

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXI</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XXV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XXIX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Hybride Verbunde . . . . .	5
2.1.1 Definition und Einordnung . . . . .	5
2.1.2 Vorbehandlungsverfahren . . . . .	12
2.1.3 Herstellungsverfahren . . . . .	17
2.1.3.1 Diskontinuierliche Herstellungsverfahren	17
2.1.3.2 Kontinuierliche Herstellungsverfahren .	18
2.1.4 Prüfverfahren . . . . .	20
2.1.4.1 Kennwertermittlung für metallische Blech- werkstoffe . . . . .	21
2.1.4.2 Kennwertermittlung für Kunststoffe . . .	29
2.1.4.3 Kennwertermittlung für hybride Laminate	36
2.1.5 Umformverfahren . . . . .	52
2.1.6 Simulationsmethoden . . . . .	55
2.2 Funktionsintegration . . . . .	61
2.2.1 Funktionsintegration in Blechwerkstoffe . . .	63
2.2.2 Funktionsintegration in Kunststoffe . . . . .	64
<b>3 Motivation und Zielstellung</b>	<b>67</b>
<b>4 Konzipierung der Versuchsanlagen und Versuchsplanung</b>	<b>71</b>
4.1 Werkstoffe . . . . .	72
4.2 Externe Zuarbeiten . . . . .	74

4.3 Fertigungsverfahren . . . . .	75
4.3.1 Fügen . . . . .	76
4.3.1.1 Oberflächenbehandlung . . . . .	76
4.3.1.2 Diskontinuierliches Fügen . . . . .	78
4.3.1.3 Kontinuierliches Fügen . . . . .	80
4.3.2 Umformen . . . . .	84
4.4 Prüfverfahren . . . . .	87
4.4.1 Kennwertermittlung für metallische Blechwerkstoffe . . . . .	88
4.4.1.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	88
4.4.1.2 Technologische Prüfverfahren . . . . .	88
4.4.2 Kennwertermittlung für Kunststoffe . . . . .	93
4.4.2.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	93
4.4.2.2 Physikalische Prüfverfahren . . . . .	94
4.4.3 Kennwertermittlung für hybride Laminate . . . . .	94
4.4.3.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	94
4.4.3.2 Technologische Prüfverfahren . . . . .	97
4.5 Simulation . . . . .	103
4.5.1 Elementtypen . . . . .	105
4.5.2 Materialeigenschaften . . . . .	105
4.5.3 Kontaktmodellierung/ Grenzfläche . . . . .	106
4.5.4 Solver . . . . .	110
<b>5 Prozesskette zur Herstellung ebener sensorischer hybrider Laminate</b>	<b>111</b>
5.1 Oberflächenbehandlung . . . . .	111
5.2 Diskontinuierliches Fügen . . . . .	112
5.3 Auswahl der Zusammensetzung des sensorischen Verbundes und Weiterverarbeitung zur Folie . . . . .	114
5.3.1 Elektrische Eigenschaften des sensorischen Verbundes . . . . .	114
5.3.2 Rheologische Eigenschaften des sensorischen Verbundes . . . . .	115
5.3.3 Schlussfolgerungen für die Herstellung einer sensorischen Folie . . . . .	116
5.4 Kontinuierliches Fügen . . . . .	117
5.4.1 Kontinuierliches Fügen mithilfe eines Laborwalzwerkes . . . . .	117
5.4.2 Kontinuierliches Fügen mithilfe einer angepassten Walzprofilieranlage . . . . .	121

<b>6 Ermittlung relevanter Kennwerte</b>	<b>125</b>
6.1 Kennwertermittlung für metallische Blechwerkstoffe . . . . .	125
6.1.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	125
6.1.1.1 Zugversuch (Flachzugversuch) . . . . .	125
6.1.2 Technologische Prüfverfahren . . . . .	127
6.1.2.1 Biegeprüfverfahren . . . . .	127
6.1.2.2 Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift . .	128
6.1.2.3 Grenzformänderungsdiagramm . . . . .	132
6.2 Kennwertermittlung für Kunststoffe . . . . .	134
6.2.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	134
6.2.1.1 Zugversuch . . . . .	134
6.2.2 Physikalische Prüfverfahren . . . . .	135
6.2.2.1 Dynamische Differenzkalorimetrie -DSC .	135
6.3 Kennwertermittlung für hybride Laminate . . . . .	136
6.3.1 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	136
6.3.1.1 Kopfzugversuch . . . . .	136
6.3.1.2 Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)) . . . . .	137
6.3.1.3 Zug-Scher-Prüfung . . . . .	140
6.3.2 Technologische Prüfverfahren . . . . .	141
6.3.2.1 Biegeprüfverfahren . . . . .	141
6.3.2.2 Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift .	143
6.3.2.3 Grenzformänderungsdiagramm kombiniert mit Lockin-Thermographie . . . . .	144
6.3.2.4 Modifizierte Bestimmung der Reibeigenschaften nach DIN EN ISO 8295 . . . . .	148
<b>7 Umformen von sensorischen Verbunden</b>	<b>153</b>
7.1 Prozessauslegung . . . . .	153
7.1.1 Zuschnittsermittlung . . . . .	154
7.1.2 Zeit-Temperatur-Regime . . . . .	155
7.1.3 Formänderungsanalyse . . . . .	156
7.2 Parametervariation . . . . .	157
7.3 Prozessstabilität . . . . .	159
<b>8 Umformsimulation sensorischer hybrider Verbunde</b>	<b>161</b>
8.1 Validierung der Kennwertermittlung . . . . .	161
8.1.1 Modellierung der monolithischen Werkstoffeigenschaften . . . . .	161

8.1.2	Modellierung der Verbundeigenschaften mittels mechanischer Prüfverfahren . . . . .	163
8.1.2.1	Validierung des Kopfzugversuches . . . . .	163
8.1.2.2	Validierung der Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS) . . . . .	165
8.1.2.3	Validierung der Zug-Scher-Prüfung . . . . .	166
8.1.3	Modellierung der Verbundeigenschaften mittels technologischer Prüfverfahren . . . . .	168
8.1.3.1	Validierung des V-Biegeprüfverfahrens . . . . .	168
8.1.3.2	Validierung der Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift . . . . .	173
8.1.3.3	Validierung der Bestimmung der Grenzformänderungskurve im Marciniak-Versuch . . . . .	180
8.2	Umformsimulation des sensorischen Funktionsdemostrators	181
<b>9</b>	<b>Bestimmung der sensorischen Eigenschaften der umgeformten Verbunde</b>	<b>191</b>
9.1	Anwendung des sensorischen hybriden Laminats für haptisches Eingabegerät mit integrierter Signalverarbeitung . . . . .	191
9.1.1	Bestimmung der Signalcharakteristika und der Polarisierungseigenschaften des sensorischen hybriden Laminats . . . . .	191
9.1.2	Signalverarbeitung durch maschinelles Lernen auf einem eingebetteten System . . . . .	196
9.2	Anwendung des sensorischen hybriden Laminats für die strukturelle Zustandsüberwachung von dynamisch belasteten Systemen . . . . .	199
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>205</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>211</b>
<b>Anhang</b>		<b>231</b>