

Dipl.-Ing. Daniel Paßmann

**Prozessinduzierte Gradierung  
eigenverstärkter Polypropylen-Faserverbunde  
beim Heißkompaktieren und Umformen**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN EIGENVERSTÄRKTER THERMOPLASTVERBUNDE</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Das Prinzip der Eigenverstärkung</b> .....	<b>4</b>
2.1.1 Struktur und Eigenschaften von Polypropylen.....	4
2.1.2 Bedeutung der Schmelze- und Festphasendeformation .....	9
2.1.3 Verarbeitungsprozesse zur Erzeugung der Eigenverstärkung .....	14
2.1.4 Potenziale und Grenzen .....	18
<b>2.2 Eigenverstärkte Faser- und Bändchenverbunde</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Herstellung von Chemiefasern .....	21
2.2.2 Eigenschaften von Verstärkungsfasern und -textilien aus PP .....	26
2.2.3 Faserverbunde aus eigenverstärktem Polypropylen .....	36
2.2.4 Einsatzgebiete für eigenverstärkte Organobleche .....	43
<b>2.3 Thermoformen eigenverstärkter Faserverbunde</b> .....	<b>46</b>
2.3.1 Fertigungssystematik .....	46
2.3.2 Prozess der Heißkompaktierung .....	48
2.3.3 Prozess der Umformung .....	51
<b>3 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</b> .....	<b>58</b>
<b>3.1 Prozessinduzierte funktionale Gradierung</b> .....	<b>58</b>
<b>3.2 Funktionsintegration am Beispiel einer gradierten Türinnenverkleidung</b> .....	<b>59</b>
<b>3.3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b> .....	<b>61</b>
<b>4 ENTWICKLUNG EINER GEEIGNETEN VERFAHRENSTECHNOLOGIE</b> .....	<b>63</b>
<b>4.1 Thermo-mechanische Erzeugung von Eigenschaftsgradienten</b> .....	<b>63</b>
4.1.1 Thermische Gradierung beim Vorheizen .....	63
4.1.2 Mechanische Gradierung beim Heißkompaktieren .....	67
4.1.3 Thermische und mechanische Gradierung beim Umformen .....	70
4.1.4 Thermo-mechanische Kopplung.....	72
<b>4.2 Pressensystem und Voruntersuchungen</b> .....	<b>72</b>
4.2.1 Maschinenrahmen und Hydraulik .....	74
4.2.2 Heiz-/Kühlsystem .....	76
4.2.3 Infrarotvorheizstation mit automatischem Materialtransport .....	78
4.2.4 Sensorik und Steuerung .....	82
<b>4.3 Identifikation der relevanten Verarbeitungsparameter</b> .....	<b>85</b>
4.3.1 Versuche zu Bestimmung der Verfahrensgrenzen .....	85
4.3.2 Heißkompaktierung flächig gradiertter eigenverstärkter Faserverbunde .....	86
4.3.3 Prozessoptimierung durch statistische Versuchsplanung .....	88
<b>5 WERKSTOFFE UND PRÜFMETHODEN</b> .....	<b>93</b>
<b>5.1 Basiseigenschaften der verwendeten PP-Textilhalbzeuge</b> .....	<b>93</b>
<b>5.2 Laminatkonfiguration</b> .....	<b>95</b>
<b>5.3 Prüfkörpersystematik und -präparation</b> .....	<b>96</b>

<b>5.4 Thermoanalytische Untersuchungen</b> .....	<b>97</b>
<b>5.5 Makroskopische quasistatische Charakterisierung</b> .....	<b>99</b>
<b>5.6 Dynamische Charakterisierung durch instrumentierten Fallbolzenversuch</b> .....	<b>101</b>
<b>6 PROZESS-EIGENSCHAFTS-WECHSELWIRKUNG</b> .....	<b>103</b>
<b>6.1 Thermo-mechanische Eigenschaften der Textilhalbzeuge</b> .....	<b>103</b>
6.1.1 Verhalten beim Aufschmelzen und Abkühlen .....	103
6.1.2 Rückstellverhalten der Bändchen .....	109
6.1.3 Grenzen zur Schrumpfvermeidung .....	115
<b>6.2 Quasistatisch-mechanische Eigenschaften homogener Faserverbunde</b> .....	<b>118</b>
6.2.1 Ergebnisse der Zugversuche .....	119
6.2.2 Nachweis der Prozesssicherheit und Verbundhomogenität .....	122
6.2.3 Grundständige Prozessbewertung .....	124
<b>6.3 Dynamisches Impaktverhalten gradierter Faserverbunde</b> .....	<b>126</b>
6.3.1 Grundständige Impakteigenschaften .....	126
6.3.2 Einfluss der IR-Maskierung auf die Materialtemperatur .....	129
6.3.3 Durchgängige Identifikation der Prozess-Gradierungs-Zusammenhänge .....	134
6.3.4 Abschließende Bewertung des Gradierungspotenzials .....	140
<b>7 UMFORMWERKZEUG ZUR THERMO-MECHANISCHEN GRADIERUNG</b> .....	<b>142</b>
<b>7.1 Werkzeuganforderungen für eine erfolgreiche Gradierung</b> .....	<b>142</b>
<b>7.2 Entwicklung eines modularen Formwerkzeugkonzepts</b> .....	<b>142</b>
7.2.1 Geometrische Auslegung .....	142
7.2.2 Thermische Auslegung .....	146
7.2.3 Simulation des differentiellen Aufheizens .....	149
7.2.4 Umsetzung und Erprobung des Werkzeugs .....	152
7.2.5 Nachweis der Gradierung im umgeformten Bauteil .....	155
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>159</b>
<b>9 LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>162</b>