
4.3.1	Testfluide	46
4.3.2	Faserauswahl	49
4.3.3	Qualitative Untersuchung des Benetzungsverhaltens mittels Kontaktwinkelmessung	50
4.4	Versuchsdurchführung der Strömungsuntersuchungen mit der transparenten Injektionsbox	52
4.5	Versuchsauswertung	52

4.5.1	Bewertung der Imprägnierung.....	53
4.5.2	Auswertung der Abzugskraft.....	54
4.5.3	Bestimmung der Rückflusslänge anhand von Bildaufnahmen	55
5	GRUNDLEGENDE UNTERSUCHUNG DES STRÖMUNGSVERHALTENS IN INJEKTIONSBOXEN	61
5.1	Abzugskraft aufgrund von Trockenfaserreibung.....	61
5.2	Einfluss der dynamischen Beiträge zum Druckaufbau auf das Strömungsfeld.....	62
5.2.1	Einfluss der Viskosität auf die Abzugskraft	64
5.2.2	Einfluss der Benetzungsfähigkeit auf die Abzugskraft.....	66
5.2.3	Entwicklung der Rückflusslänge	67
5.2.4	Verweilzeitspektrum des Fluids in der Injektionsbox.....	69
5.3	Einfluss einer optimierten Faserführung auf das Strömungsfeld	70
5.4	Exemplarische Untersuchung von hohen Viskositäten und kleinen Öffnungswinkeln	73
5.4.1	Unvollständige Imprägnierung aufgrund zu hoher Viskosität	73
5.4.2	Unvollständige Imprägnierung aufgrund zu hoher Faserdichte.....	75
5.4.3	Strömungskonfigurationen in offenen Injektionsboxen mit unterschiedlichen Energieniveaus.....	77
5.5	Untersuchung des Beitrags des Kavitätsbereichs mit konstantem Profilquerschnitt zur Abzugskraft.....	78
5.6	Einfluss der Injektionspunktposition auf das Strömungsfeld in der Injektionsbox	82
5.7	Zwischenfazit	84
6	MODELLBASIERTE UNTERSUCHUNG DER ROVINGTRAJEKTORIEN IN DER INJEKTIONSBOX	86
6.1	Entwicklung einer geometrischen Beschreibung für die Verteilung von Rovings in Injektionsboxkavitäten	86
6.2	Untersuchung der mithilfe des geometrischen Modells berechneten Rovingpositionen	88
6.3	Geometrische Diskussion der Spaltentwicklung von Rovings.....	93
6.4	Zwischenfazit	95
7	EINFLUSS DER KAVITÄTSGEOMETRIE UND DES FASERMATERIALS AUF DAS STRÖMUNGSFELD IN DER INJEKTIONSBOX.....	96
7.1	Konstruktive Anpassungen für weitere Untersuchungen	96
7.1.1	Integration von Drucksensoren.....	96
7.1.2	Konstruktive Anpassung der Kavitätsgeometrie	97
7.1.3	Anpassungen der Faserführung für den Einsatz von Kohlenstofffasern.....	98
7.2	Einfluss der Kavitätsgeometrie auf das Strömungsfeld	98
7.2.1	Einfluss der Kavitätsgeometrie auf den Druckaufbau	101
7.2.2	Zusammenhang zwischen Druckaufbau und Abzugskraft.....	103
7.2.3	Einfluss der Kavitätsgeometrie auf die Rückflusslänge und die Harzverweilzeit	106
7.3	Einfluss des Fasermaterials auf das Strömungsfeld in der Injektionsbox.....	108
7.3.1	Vergleich des Druckaufbaus mit Kohlenstofffasern und Glasfasern	109
7.3.2	Skalierbarkeit des Viskositätseinflusses auf den Druckaufbau zu höheren Viskositäten	112
7.4	Bedeutung der Ergebnisse für die Modellierung des Druckaufbaus in der Injektionsbox.....	114

8	FAZIT UND AUSBLICK	115
9	ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY	117
9.1	Zusammenfassung.....	117
9.2	Summary.....	118
10	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	119
10.1	Abkürzungen	119
10.2	Formelzeichen.....	119
10.3	Indizes.....	120
11	LITERATUR.....	122
11.1	Quellenverzeichnis.....	122
11.2	Liste studentischer Arbeiten.....	132
12	ANHANG.....	134
12.1	Anforderungsliste für den Prüfstand.....	134
12.2	Matlab-Bildauswertungsalgorithmus	135
12.3	Implementierung des geometrischen Modells in R.....	141