

Dipl.-Ing. Frank Hauptert, Stelzenberg

**Thermoplast-Wickeltechnik:
Einfluß der Verarbeitungs-
technologie auf Struktur
und Eigenschaften
kontinuierlich
faserverstärkter
Verbundwerkstoffe**

Reihe **2**: Fertigungstechnik

Nr. **435**

INHALTSVERZEICHNIS	V
Formelzeichen und Abkürzungen	IX
Abstract	XII
1. Einleitung	1
2. Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix	3
2.1 Eigenschaften faserverstärkter Thermoplaste	3
2.2 Fertigungsverfahren für kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	5
2.2.1 Thermoformen und Pressen	5
2.2.2 Rollformen	7
2.2.3 Pultrusion	7
2.2.4 Autoklavkonsolidierung	8
2.2.5 Diaphragmaverfahren	9
2.3 Thermoplast-Wickeltechnik	10
2.3.1 Wickeltechnische Verarbeitung von Verbundwerkstoffen	10
2.3.2 Anlagenstruktur einer Thermoplast-Wickelanlage	12
2.3.3 Halbzeuge für die Thermoplast-Wickeltechnik	14
2.3.4 Aufheizmethoden	15
2.4 Polymere Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendungen	17
2.4.1 Reibungs- und Verschleißverhalten thermoplastischer Verbundwerkstoffe	17
2.4.2 Polymere Verbundwerkstoff-Gleitlager	21
3. Ziele der Arbeit	24
4. Verarbeitete Fadenhalbzeuge	26
4.1 Der pulverimprägnierte Faden	26
4.2 Das Mischgarn	31
5. Aufbau der Thermoplast-Wickelanlage und Beschreibung der Wickelprozesse	32
5.1 Der In-Situ-Wickelprozeß	34

5.1.1	Konsolidierung mittels Andruckrolle	35
5.1.2	Konsolidierung mittels Andruckschuh	36
5.2	Der Thermokammerprozeß	37
5.2.1	Konsolidierung mittels Andruckrolle	38
5.2.2	Konsolidierung mittels Andruckschuh	39
6.	Prüfverfahren zur Ermittlung der Verbundwerkstoff-Qualität	40
6.1	Der interlaminare Schertest	43
6.2	Bestimmung des Biegeelastizitätsmoduls	46
6.2.1	Schwingungsversuch und Eigenfrequenzanalyse	46
6.2.2	Ringbiegeversuch	50
6.3	Dichtebestimmung	57
6.4	Ermittlung der Ringeigenspannungen	58
7.	Wickelprogramm und Ergebnisse	60
7.1	Der In-Situ-Wickelprozeß mit Andruckrolle	60
7.1.1	Wicklungen ohne Halbzeugvorwärmkammer (GF-PBT-1200 tex)	60
7.1.1.1	Variation der Wickelgeschwindigkeit (GF-PBT-1200 tex)	61
7.1.1.2	Variation der Vorheizstreckentemperatur (GF-PBT-1200 tex)	64
7.1.1.3	Variation der Walzentemperatur (GF-PBT-1200 tex)	66
7.1.1.4	Variation der Vorheizstrecken- und Walzentemperatur (GF-PBT-320 tex)	68
7.1.2	Wicklungen mit Halbzeugvorwärmkammer	74
7.1.2.1	Variation der Vorwärmkammertemperatur (GF-PBT-1200 tex, GF-PET-1200 tex)	74
7.1.2.2	Variation der Wickelgeschwindigkeit (GF-PBT-1200 tex, GF-PET-1200 tex)	78
7.1.2.3	Variation der Wickelgeschwindigkeit (GF-PBT-2400 tex)	82
7.1.2.4	Variation der Vorwärmkammertemperatur (GF-PBT-2400 tex)	85
7.1.2.5	Variation der Vorwärmkammertemperatur (GF-PBT-320 tex)	88
7.2	Der In-Situ-Wickelprozeß: Konsolidierung mit beheiztem Gleitschuh	92

7.2.1	Einfluß von Konsolidierungskraft und Gleitschuhtemperatur (GF-PBT-1200 tex)	92
7.2.2	Einfluß von gekoppelter Walzen- und Gleitschuhtemperatur (GF-PBT-1200 tex)	95
7.3	Thermokammer-Wickelverfahren: Konsolidierung mit Andruckrolle	98
7.3.1	Einfluß der Wickelkammer- und Vorwärmkammertemperatur (GF-PBT-1200 tex)	98
7.3.2	Einfluß der Wickelgeschwindigkeit und Wickelkammertemperatur (GF-PBT-1200 tex)	101
7.3.3	Einfluß der Wickelgeschwindigkeit und Vorwärmkammer- temperatur (GF-PBT-2400 tex)	104
7.4	Thermokammer-Wickelverfahren: Konsolidierung mit Gleitschuh	107
7.4.1	Einfluß der Wickelgeschwindigkeit und der Vorwärmkammer- temperatur (GF-PBT-2400 tex)	107
7.4.2	Einfluß der Konsolidierungskraft und der Wickelgeschwindigkeit (GF-PBT-2400 tex)	109
8.	Diskussion der Ergebnisse und theoretische Betrachtungen zu den Thermoplast-Wickelverfahren	113
8.1	Diskussion der Ergebnisse der Verarbeitungsversuche	113
8.1.1	Definition einer Qualitätskennzahl	114
8.1.2	Der In-Situ-Wickelprozess mit Andruckrolle	115
8.1.2.1	Wicklungen ohne Vorwärmkammer	115
8.1.2.2	Wicklungen mit Halbzeugvorwärmkammer	118
8.1.2.3	In-Situ-Prozeß mit Andruckrolle: Festlegung der optimalen Verarbeitungsfenster	121
8.1.3	Der In-Situ-Wickelprozess mit Gleitschuh	122
8.1.4	Der Thermokammerprozess mit Andruckrolle	124
8.1.5	Der Thermokammerprozess mit Gleitschuh	126
8.2	Modellierung des Thermoplast-Wickelprozesses	127
8.2.1	Modellierung der Fadenhalbzeugaufheizung	128
8.2.1.1	Strömungsmechanische Modellierung der Anlagenstruktur	128
8.2.1.2	Thermodynamische Modellierung des Wärmeübergangs	130

8.2.1.3	Berechnung der Fadentemperaturen als Funktion der Prozeßparameter	137
8.2.2	Modellierung der Imprägnierung beim Thermoplast-Wickeln	141
8.2.2.1	Grundlagen der Imprägnierung	141
8.2.2.2	Betrachtungen zur Viskosität von Thermoplastschmelzen	142
8.2.2.3	Konsolidierung durch die Fadenspannung: Berechnung der Imprägnierdauer bei wegabhängigem Druck	145
8.2.2.4	Berechnung der Faserimprägnierung für verschiedene Fadenkräfte	150
8.2.2.5	Imprägnierung der Fasern durch die Fadenkraft in Abhängigkeit der Verarbeitungsgeschwindigkeit	151
8.2.2.6	Konsolidierung durch Andruckrolle oder Gleitschuh: Berechnung der Imprägnierdauer bei konstantem Druck	153
8.2.2.7	Berechnete Imprägnierung durch Andruckrolle und Gleitschuh	154
8.2.3	Vergleich von berechneten Imprägniergraden und Verarbeitungsversuchen	156
8.2.4	Einfluß der Halbzeugdicke und der -geometrie auf das Imprägnierverhalten und die erreichbaren Wickelgeschwindigkeiten	158
9.	Thermoplastisch gewickeltes Verbundwerkstoffgleitlager	160
9.1	Halbzeuge für die Gleitlagerfertigung	161
9.2	Verarbeitungstechnik: Thermoplast-Wickelparameter	161
9.3	Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen	162
10.	Zusammenfassung	165
11.	Literaturverzeichnis	171