

Alexander Kermer-Meyer

Formhaltige und komplexe Laminatstrukturen in Thermoplast-Tapelegeverfahren



Formhaltige und komplexe Laminatstrukturen in Thermoplast-Tapelegeverfahren

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Alexander Kermer-Meyer

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Tag der mündlichen Prüfung: 13. August 2015

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Alexander Kermer-Meyer

Formhaltige und komplexe Laminatstrukturen in
Thermoplast-Tapelegeverfahren

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 34/2015



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alexander Kermer-Meyer:

Formhaltige und komplexe Laminatestrukturen in Thermoplast-Tapelegeverfahren

1. Auflage, 2015

Apprimus Verlag, Aachen, 2015

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-369-8

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Vorwort:

Die vorliegende Dissertation entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher gilt mein Dank für die wissenschaftliche Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die eingeräumte inhaltliche Freiheit bei der Erstellung dieser Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann möchte ich für die Übernahme des Koreferats danken. Bedanken möchte ich mich zudem bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Loosen für den Vorsitz der Prüfungskommission sowie bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes.

Danken möchte ich meinen ehemaligen Vorgesetzten Herrn Dr.-Ing. Michael Emonts und Herrn Dr.-Ing. Christian Wenzel für die umfangreichen gestalterischen Freiräume und das weitreichende Vertrauen bei der Leitung und Durchführung vielfältiger und spannender Industrie- und Forschungsprojekte. Durch diese konnte ich wichtige Erfahrungen sammeln, von denen ich bis heute profitiere.

Ein großes Dankeschön gilt meinen ehemaligen Kollegen am Fraunhofer IPT, die mich auf vielfältige Weise fachlich und persönlich unterstützt sowie inspiriert haben. Hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Martin Steyer und Herrn Dr.-Ing. Chris-Jörg Rosen für ihre geleistete Vorarbeit sowie Frau Dr. rer. nat. Bettina Fischer und den Herren Myron Graw, Jan-Patrick Hermani und Clemens Buschhoff für die Durchsicht meines Manuskriptes sowie für die wertvollen Hinweise und Anregungen.

Ich bedanke mich zudem bei meinen Diplom-, Master-, Bachelor-, Studien- und Projektarbeitern sowie wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich mit großem Engagement und sehr guten Leistungen tatkräftig unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Sebastian Hertle, Edgar Kleinert, Stephan Lomnitz und Christian Segeth. Bedanken möchte ich mich weiter bei Herrn Lutz Beegen für seine hervorragenden Konstruktionsleistungen, die eine wichtige technische Grundlage für einige der nachfolgenden Untersuchungen waren.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Steffi und Kai Meyer. Sie haben mich in allen Lebenslagen stets unterstützt und meinen Lebensweg auf vielfältige Weise erst möglich gemacht. Für eine wunderbare Kindheit, meine freien Entfaltungsmöglichkeiten, das Aufwachsen in einem liebevollen, kreativen und stets gut dekorierten Umfeld sowie die Vermittlung und Mitgabe von Können, Willen und Inspiration möchte ich mich herzlichst bedanken.

Mit ganzem Herzen möchte ich meiner Ehefrau Ann-Kathrin danken, die durch ihr unermüdetes Verständnis, ihre liebevolle Unterstützung, ihren unnachahmlichen Frohsinn und durch die kontinuierliche Wahrung lebenserhaltender Maßnahmen wie Freude, Freizeit, Ruhe und sehr gutem Essen einen wichtigen Anteil an der Erstellung dieser Arbeit hat.

Nicht unerwähnt lassen möchte ich meinen Kater Paschi, der mir bei fast jeder Seite wichtige Gesellschaft geleistet hat und nur wenige Seiten unkommentiert ließ.

Aachen, im August 2015

Alexander Kermer-Meyer

Für meinen Großvater Horst Müller

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	3
2.1	Faserverbundkunststoffe	3
2.1.1	Faserverstärkungen	4
2.1.2	Matrixsysteme	5
2.1.3	Prepregs	10
2.1.4	Thermisch unterstützte Ablage von endlosfaserverstärkten Prepregs	11
2.2	Anwendungsfelder von Faserverbundkunststoffen	20
2.2.1	Einsatz von kohlefaserverstärkten Kunststoffen in der Luftfahrt	20
2.2.2	Thermoplastische Faserverbundkunststoffe in der Luftfahrt	24
2.3	Laminatverzug bei Thermoplast-Tapelegeverfahren	27
2.4	Herstellung komplexer Laminatstrukturen	30
2.4.1	Laterale Kurvenablage mit thermoplastischen UD-Prepregs	32
2.4.2	Laterale Kurvenablage mit duroplastischen UD-Prepregs	34
2.4.3	Potenzialanalyse	35
2.5	Zusammenfassende Erkenntnisse aus dem Stand der Technik	37
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	41
3.1	Wissenschaftliche Fragestellungen	42
3.2	Vorgehensweise	44
4	Strategien zur Realisierung formhaltiger Lamine	45
4.1	Wechselwirkungen beim Thermoplast-Tapelegen	45
4.1.1	Wirkung von Einflussfaktoren auf die Zielgrößen der Laminatqualität	46
4.1.2	Prozessfenster zur Erzielung hoher Laminatqualitäten	50
4.2	Modellierung der Laminatkrümmung	54
4.2.1	Thermische Modellierung	56
4.2.2	Beeinflussung der spannungsfreien Temperaturen und Kristallisation	62
4.2.3	Bestimmung der Schwindung und Temperaturdehnung	63
4.2.4	Induzierte Spannungen und resultierende Verformung	64
4.2.5	Modellansatz zur Relaxation und Retardation während des Tapelegens	67

4.3	Versuchsaufbau	73
4.3.1	Versuchsdurchführung	74
4.3.2	Versuchsauswertungen	75
4.4	Verifikation der Prozessmodelle	77
4.4.1	Einfluss der Werkzeugtemperierung auf die Laminatverformung	77
4.4.2	Einfluss der Laminatkühlung auf die Laminatverformung	82
4.4.3	Einfluss der Laminatfixierung auf die Laminatverformung	86
4.5	Analyse der Wechselwirkungen	89
4.5.1	Wechselwirkung der Maßnahmen auf die Laminatfestigkeit	89
4.5.2	Wechselwirkung der Maßnahmen auf die Kristallinität des Laminates	92
4.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse	95
5	Thermo-mechanische Vorkonditionierung thermoplastischer Tapes	97
5.1	Ansatz	98
5.2	Modellbildungen zur thermo-mechanischen Vorkonditionierung	99
5.2.1	Thermische Zusammenhänge	99
5.2.2	Tribotechnische Zusammenhänge	101
5.2.3	Geometrische Zusammenhänge	104
5.2.4	Dynamische Zusammenhänge	110
5.2.5	Mechanische Zusammenhänge	112
5.3	Prüfstände	113
5.3.1	Prüfstand zur reinen Verdrillung geschmolzener Tapes	113
5.3.2	Prüfstand zum Führen geschmolzener Tapes	114
5.3.3	Prüfstand zur kontinuierlichen Verdrillung geschmolzener Tapes	115
5.4	Validierung des Ansatzes zur Tapevorkonditionierung	116
5.4.1	Verdrillung geschmolzener Tapes	116
5.4.2	Führung geschmolzener Tapes	118
5.4.3	Kontinuierliche Verdrillung geschmolzener Tapes	121
5.5	Kombination Vorkonditionierung und Tapeablage	126
5.6	Zusammenfassende Erkenntnisse	128
6	Zusammenfassung und Ausblick	131
7	Literaturverzeichnis	139

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Großbuchstaben

A	[J·s/g]	Kennwert für die Verfügung stehende Energie und Zeit zur Umlagerung der Molekülketten
B	[mm]	Tapebreite
C ₁	[-]	Werkstoffkonstante
C ₂	[-]	Werkstoffkonstante
D _b	[%]	Grad der Verbindungsfestigkeit
D _h	[%]	Autohäsionsgrad
D _h (t)	[%]	zeitabhängiger Autohäsionsgrad
D _{ic}	[%]	Lagenkontaktanteil
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
E(t)	[N/mm ²]	zeitabhängiges Elastizitätsmodul
E _F	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Faser
E _M	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Matrix
E _V	[N/mm ²]	Steifigkeit einer Feder des Maxwell-Modells
E ₀	[N/mm ²]	Steifigkeit nach Relaxationsvorgang
E _⊥	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung
F	[N]	Kraft
F _{ab}	[N]	Abzugskraft
F _{an}	[N]	Anpresskraft
F _{max}	[N]	Bruchkraft

F_N	[N]	Normalkraft
F_R	[N]	Reibkraft
$F_{\ddot{U}}$	[mm]	Faserüberschuss
$F_{\text{vol}\%}$	[%]	Faservolumenprozent
F_{vor}	[N]	Federvorspannkraft
G	[m ³ /s]	Wachstumsrate
G	[N/mm ²]	Schubmodul
G_{eff}	[N/mm ²]	Experimentell ermitteltes effektives Schubmodul des Tapes bei der Verdrillung
H_U	[J/m ³]	Kristallisationswärme
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
L	[mm]	Tapelänge
L_A	[mm]	Abstand Auflager
L_S	[mm]	Abstand zwischen zwei Stützstellen
L_a	[mm]	Bogenlänge außen
L_i	[mm]	Bogenlänge innen
M	[N·m]	Moment
N_0	[1/m ³]	Anzahl der Keime pro Volumeneinheit
\dot{Q}_{ab}	[W]	abgeführter Wärmestrom
\dot{Q}_{zu}	[W]	zugeführter Wärmestrom
R	[mm]	Radius
R_a	[mm]	Außenradius
R_i	[mm]	Innenradius

R_m	[mm]	mittlerer Radius
T	[°C]	Temperatur
T_G	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_K	[°C]	Kristallisationstemperatur
$T_{\text{Kühlsystem}}$	[°C]	Kühlsystemtemperatur
T_{neu}	[°C]	sich nach Abkühlen einstellende Temperatur
T_M	[°C]	(Kristallit-)Schmelztemperatur
T_P	[°C]	Prozess-/Verarbeitungstemperatur
T_R	[°C]	Raum-/Umgebungstemperatur
T_{ref}	[°C]	Referenztemperatur
T_{Roller}	[°C]	Konsolidierungsrollentemperatur
T_{Stress}	[°C]	spannungsfreie Temperatur
T_{Wkz}	[°C]	Werkzeugtemperatur
T_Z	[°C]	Zersetzungstemperatur
T_0	[°C]	Referenztemperatur

Lateinische Kleinbuchstaben

a	[-]	oberflächenbeschreibender Parameter
a_T	[-]	Zeitverschiebungsfaktor
b	[-]	oberflächenbeschreibender Parameter
b	[mm]	Breite
b_b	[mm]	Laserbrennfleckbreite

b_{neu}	[mm]	Breite des entkoppelten, neu gelegten Tapes nach Abkühlen
b_p	[mm]	Probenbreite
b_x	[mm]	Tapebreitenposition
b_0	[mm]	Ausgangsbreite des Laminates
c	[N/mm]	Federkonstante
c_p	[J/K]	spezifische Wärmekapazität
d	[mm]	Tapedicke
d	[-]	Verlustfaktor
d_0	[mm]	Auslenkung Dämpfer ohne Einspannung
d_1	[mm]	Auslenkung Dämpfer vor Relaxation bei Einspannung
d_2	[mm]	Auslenkung Dämpfer nach Relaxation bei Einspannung
h	[mm]	Höhe
h_p	[mm]	Probendicke
i	[-]	Lagennummer
j	[-]	Anzahl an Stützstellen bei kontinuierlichen Verdrillkonzept
k	[-]	Materialkonstante bei WLF-Ansatz
l_A	[mm]	Andrucklänge / Konsolidierungslänge
$l_{\text{Abschattung}}$	[mm]	Abschattungsbereich
$l_{\text{bestrahlt}}$	[mm]	bestrahlte Länge
l_{ges}	[mm]	Gesamtstrecke
$l_{\text{Kühlsystem}}$	[mm]	Länge des Kühlsystems
l_{Luft}	[mm]	Bereich zwischen Konsolidierungsrolle und Kühlsystem

l_0	[mm]	Auslenkung Feder ohne Einspannung
l_1	[mm]	Auslenkung Feder vor Relaxation bei Einspannung
l_2	[mm]	Auslenkung Feder nach Relaxation bei Einspannung
n	[-]	Anzahl der Lagen
m	[-]	Anzahl an Verdrillmodulen bei symmetrischen Verdrillkonzept
p	[N/mm ²]	Druck
r	[m]	Krümmungsradius des Laminates
r_1	[mm]	Radius Druckfinne
r_2	[mm]	Radius Auflager
s	[mm]	Abstand Drehachse zur Tapeaußenkante in x,z-Ebene bei dynamischer Stützstelle
t	[s]	Zeit
t_L	[s]	Lagenkontaktzeit
t_R	[s]	Reptationszeit
t_w	[s]	Schweißzeit
t_{wechsel}	[s]	Zeit bis das neu gelegte Tape nach Aufheizen die spannungsfreie Temperatur erreicht
t_1	[s]	Lasereinwirkdauer
t_2	[s]	Konsolidierungsdauer
t_3	[s]	Dauer der freien Konvektion und Strahlung zwischen der Konsolidierungsrolle und dem Kühlsystem
t_4	[s]	Kühldauer
t_5	[s]	Dauer der freien Konvektion und Strahlung nach dem Kühlsystem

v	[m ³ /kg]	spezifisches Volumen
v	[mm/s]	Geschwindigkeit
v_a	[mm/s]	Abzugsgeschwindigkeit
$v_{a,+}$	[mm/s]	steigende Abzugsgeschwindigkeit
v_{abs}	[mm/s]	Absolutgeschwindigkeit
v_{abs1}	[mm/s]	Absolutgeschwindigkeit der Tapeinnenkante
v_{abs2}	[mm/s]	Absolutgeschwindigkeit der Tapeaußenkante
v_{dyn}	[mm/s]	durch Verdrillung eingebrachtes Geschwindigkeitsprofil
v_{dyn1}	[mm/s]	Geschwindigkeit der Tapeinnenkante auf der dynamischen Stützstelle
v_{dyn2}	[mm/s]	Geschwindigkeit der Tapeaußenkante auf der dynamischen Stützstelle
v_m	[mm/s]	mittlere Geschwindigkeit
v_{rel}	[mm/s]	Relativgeschwindigkeit
v_{rel1}	[mm/s]	relative Weglängenänderungsrate an Tapeaußenkante
v_{rel2}	[mm/s]	relative Weglängenänderungsrate an Tapeaußenkante
v_T	[mm/s]	Legegeschwindigkeit
v_1	[mm/s]	Eingangsgeschwindigkeit der Tapeaußenkante
v_2	[mm/s]	Eingangsgeschwindigkeit der Tapeinnenkante
w	[mm]	Stützweite
x	[mm]	Abstand zur Mittelebene des Laminates
y_0	[mm]	Ausgangsdicke des Substrates

Griechische Buchstaben

α	[°]	Steigungswinkel
α	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient
α	[K/min]	Abkühlrate
$\bar{\alpha}$	[K/min]	mittlere/durchschnittliche Kühlrate
α_F	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient der Faser
α_{\max}	[K/min]	maximale Kühlrate
α_{Grenz}	[K/min]	Grenzabkühlrate
α_M	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient der Matrix
$\alpha_{\text{Kühl}}$	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kühlsystem und Laminat
α_{Luft}	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Laminat
α_S	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Silikonrolle und Laminat
α_{Wkz}	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Werkzeug und Laminat
α_{\parallel}	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient parallel zur Faser
α_{\perp}	[1/K]	Wärmeausdehnungskoeffizient quer zur Faser
γ	[°]	Scherwinkel
$\dot{\gamma}$	[°/s]	Scherrate
Δb	[mm]	Änderung der Breite
Δh	[mm]	Höhendifferenz
ΔH	[mm]	Abstand der Drehachse von der inneren Tapekante
ΔH_f	[J]	gemessene Schmelzenthalpie

ΔH_f^0	[J]	Schmelzenthalpie bei 100 % kristallinem Gefüge
ΔL	[mm]	Weglängendifferenz
ΔL_{geo}	[mm]	geometrisch bedingte Weglängendifferenz
ΔL_{max}	[mm]	maximaler Auszug des Erweiterungsmoduls
ΔL_{mess}	[mm]	gemessene Weglängendifferenz
ΔL_{min}	[mm]	minimaler Auszug des Erweiterungsmoduls
$\Delta L_{rück}$	[mm]	elastische Rückstellung der Weglängendifferenz
ΔL_{φ_1}	[mm]	Weglängendifferenz bei Tapeverdrillung um Winkel φ_1
ΔL_{φ_2}	[mm]	Weglängendifferenz bei Tapeverdrillung um Winkel φ_2
$\Delta \dot{L}$	[mm/s]	Weglängenänderungsrate
ΔT	[°C]	Temperaturunterschied
$\Delta T_{Laminat}$	[°C]	Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite des Laminates
$\overline{\Delta T}_{Laminat}$	[°C]	mittlere Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite des Laminates
ΔT_{Stress}	[°C]	Temperaturdifferenz zwischen sich einstellender und spannungsfreier Temperatur
$\overline{\Delta T}_{Stress}$	[°C]	mittlere Temperaturdifferenz zwischen sich einstellender und spannungsfreier Temperatur
Δv	[mm/s]	Geschwindigkeitsunterschied über der Tapebreite
$\Delta \tau$	[N/mm ²]	Schubspannungsunterschied
ε	[%]	Dehnung
$\varepsilon(t)$	[%]	zeitabhängige Dehnung
ε_e	[%]	elastische Verformung