

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>4</b>
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 Aushärtevorgänge 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
<b>3</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>42</b>
3.1	Problemstellung und Forschungsfragen .....	42
3.2	Zielsetzung und Lösungsweg .....	43
<b>4</b>	<b>VERWENDETE MATERIALIEN UND MODELLIERUNG IHRER EIGENSCHAFTEN .....</b>	<b>45</b>
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
<b>5</b>	<b>EINFLUSS DER INJEKTIONSBOXGEOMETRIE AUF DEN INNENDRUCK UND DIE BAUTEILQUALITÄT .....</b>	<b>52</b>
5.1	Verwendete Injektionsbox sowie Anlagen- und Werkzeugtechnik .....	52

---

<b>5.2</b>	<b>Versuchsplan und Durchführung der Versuche.....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Einfluss von Öffnungswinkel und Pultrusionsgeschwindigkeit auf den Innendruck.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4</b>	<b>Einfluss von Öffnungswinkel und Pultrusionsgeschwindigkeit auf die Bauteilqualität.....</b>	<b>67</b>
5.4.1	Verwendete Methoden zur Beurteilung der Bauteilqualität .....	67
5.4.2	Ergebnisse.....	69
<b>5.5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>SIMULATIONSGESTÜTZTE OPTIMIERUNG DER WERKZEUGTEMPERATUREN .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Simulationsmodell und Validierung .....</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>Maximierung der Produktionsgeschwindigkeit unter Nebenbedingungen .....</b>	<b>90</b>
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
<b>6.3</b>	<b>Ergebnisse der Optimierung mit linearen ML-Modellen .....</b>	<b>100</b>
<b>6.4</b>	<b>Ergebnisse der Optimierung mit nicht-linearen ML-Modellen .....</b>	<b>104</b>
<b>6.5</b>	<b>Diskussion der optimalen Heizstrategie .....</b>	<b>107</b>
<b>6.6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTELLE ERMITTlung VON UMSATZABHÄNGIGEN REIBUNGSZAHLEN UND VERGLEICH VON WERKZEUGBESCHICHTUNGEN.....</b>	<b>113</b>
<b>7.1</b>	<b>Entwicklung eines Tribometers zur Bestimmung von umsatzzabhängigen Reibungszahlen.....</b>	<b>113</b>
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 Messschritte und abgeleitete Kenngrößen .....	118
7.1.6	Messsystemanalyse .....	123
<b>7.2</b>	<b>Charakterisierung der beschichteten Prüfkörper .....</b>	<b>128</b>
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
<b>7.3</b>	<b>Ergebnisse der Tribometermessungen .....</b>	<b>135</b>
<b>7.4</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFÜHRUNG DER TEILERGEBNISSE UND GANZHEITLICHE BETRACHTUNG .</b>	<b>142</b>
<b>9</b>	<b>FAZIT UND AUSBlick .....</b>	<b>143</b>
<b>9.1</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>143</b>
<b>9.2</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY .....</b>	<b>147</b>
<b>10.1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>147</b>
<b>10.2</b>	<b>Summary.....</b>	<b>148</b>

<b>11 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....</b>	<b>149</b>
<b>11.1 Abkürzungen .....</b>	<b>149</b>
<b>11.2 Formelzeichen.....</b>	<b>150</b>
<b>11.3 Indizes.....</b>	<b>152</b>
<b>12 LITERATUR.....</b>	<b>154</b>
<b>13 ANHANG.....</b>	<b>173</b>
<b>13.1 Anhang zu Kapitel 5 (Imprägnierung).....</b>	<b>173</b>
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
<b>13.2 Anhang zu Kapitel 6 (Aushärtung).....</b>	<b>183</b>
13.2.1 Validierung des Simulationsmodells mittels Vergleich von Temperaturmessungen.....	183
<b>13.3 Anhang zu Kapitel 7 (Überwindung der Abzugskraft).....</b>	<b>188</b>
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