

Kontinuierliches Schweißen unidirektional faserverstärkter Tapes

Wie kann die Bindungsqualität bewertet werden?

Ralf Schledjewski

*Montanuniversität Leoben
Department Kunststofftechnik
Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen
Leoben, Österreich
e-mail: Ralf.Schledjewski@unileoben.ac.at*

Kurzfassung

Die Thermoplast-Tapelegetechnik bietet gegenüber alternativen Verfahren zur Verarbeitung von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten die Möglichkeit Strukturen belastungsgerecht, in großen Bauteilabmessungen und bei Bedarf mit hybridem Materialaufbau zu fertigen. Die dem Verfahren zugrunde liegende kontinuierliche Verschweißung von Substrat und zugeführtem Tape stellt dabei eine Herausforderung dar. Klassische Prüfverfahren sind zur Charakterisierung der erzielten Qualität der Verbindung nicht einsetzbar. Die Schälprüfung, bei der zwei miteinander verschweißte Tapes über eine Klinge geschält werden, liefert hier interessante Einblicke. Effekte wie Faserbrückenbildung, ein Auslenken der Schälebene aus der ursprünglichen Grenzfläche zwischen den verbundenen Tapes und der Wechsel zwischen duktilem und sprödem Versagensverhalten liefern auch die Erklärung für die gute Verbindung, die im kontinuierlichen Prozess erzielt werden kann.

Einleitung

Das Interesse an unidirektional faserverstärkten thermoplastischen Strukturbauteilen ist stetig steigend [1, 2]. Klassisch mittels Autoklavprozess imprägniert und/oder konsolidiert lassen sich hervorragende Lamineigenschaften erzielen. Der Autoklavprozess ist allerdings sehr zeit- und kostenintensiv und folglich besteht der Bedarf an alternativen Möglichkeiten Bauteile zu fertigen. Insbesondere für Großserien bietet sich hier die Nutzung thermoplastischer Halbzeuge mit textilen Verstärkungsstrukturen, sogenannte Organobleche, an [3]. Diese lassen sich kontinuierlich als flächige Ware herstellen und dann nachgeschaltet mittels Umformtechnik in komplexere Geometrien überführen. Bei Bedarf können über einen anschließenden Schweißprozess [4] hochkomplexe Bauteile entstehen. Möglich sind auch lokal variierende Laminataufbauten, wenn während des formgebenden Prozesses lokal flächige Elemente mit umgeformt und gleichzeitig verschweißt werden. Neben den textilverstärkten Organoblechen können auch unidirektional faserverstärkte thermoplastische Tapes verarbeitet werden [5, 6]. Diese Tapes können mittels Wickeltechnik [7] oder über eine Legetechnik verarbeitet werden [8, 9]. Dies geschieht indem kontinuierlich ein zulaufendes Tape mit dem bereits vorliegenden Substrat verschweißt wird. Im Gegensatz zu duromeren Materialien, die nach der Formgebung noch einen Aushärteprozess benötigen, ist bei den thermoplastischen Materialien die Einstellung der finalen Bauteileigenschaften im

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

kontinuierlichen Wickel- oder Legeprozess möglich. Um den hohen Anforderungen an die Bauteilqualität zu genügen ist es aber notwendig den Prozess und vor allem die Wechselwirkung zwischen Materialeigenschaften und Prozessparametern zu verstehen [10, 11, 12, 13].

Thermoplast Tapelegen

Bei der Thermoplast-Legetechnik werden immer unidirektional endlosfaserverstärkte, vollständig imprägnierte und konsolidierte Tapes verwendet. Im Vergleich zu früher diskutierten Alternativen [14] erfolgt die Herstellung der Tapes fast ausschließlich durch Pulver- oder Schmelzeimprägnierung. Die Thermoplast-Tapes mit einer Dicke im Bereich 150-1000 μm werden in der Regel mit Faservolumengehalten zwischen 30 und 70 Prozent geliefert. Die Tapes werden in situ konsolidiert, indem sie mit Hilfe einer Aufheizvorrichtung über Schmelztemperatur aufgeheizt und unter Applizierung des Konsolidierungsdrucks auf dem bereits abgelegten Laminat platziert werden. Die wesentlichen Mechanismen sind, neben der Materialerwärmung, die Kontaktbildung und die molekulare Durchdringung. Letztere wird insbesondere beim kontinuierlichen Legeprozess durch Mikrofließbewegungen verstärkt. Thermoplast-Tapelegeeinheiten werden kommerziell beispielsweise von Coriolis Composites und AFPT angeboten. Bild 1 zeigt exemplarisch das Legesystem des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen. Das Legesystem ist an einem 6-Achs-Knickarmroboter montiert.

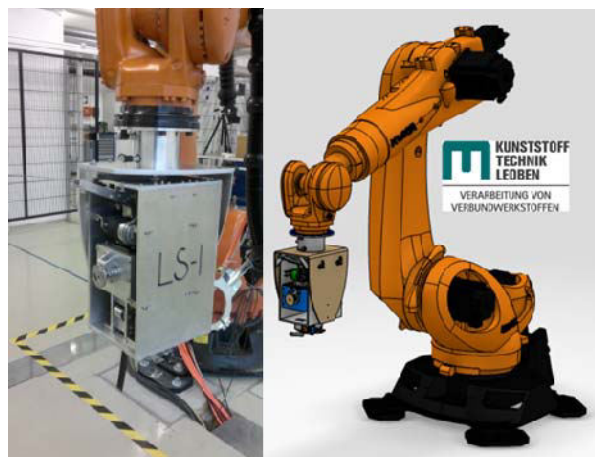


Bild 1 : Legesystem LS I des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Charakterisierung der Bindungsgüte

Die typischerweise zur Charakterisierung der Bindungsgüte zum Einsatz kommenden Testmethoden der Bruchmechanik [15] wie z.B. der Rissöffnungsmodus (Mode I) oder die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (Mode II), können aufgrund der Abmessungen der verwendeten Materialien nicht zum Einsatz kommen. Passender sind hier Testkonfigurationen wie die von Hulcher et al. [16] beschriebene Schälprüfung über eine Klinge oder die Schälung der Tapes über ein Rollenpaar [17]. In [16] konnte hier bereits gezeigt werden, dass die Wechselwirkung Prozess-Eigenschaft damit identisch beschrieben werden kann.

Aus der Literatur ist bekannt, dass für die eher spröden duromeren Verbundwerkstoffe [18, 19] die Rissspitze in einer Ebene mit hoher Bindungsstärke gegebenenfalls in benachbarte Ebenen, die z.B. geschwächt sind, wechseln können. Erklärt wird dies mit dem

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

Spannungsfeld, das sich vor der Risspitze ausbildet und sowohl in der Rissebene aber auch in den benachbarten Ebenen wirkt. Befindet sich nun in der benachbarten Ebene eine Fehlstelle, auf die das Spannungsfeld wirkt und eine Rissinitiierung bewirken kann, kann es hier zu einem bevorzugten Risswachstum kommen. Durch den Wechsel der Rissebene kommt es dann typischerweise zu Faserbrücken, die sich im geöffneten Riss vor der Risspitze zeigen (Bild 2). Mit weiterlaufendem Riss werden diese Fasern aus der sie einbettenden Matrix herausgezogen oder versagen unter Zugbelastung. Beide Effekte liefern während der Prüfung zusätzliche Beiträge zur gemessenen Schälkraft.

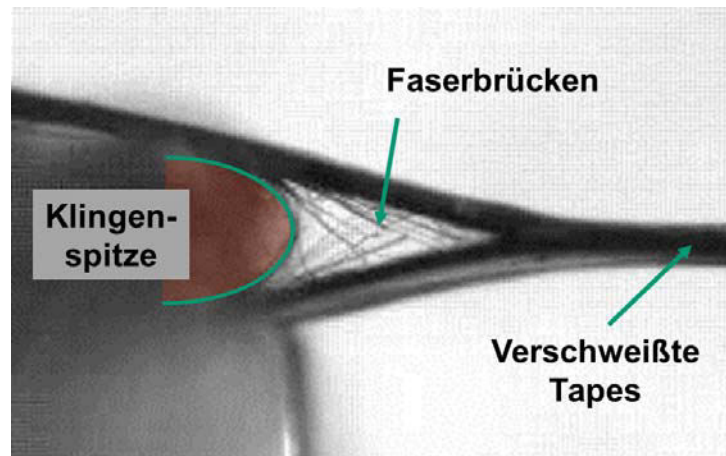


Bild 2 : Faserbrückenbildung vor der Risspitze

Experimentelle Untersuchungen

Um die Entwicklung der Rissebene näher zu untersuchen wurden CF/PEEK-Tapes mit 150 μm Dicke und 55 % Faservolumengehalt mittels Legetechnik verbunden. Bevor die Tapes verbunden wurden, wurde eine der Tapeoberflächen mit nanoskaligen sphärischen Partikeln, z.B. TiO_2 , dotiert. Die Dotierung wurde derart durchgeführt, dass es nicht zu signifikanten Beeinflussungen hinsichtlich der ermittelten Schälfestigkeit bei einer Schälprüfung über eine Klinge kam. Die Dotierung erlaubt aber eine genaue Identifikation der Schweißebene bei einer Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (Bild 3).

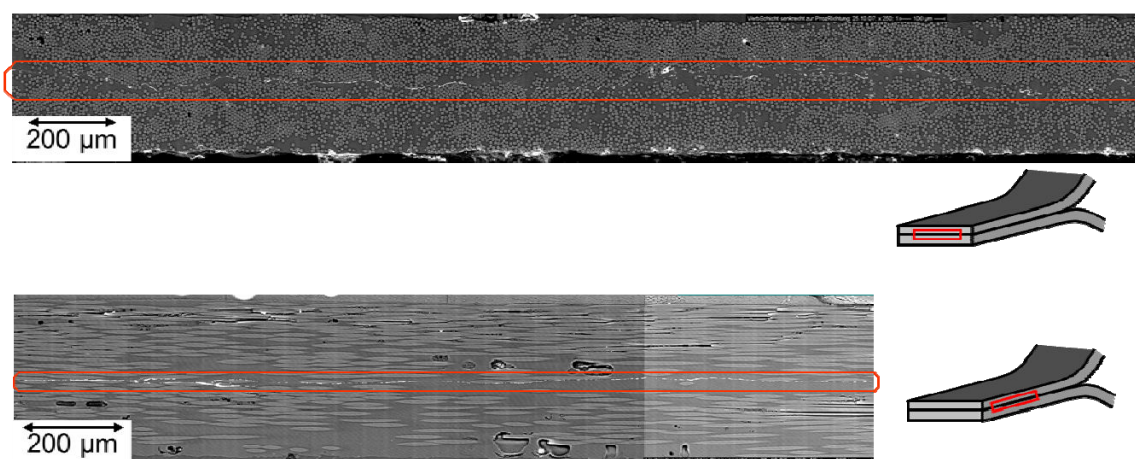


Bild 3: Querschnitt senkrecht und parallel zur Faserausrichtung der Tapes; die Rasterelektronenmikroskopie liefert aufgrund unterschiedlicher Materialkontraste detaillierte Informationen zur Position der Schweißebene.

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

Untersuchungen in der Ebene senkrecht zur Faserausrichtung zeigen bei Betrachtung über die gesamte Tapebreite deutliche Variationen bezüglich der Lage der Schweißebene (Bild 4), die nicht allein auf variierende Tapedicken zurückzuführen sind. Vielmehr lassen sich diese Variationen auf ausgeprägte Fließeffekte [20, 21] aufgrund des anliegenden Konsolidierungsdruckes während des Legeprozesses zurückführen. Die Fließeffekte führen auch dazu, dass sich die mittels der Dotierung kenntlich gemachte Schweißebene nicht durchgängig mehr eindeutig identifizieren lässt. Die nanoskaligen Partikel sind teilweise aufgrund von Matrixfließen in ihrer Position verwaschen.

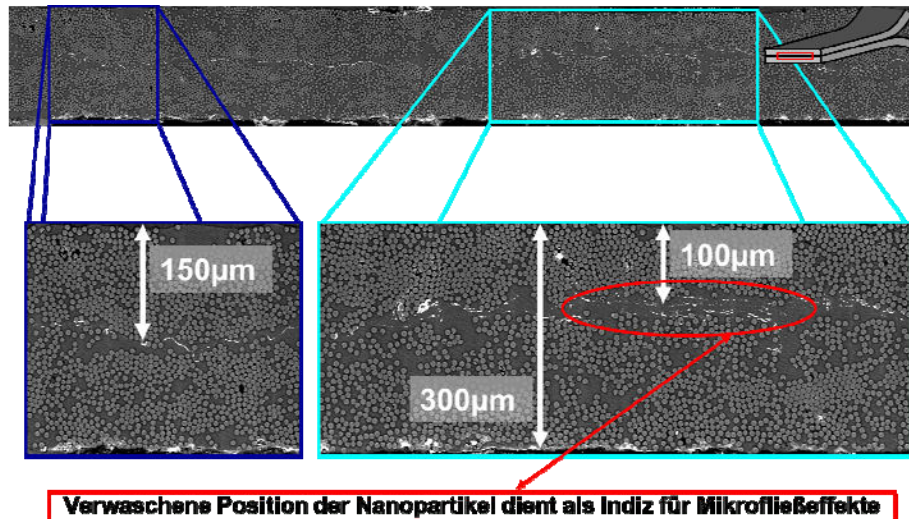


Bild 4 : Variierende Position der Schweißebene über die abgelegte Tapebreite

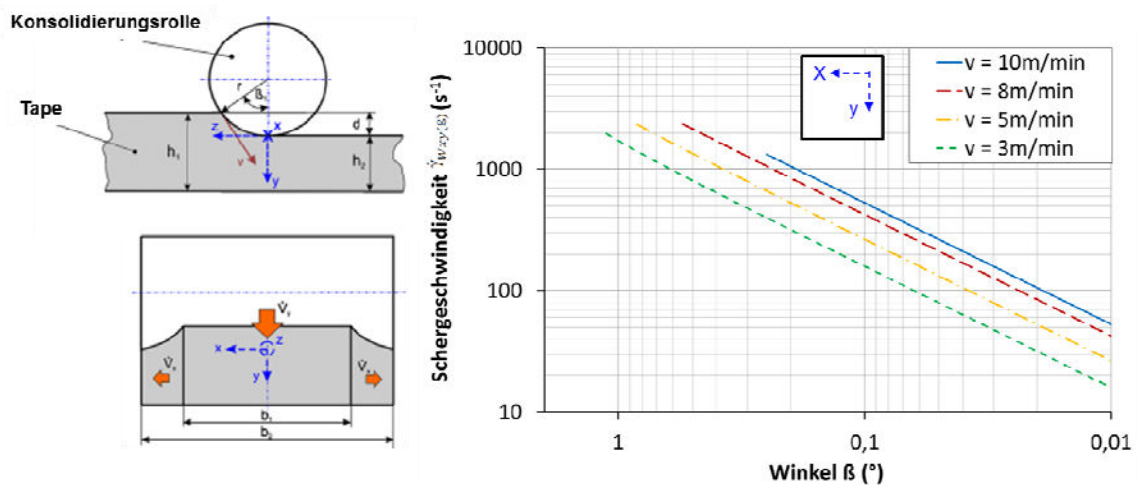


Bild 5 : Resultierende Schergeschwindigkeit der Schmelze während der Konsolidierung

Werden die Tapes nach der Schälprüfung untersucht, so lassen sich die Schällebene und die Schweißebene nicht durchgängig einander zuordnen (Bild 6). Offensichtlich kommt es auch in der duktilen thermoplastischen Matrix zur Auslenkung der Schällebene. Auch ist die duktile Matrixeigenschaft nicht durchgängig auf der geschälten Oberfläche erkennbar. Im Gegenteil, hier sind eindeutig duktile und spröde Bruchmodi zu finden, die sich auch eindeutig mit Peaks im Kurvenverlauf der gemessenen Schälkraft korrelieren lassen (Bild 7).

Die Schälprüfung erweist sich somit als sehr gut geeignete Prüfmethode um die Qualität der kontinuierlichen Schweißverbindung zu charakterisieren, Effekte in der Schweißebene zu

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

identifizieren und damit die Basis für ein gutes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Prozess, Struktur und Eigenschaften zu bieten.

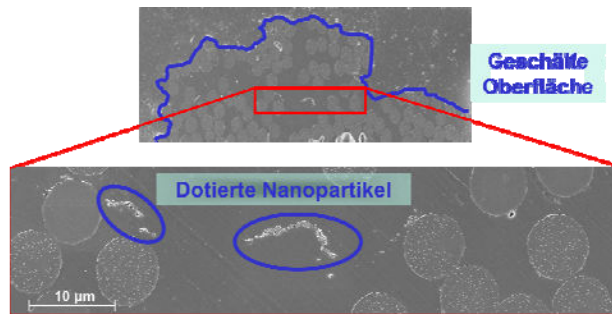


Bild 6 : Schällebene weicht von der Schweißebene ab

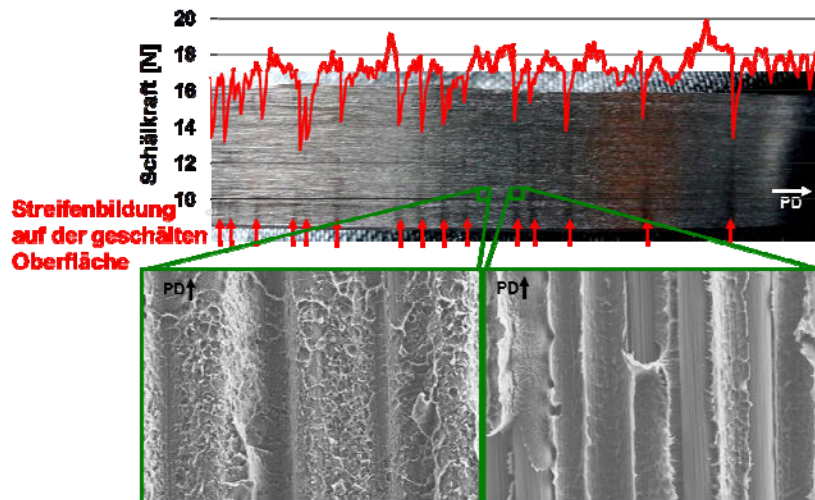


Bild 7 : Duktiles und sprödes Versagen im Verlauf der Schälprüfung

Ausblick

Mit der vorgestellten Schälprüfung sind insbesondere direkte Effekte der Prozessführung sehr gut zu identifizieren. Damit ergibt sich die Möglichkeit auch die Effekte bei der Verarbeitung von Multimaterialverbindungen zu untersuchen. Dies ist Gegenstand einer laufenden Forschungsarbeit. Im Rahmen des seitens der Europäischen Union geförderten Vorhabens Stellar – "Selective Tape-Laying for Cost-Effective Manufacturing of Optimised Multi-Material Components" sind hier egehende Betrachtungen vorgesehen.

Danksagung

Teile der vorgestellten experimentellen Arbeiten wurden im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Vorhabens ("Simulationsmodell der in situ Konsolidierung bei der Verarbeitung von thermoplastischen Bändchenhalbzeugen zur Einbringung in eine Finite-Elemente Umgebung" Projekt SCHL 419/4-1) durchgeführt.

Die aktuellen Arbeiten werden durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union [FP7-2013-NMP-ICT-FOF(RTD)], Projektnummer 609121 gefördert.

Der Großteil der experimentellen Arbeiten wurden von Herrn Oliver Greven, die Untersuchungen zum Fließverhalten während der Verarbeitung durch Herrn Matthias Narnhofer durchgeführt.

Allen Beteiligten und den Fördermittelgebern sei an dieser Stellen der Dank ausgesprochen.

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

Quellen

- 1 N.N., "European Thermoplastic Composites – Status&Trends: 2004-2014", Coronet, NetComposite, www.coronet.eu.com, November 2003.
- 2 Black S., "Thermoplastics provide attractive options", *High-Performance Composites*, 9/4 (2001), 20-26.
- 3 Didi M., Mitschang P., Schledjewski R., "Process technologies for thermoplastic fibre-reinforced polymer composites", *JEC Composites Magazine*, N°53 December 2009, 61-62
- 4 Mitschang P., Blinzler M., and Wöginger A., "Processing Technologies for Continuous Fibre Reinforced Thermoplastics with Novel Polymerblends", *Compos. Sci. Technol.*, 63/14 (2003), 2099-2110.
- 5 Schledjewski R., and Latrille M., "Processing of unidirectional fiber reinforced tapes – fundamentals on the way to a process simulation tool (ProSimFRT)", *Compos. Sci. Technol.*, 63/14 (2003), 2111-2118.
- 6 Beresheim G., Schledjewski R. and Mitschang P., "Part complexity based cycle time estimation model for thermoplastic tow placement process", *Proc. 23rd SAMPE EUROPE Conference*, Paris, (2002), 611-621.
- 7 Schlottermüller M., et al, "Thermal residual stress simulation in thermoplastic filament Winding process", *J. Thermoplast. Compos.*, 16 (2003), 497-519.
- 8 Schledjewski R. and Lichtner J., „Thermoplast-Tapelegen – Vollautomatisierter Prozess mit reproduzierbar guten Legeergebnissen“, in: *Verbundwerkstoffe – 14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, Ed.: Degischer H.-P., (2003), Wiley-VCH, Weinheim, 866-871.
- 9 Lamontia M. A., et al, "Manufacturing flat and cylindrical laminates and built up structure using automated tape laying, fiber placement, and filament winding", *SAMPE Journal*, 39/2 (2003), 30-38.
- 10 Sonmez F. O. and Hahn H. T., "Modeling of heat transfer and crystallization in thermoplastic composite tape placement process", *J. Thermoplast. Compos.*, 10 (1997), 198-240.
- 11 Sonmez F. O., Hahn H. T. and Akbult M., „Analysis of process-induced residual stresses in tape placement“, *J. Thermoplast. Compos.*, 15 (2002), 525-544.
- 12 Schlottermüller M., Lü H., Roth Y., Himmel N., Schledjewski R., Mitschang P., „Thermal Residual Stress Simulation in Thermoplastic Filament Winding Process“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2003, 16(6): 497-519
- 13 Lü H., Schlottermüller M. Himmel N., Schledjewski R., "Effects of tape tension on residual stress in thermoplastic composite filament winding", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 18, November 2005, pp. 469-487
- 14 Funck, R., "Entwicklung innovativer Fertigungsverfahren zur Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren", *Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 2 Nr. 393*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- 15 Friedrich, K., "Application of fracture mechanics to composite materials", *Composite Materials Series 6*, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, 1989
- 16 Hulcher, B., Marchello, J., Hinkley, J., "Correlation between double cantilever beam and wedge peel tests for automated tow placement", *Proc. 43rd International SAMPE Symposium*, Anaheim, Kalifornien, USA (1997), pp. 1955-1966
- 17 DIN 53 289, 09/79
- 18 Johnson W.S., Mangalgi P.D., "Investigation of fiber bridging in double cantilever beam specimens", *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 9, No. 1, pp 10-13, 1987.

Erweiterte Vortragskurzfassung:

4a Technologietag „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“, 27.-28.02.14, Schladming

-
- 19 Bradley W.L., Cohen R.N., "Matrix deformation and fracture in graphite reinforced epoxies", *Delamination and debonding of materials*, 1st edition, American Society of Testing and Materials, 1985.
 - 20 Khan M.A., Mitschang P., Schledjewski R., "Identification of some optimal process parameters to achieve higher laminate quality through tape placement", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 29, No 2, 2010, 98-111
 - 21 Narnhofer M., Schledjewski R., Mitschang P., "Simulation of the tape-laying process for thermoplastic matrix composites", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 32, 2013 E705-E713