

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	4
2.1	Imprägnierung der Verstärkungsfasern in einer Injektionsbox	4
2.1.1	Grundlagen	4
2.1.2	Modellierung der Fließvorgänge	6
2.1.2.1	Grundlegende Modellgleichungen	6
2.1.2.2	Modellierung von Permeabilität und Viskosität	7
2.1.2.3	Einfluss von Produktionsgeschwindigkeit und Injektionsboxgeometrie auf die Imprägnierung	9
2.1.2.4	Analytische Lösung für den eindimensionalen Fall	12
2.1.3	Experimentelle Untersuchungen	12
2.2	Formgebung und Aushärtung im Pultrusionswerkzeug	14
2.2.1	Grundlagen	14
2.2.2	Modellierung der Wärmetransport- und Aushärtvorgänge im Pultrusionswerkzeug	16
2.2.2.1	Grundlegende Modellgleichungen	16
2.2.2.2	Modellierung der Reaktionskinetik	19
2.2.2.3	Phasenübergänge während der Aushärtung	20
2.2.2.4	Modellierung und Simulation des Pultrusionsprozesses mit Polyurethan	21
2.2.3	Optimierung des Pultrusionsprozesses	23
2.2.3.1	Mathematische Optimierung und Lösungsstrategien	23
2.2.3.2	Approximation mithilfe von Machine-Learning-Modellen	25
2.2.3.3	Studien zur Prozessoptimierung	27
2.3	Entstehung und Überwindung der Abzugskräfte	30
2.3.1	Tribologische Grundlagen	30
2.3.2	Entstehung und Modellierung der Abzugskraft im Pultrusionsprozess	34
2.3.2.1	Komponenten der Abzugskraft und ihre Modellierung	35
2.3.2.2	Reibungszahl zwischen Pultrusionswerkzeug und Profil	37
2.3.2.3	Abhängigkeit der Abzugskraft von den Prozessparametern	39
2.3.2.4	Experimentelle Untersuchungen	40
3	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	42
3.1	Problemstellung und Forschungsfragen	42
3.2	Zielsetzung und Lösungsweg	43
4	VERWENDETE MATERIALIEN UND MODELLIERUNG IHRER EIGENSCHAFTEN	45
4.1	Verwendetes Polyurethan-System	45
4.1.1	Modellierung der Viskosität	45
4.1.2	Modellierung der Reaktionskinetik	46
4.1.3	Modellierung der Glasübergangstemperatur	50
4.2	Verwendete Fasern	51
5	EINFLUSS DER INJEKTIONSBOXGEOMETRIE AUF DEN INNENDRUCK UND DIE BAUTEILQUALITÄT	52
5.1	Verwendete Injektionsbox sowie Anlagen- und Werkzeugtechnik	52

5.2	Versuchsplan und Durchführung der Versuche.....	54
5.3	Einfluss von Öffnungswinkel und Pultrusionsgeschwindigkeit auf den Innendruck.....	61
5.4	Einfluss von Öffnungswinkel und Pultrusionsgeschwindigkeit auf die Bauteilqualität.....	67
5.4.1	Verwendete Methoden zur Beurteilung der Bauteilqualität	67
5.4.2	Ergebnisse.....	69
5.5	Zusammenfassung.....	77
6	SIMULATIONSGESTÜTZTE OPTIMIERUNG DER WERKZEUGTEMPERATUREN	79
6.1	Simulationsmodell und Validierung	79
6.2	Maximierung der Produktionsgeschwindigkeit unter Nebenbedingungen	90
6.2.1	Training von Machine-Learning-Modellen mit Simulationsdaten	91
6.2.2	Definition des Optimierungsproblems und der Nebenbedingungen	94
6.2.3	Implementierung der Optimierungsstrategien	97
6.3	Ergebnisse der Optimierung mit linearen ML-Modellen	100
6.4	Ergebnisse der Optimierung mit nicht-linearen ML-Modellen	104
6.5	Diskussion der optimalen Heizstrategie	107
6.6	Zusammenfassung.....	111
7	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG VON UMSATZABHÄNGIGEN REIBUNGSZAHLEN UND VERGLEICH VON WERKZEUGBESCHICHTUNGEN.....	113
7.1	Entwicklung eines Tribometers zur Bestimmung von umsatzabhängigen Reibungszahlen.....	113
7.1.1	Konzeptionierung und Messprinzip.....	113
7.1.2	Konstruktive Umsetzung und Dimensionierung.....	114
7.1.3	Sensorik und Messtechnik.....	117
7.1.4	Einrichtung und Messablauf.....	117
7.1.5	Exemplarische Messschriebe und abgeleitete Kenngrößen	118
7.1.6	Messsystemanalyse.....	123
7.2	Charakterisierung der beschichteten Prüfkörper	128
7.2.1	Übersicht der ausgewählten Beschichtungen.....	129
7.2.2	Chemische Zusammensetzung.....	130
7.2.3	Oberflächenbeschaffenheit	131
7.2.4	Kontaktwinkel zu flüssigem PUR	133
7.2.5	Rundheit der Kreisscheiben.....	134
7.3	Ergebnisse der Tribometermessungen	135
7.4	Zusammenfassung.....	139
8	ZUSAMMENFÜHRUNG DER TEILERGEBNISSE UND GANZHEITLICHE BETRACHTUNG .	142
9	FAZIT UND AUSBLICK	143
9.1	Fazit	143
9.2	Ausblick.....	145
10	ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY	147
10.1	Zusammenfassung.....	147
10.2	Summary.....	148

11	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	149
11.1	Abkürzungen	149
11.2	Formelzeichen.....	150
11.3	Indizes.....	152
12	LITERATUR.....	154
13	ANHANG.....	173
13.1	Anhang zu Kapitel 5 (Imprägnierung).....	173
13.1.1	Vergleich von Soll- und Ist-Temperaturen bei den Pultrusionsversuchen mit der variablen Injektionsbox	173
13.1.2	Beurteilung der Prozessstabilität bei den Pultrusionsversuchen mit der variablen Injektionsbox ..	175
13.1.3	Entnahmepositionen für die Prüfungen der hergestellten Muster mit der variablen Injektionsbox	177
13.1.4	Mikroskopieaufnahmen der hergestellten Muster mit der variablen Injektionsbox.....	177
13.1.5	Mechanische Eigenschaften der hergestellten Muster mit der variablen Injektionsbox	180
13.1.6	Vorgegebene Kennwerte der DIN EN 13706	183
13.2	Anhang zu Kapitel 6 (Aushärtung).....	183
13.2.1	Validierung des Simulationsmodells mittels Vergleich von Temperaturmessungen.....	183
13.3	Anhang zu Kapitel 7 (Überwindung der Abzugskraft).....	188
13.3.1	Bemaßte Skizze des entwickelten Tribometers	188
13.3.2	p-Werte des Student'schen t-Test für den paarweisen Vergleich von Beschichtungen	188