

Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde

DGM-Tagung • Kaiserslautern • 17. - 19. September 1997

Ermittlung und Modellierung des Umformverhaltens von thermoplastischen Gewebeprepregs unter besonderer Berücksichtigung der Atlas-1/7-Bindung

Th. Keilig, Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, DLR, Stuttgart;
F. J. Arendts, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart

Einleitung

Gewebeverstärkte Thermoplaste für Strukturbauteile haben gegenüber den duroplastischen Verbundwerkstoffen eine Reihe von Vorteilen wie Recyclingfähigkeit, erhöhte Schlagzähigkeit, unproblematische Lagerung der Halbzeuge sowie kurze Taktzeiten bei der Warmumformung. Bevor ein Bauteil aus gewebeverstärkten Thermoplasten jedoch erfolgreich in Serie gefertigt werden kann, sind im allgemeinen Vorversuche zur Preßformauslegung mit hohem Zeit- und Kostenaufwand notwendig. Als hauptsächlicher Verformungsmechanismus tritt eine Schubverformung der Gewebeverstärkungen auf. Dieser sogenannte Trellis-Effekt ist besonders bei doppelt gekrümmten Geometrien von Bedeutung, bei denen die Gewebescherung auch zu Faltenbildung führen kann. Eine numerische Simulation dieses Formgebungsprozesses ermöglicht es, schon während der Bauteilkonstruktion auf die speziellen Fertigungsprobleme gewebeverstärkter Thermoplaste und die damit verbundenen Aspekte der Werkzeugauslegung Rücksicht zu nehmen.

Bisherige experimentelle Kennwertermittlung an Gewebeprepregs mit erweichter Matrix

Um in einem gewebeverstärkten Prepreg eine reine Trellis-Verformung hervorzurufen, wird häufig ein quadratisches Probenstück in einen gelenkigen Rahmen mit starren Seiten eingespannt, über den dann die Schubverformung aufgebracht wird. Dabei wird das Gewebe in Kett- und Schußrichtung als undeformierbar angenommen. Diese Art von Rahmen-Zugversuchen (Picture-Frame-Tests) wird häufig durchgeführt und beschrieben, wie z. B. in (1) bis (4). Zu den grundlegenden Problemen von Vorrichtungen, wie etwa Temperaturdehnungen und innere Reibungen, kommt hier noch eine störende Faserumlenkung infolge der flächigen Einspannung im Rahmen hinzu. Die hiervon besonders betroffenen Bereiche in den Rahmenecken werden daher oft herausgeschnitten.

Von Mitscherling (2) wurden Versuche durchgeführt, bei denen eine Faserorientierung des Gewebes parallel zur Belastungsrichtung bleibt. Dies erfordert auf einer Seite des Rahmens eine quer zur Belastungsrichtung frei verschiebbare Einspannung, die durch eine speziell konstruierte Prüfapparatur mit Führungsstangen und Gelenkbrücken realisiert wurde.

Häufiger wird daher der Rahmen in eine Diagonalenrichtung über Eck gezogen, so daß das Gewebe unter $\pm 45^\circ$ Faserorientierung zur Belastungsrichtung gestreckt wird um den Zwischenfaserwinkel zu verringern. Neben dem reduzierten apparativen Aufwand hat diese Variante noch den Vorteil, daß bei ihr etwa die Hälfte mehr Zeit zur Verfügung steht, um im Prepreg die selben Verformungsverhältnisse zu erreichen. Bei den Picture-Frame-Tests in (4) werden die Proben lediglich mit Stiften fixiert, um dem eingespannten Material eine freie Rotation zu ermöglichen. Aber auch diese Befestigung bringt Nachteile mit sich: Um ein Ausreißen der Prepregs an den Fixierstiften zu verhindern muß mit großen Materialdicken gearbeitet werden und außerdem läßt sich keine homogene Scherbeanspruchung mehr erzeugen, was Sekundärfalten zwischen den Stiften belegen.

Der Streifen-Zugversuch

Da die zur Gewebescherung erforderlichen Kräfte sehr gering sind, sollten Versuche zur Kennwertermittlung an Gewebeprepregs mit erweichter Matrix den Einfluß von Störgrößen weitestgehend ausschließen. Auf Vorrichtungen sollte möglichst verzichtet werden, da sie die Meßergebnisse unvermeidlich stark beeinträchtigen. Eine alternative Möglichkeit eine Gewebescherung hervorzurufen bietet der Streifen-Zugversuch unter $\pm 45^\circ$ Faserorientierung, der im folgenden vorgestellt wird. Er kann ohne weitere Vorrichtungen in jeder Universal-Prüfmaschine mit Temperatorkammer durchgeführt werden. Bei dieser führunglosen Verformung handelt es sich um eine Belastungsform des Prepregs, die beim Thermoformen häufig anzutreffen ist, etwa wenn das Material über eine Gesenkkante nachgezogen werden muß. Der Streifen-Zugversuch ist allerdings meßtechnisch schwer zugänglich und die Auswertung gestaltet sich somit etwas aufwendiger.

Infolge der Gewebescherung im Mittelbereich verlängert sich der Prepregstreifen wie in Bild 1 gezeigt unter der Zugbelastung, während er sich gleichzeitig durch den allmählich abnehmenden Zwischenfaserwinkel entsprechend verjüngt. Die in den Bindungspunkten vorhandene Reibung zwischen den Einzelfäden reicht aus, um die für die Gewebescherung erforderlichen Verformungskräfte zu übertragen ohne daß ein Auseinanderziehen des Gewebes stattfindet. Der Winkel zwischen Kett- und Schußrichtung kann in diesem Mittelbereich zu jedem Zeitpunkt als konstant angesehen werden.

Da aber nur feste Einspannungen zu realisieren sind, bilden sich an den Enden des Prepregstreifens Krafeinleitungszonen aus. Ihre zusätzlichen Verformungen liefern einen Störanteil zu der im Mittelbereich verursachten Kraft. Da sich die Probe im Gegensatz zu den Rahmen-Zugversuchen jedoch frei verformen kann, führt dieser Störanteil sofort zu einer weiteren Verformung im Mittelbereich. Ferner ist durch die kinematischen Zusammenhänge bei der Ausbildung dieser Krafeinleitungszonen die Dehnrates in der Kernzone ungleich der an der Prüfmaschine eingestellten Traversengeschwindigkeit. Daher erfolgt die Messung des Zwischenfaserwinkels bzw. der Dehnungen direkt im Mittelbereich des Prepregstreifens durch ein Raster entlang den beiden Fadenrichtungen. Die Verformung des Rasters wird durch das Sichtfenster der Temperaturkammer von einer Kamera aufgezeichnet und anschließend am PC ausgewertet.

Von großem Einfluß ist bei diesen Versuchen das Breitenverhältnis der Streifen-Proben: Sind die Streifen zu breit, dann gibt es Fasern, die sowohl in der oberen als auch in der unteren Einspannung geklemmt sind. Die Folge ist, daß reine Steifigkeitseigenschaften des Gewebes gemessen werden, da der eigentliche Verformungsmechanismus der Gewebescherung gar nicht auftreten kann. Erst wenn das Breitenverhältnis kleiner als 0,5:1 ist, erstreckt sich der Bereich der homogenen Gewebescherung, in dem die miteinander verwobenen Fasern weder oben noch unten geklemmt sind, über die gesamte Probenbreite. Alle im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Proben-Streifen haben eine Breite von 70 mm und eine freie Einspannlänge von 200 mm zwischen den Spannbacken, was einem Breitenverhältnis von 0,35:1 entspricht.

Um das Kraft-Verformungs-Verhalten detailliert beschreiben zu können, wurden die Experimente als Relaxationsversuche durchgeführt. Dies ermöglicht es, einen geschwindigkeitsabhängigen und einen geschwindigkeitsunabhängigen Anteil der Gesamtkraft voneinander zu trennen. Ferner stellte sich heraus, daß die Relaxationsversuche auch in Form eines Stufenversuches durchgeführt werden können, da die Einhüllende der einzelnen Stufen dem Kraftverlauf einer durchgehenden Messung entspricht. So lassen sich mit einer Probe die beiden Kraftanteile für mehrere Dehnungszustände bestimmen, wodurch der Zeit- und Materialaufwand deutlich reduziert wird. Nach der Relaxation kann der Prepregstreifen durch Entlasten noch auf die elastischen und plastischen Dehnungsanteile hin untersucht werden.

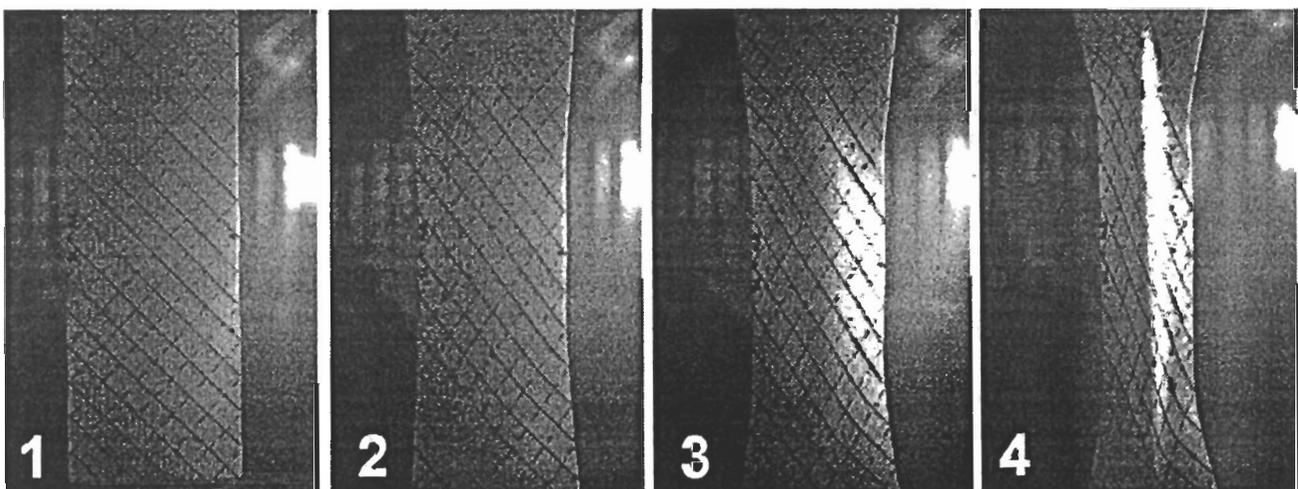


Bild 1: Aufnahmen eines Streifen-Zugversuchs mit nachgezeichneten Kett- und Schußrichtungen (v. l. n. r.: Ausgangszustand, ebene Gewebescherung, Beginn der Faltenbildung, ausgeprägte Falte).

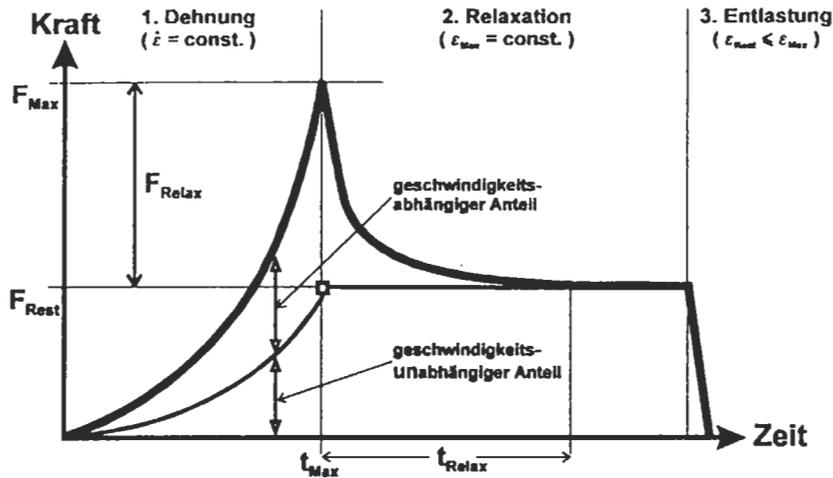


Bild 2: Prinzipieller Verlauf der beim Relaxationsversuch gemessenen Zugkraft.

Die Versuchsergebnisse und der Einfluß der Gewebeorientierung

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Streifen-Zugversuchs wurde das Thermoplast-Prepreg G101 von Verseidag (5) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein beidseitig mit Polyamid12 pulverbeschichtetes Atlas-1/7-Glasgewebe. Oberhalb des Matrixschmelzpunktes von 178 °C konnte neben einer Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verformungskräfte auch ein Einfluß der Gewebeorientierung festgestellt werden: Wie in Bild 3 zu sehen, sind die erforderlichen Verformungskräfte bei Längs-Orientierung um bis zu 40% größer als bei Quer-Orientierung. Die Definition dieser beiden Gewebeorientierungen wird in Bild 4 gegeben. Zur Verdeutlichung der Asymmetrie sind die 5/5-Kreuzungspunkte zusätzlich gekennzeichnet. Es fällt auf, daß die Bindungspunkte (BP) nur in der einen Diagonalen exakt der Winkelhalbierenden zwischen Kett- und Schußrichtung folgen. Für die Unterscheidung der Belastungsrichtung „Längs“ bzw. „Quer“ wird diese Ausrichtung der Bindungspunkte herangezogen. Um entscheiden zu können, ob die bei der Prepregscherung gefundene Orientierungsabhängigkeit von der hochviskosen Thermoplastmatrix verursacht wird oder eine reine Gewebeeigenschaft ist, wurden zusätzlich Versuche mit trockenem Gewebe bei Raumtemperatur durchgeführt. Hierfür wurde zum einen das bei der Prepregherstellung verwendete Glasgewebe Interglas 92626 verwendet, als auch das Glasgewebe Interglas 91745, das ebenfalls über eine Atlas-1/7-Bindung bei der selben Fadenzahl und nahezu dem selben Flächengewicht verfügt (6). Die beim trockenem Gewebe gemessenen Verformungskräfte sind ebenfalls in Bild 3 aufgetragen. Sie zeigen keine Abhängigkeit von der Dehnrates.

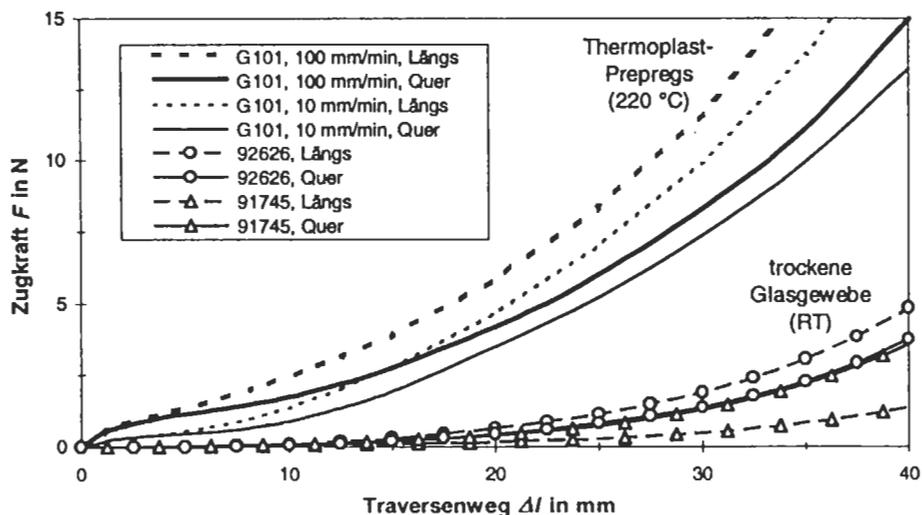


Bild 3: Gemessene Kraftverläufe in Abhängigkeit von der Gewebeorientierung.

Um Klarheit über die Ursachen dieses Materialverhaltens zu erhalten, wurden Schliffbilder angefertigt. Die Schliffe durch das gescherte Prepreg wurden so orientiert, daß sich jeweils Bindungspunkte und 5/5-Kreuzungspunkte abwechseln. Bei der Belastungsrichtung „Längs“ verläuft der Schliff somit von oben nach unten, während er bei Quer-Orientierung von links nach recht verläuft. Für die Interpretation der gezeigten Schliffbilder sei noch darauf hingewiesen, daß die einzelnen Fäden bei der gewählten Schliffausrichtung nicht senkrecht sondern schräg angeschliffen sind: Bei den beiden rechten Schliffen unter ca. 68° und bei den linken sogar nur unter dem aktuellen Zwischenfaserwinkel von ca. 24°, wodurch die Fadenquerschnitte sehr groß erscheinen. Es ist zu sehen, daß sich bei der Belastungsrichtung „Quer“ im G101-Prepreg bzw. 92626-Gewebe an den 5/5-Kreuzungspunkten die beiden Fäden von einander entfernen. Dadurch ist es den Bindungspunkten nun möglich, sich in die Lücken, die sich zwischen den beiden Fäden der 5/5-Kreuzungspunkte bilden, zu schieben. Unter der Belastungsrichtung „Längs“ hingegen nähern sich beim Prepreg die Fäden der 5/5-Kreuzungspunkte einander an und verkleinern somit den Zwischenraum im Gewebe. Daher können sich die Bindungspunkte nicht unter die 5/5-Kreuzungspunkte schieben. Sollte diese Verkleiner- bzw. Vergrößerung der Gewebewenräume für die Orientierungsabhängigkeit der Gewebescherung von Bild 3 ursächlich sein, so muß sich in Schliffbildern des 91745-Gewebes ein genau gegensätzliches Verhalten feststellen lassen: In der Tat zeigt der Vergleich, daß sich beim 91745-Gewebe die Zwischenräume in den 5/5-Kreuzungspunkten gegensätzlich zum G101-Prepreg verändern. Besonders deutlich wird dies in den rechten Bildern für die Quer-Orientierung. Hier fällt sofort auf, daß die Bindungspunkte sich nicht mehr in die größer werdenden Gewebewenräume schieben können. Somit ist die Orientierungsabhängigkeit durch Schliffbilder eindeutig erklärbar.

Da sich der Einfluß der Gewebeerorientierung bei den beiden Glasgeweben konträr äußert, handelt es sich bei dem gefundenen Phänomen um eine reine Gewebeeigenschaft, die jedoch nicht aus dem Bindungstyp oder den Fadenzahlen vorhergesagt werden kann. So muß die Abhängigkeit der Scherkräfte von der Gewebeerorientierung für jede Gewebesorte von neuem experimentell ermittelt werden. Betrachtet man nun Drapierbarkeitsprobleme an nicht rotationssymmetrischen Körpern, so reicht es also nicht aus, nur zwischen den beiden allgemeinen Orientierungen von 0°/90° und ±45° zu unterscheiden, sondern ferner muß jede der beiden Gewebeerorientierungen noch einmal in Längs- und Quer-Orientierung unterteilt werden. Ein solches Materialverhalten kann z. B. genutzt werden, um durch eine geeignete Orientierung des Zuschnittes die Neigung zur Faltenbildung zu verringern.

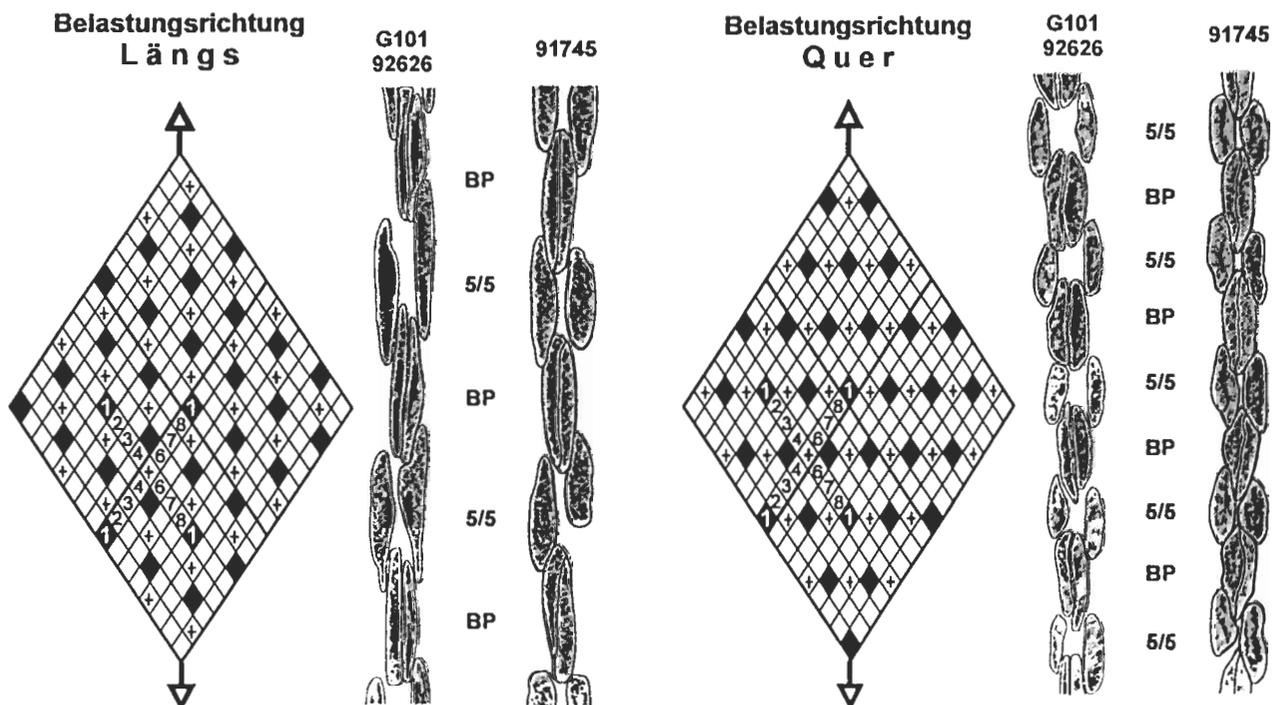


Bild 4: Definition der Gewebeerorientierungen bei einer Atlas-1/7-Bindung mit der Steigungszahl 3 sowie ein Vergleich von Schliffen durch das gescherte Prepreg bzw. Gewebe.

Bisherige Werkstoffgesetze zur Beschreibung des Warmumformens von Gewebeprepregs

Um mit numerischen Simulationen präzise Vorhersagen über das Umformverhalten von gewebeverstärkten Faserverbundhalbzeugen mit einer über ihren Schmelzpunkt hinaus erwärmten, hochviskosen Matrix machen zu können, sind entsprechende neue Werkstoffgesetze erforderlich. Bisherige Vorschläge für ein Werkstoffgesetz zur Beschreibung des Kraft-Verformungs-Verhaltens bei Gewebeprepregs kommen entweder aus der Kontinuumsmechanik oder der Rheologie. Mit ihnen können Schubverformungen in Geweben inklusive einer eventuellen Faltenbildung durch eine numerische Simulation des Thermoformens qualitativ beschrieben werden (7). Sie sind aber nicht in der Lage, die Richtungsabhängigkeit der Gewebescherung bzw. den relaxierenden Anteil an der Gesamtkraft korrekt wiederzugeben.

Das Rautenmodell

Ausgehend von den Ergebnissen der Relaxationsversuche wird nun für das einmalige Umformen von Thermoplast-Prepregs ein rheologisches Modell mit einer mechanischen Koppelung, die den Gewebewinkel repräsentiert, vorgeschlagen. Diese Koppelung besteht aus vier gleich langen, ideal starren Stäben, die untereinander reibungsfrei gelenkig verbundenen sind. Die Diagonale bildet jeweils eine Feder mit parallel geschalteter Maxwell-Kette. Während die Federn den geschwindigkeitsunabhängigen Anteil modellieren, sorgen die Maxwell-Ketten für den während der Relaxation auf Null zurückgehenden geschwindigkeitsabhängigen Anteil.

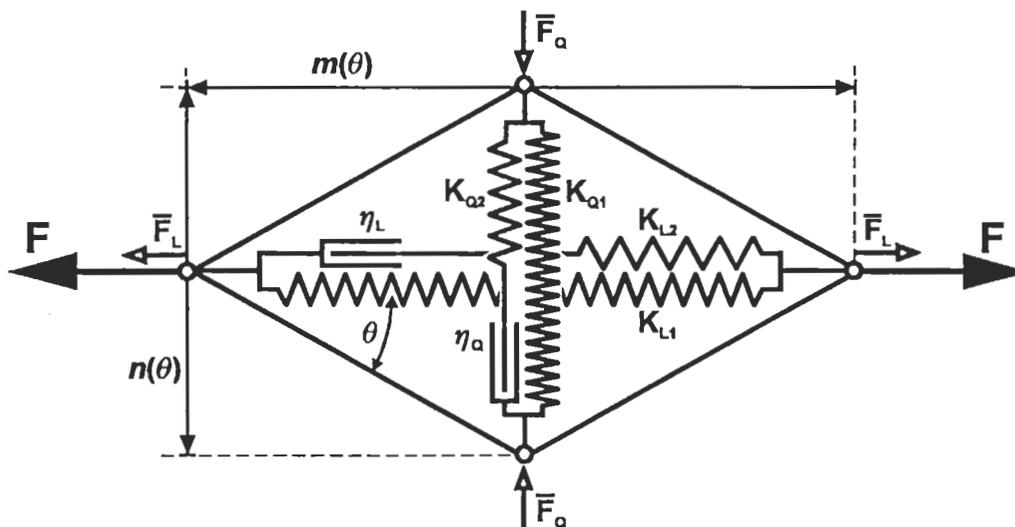


Bild 5: Das Rautenmodell.

Wie in der Textiltechnik üblich wird hier mit Längs Kräften \bar{F} [N/m] und entsprechend eingeführten Federkonstanten K [N/m²] und Viskositäten η [Ns/m²] gearbeitet. Durch diesen Übergang auf Längskräfte wird das Problem der Materialdickenbestimmung umgangen. Dies ist von besonderem Vorteil, da die Scherung von Gewebeprepregs einen Dickenzuwachs mit sich bringt. Die für eine Verformung des Rautenmodells benötigte Gesamtkraft

$$F = [\bar{F}_L + \bar{F}_Q \cdot \cot(\theta)] \cdot n(\theta)$$

setzt sich zusammen aus einem in Längsrichtung hervorgerufenen Anteil $F_L = f(K_{L1}, K_{L2}, \eta_L, \theta(t))$ und einem in Querrichtung erzeugten Anteil $F_Q = f(K_{Q1}, K_{Q2}, \eta_Q, \theta(t))$. Der Anteil des quer zur Verformungsrichtung liegenden Feder-Dämpfer-Systems an der Gesamtkraft wird mit zunehmender Dehnung größer, zum einen über den Faktor $\cot(\theta)$, zum anderen weil sich $n(\theta)$ progressiv verhält während sich $m(\theta)$ asymptotisch seinem Endwert annähert. Für jedes der beiden Feder-Dämpfer-Systeme muß zu jedem Zeitpunkt die folgende Differentialgleichung gelöst werden:

$$\bar{F} + \frac{\eta}{K_2} \cdot \dot{\bar{F}} = K_1 \cdot \Delta l + \frac{\eta \cdot (K_1 + K_2)}{K_2} \cdot \dot{l}$$

Vergleich von Theorie und Experiment

Die mit dem Rautenmodell berechneten Kraftkurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Streifen-Zugversuche. Im linken Diagramm von Bild 6 ist zu sehen, daß sowohl die Dehnratenabhängigkeit des Scherkraftverlaufes als auch der Einfluß der Gewebeerorientierung erfaßt wird. Da im Experiment Stufenversuche durchgeführt werden können, ist diese Eigenschaft von besonderem Interesse bei der Simulationsrechnung. Das rechte Diagramm zeigt, daß es möglich ist auch das hierbei auftretende Materialverhalten inklusive der Kraftrelaxation gut wiederzugeben.

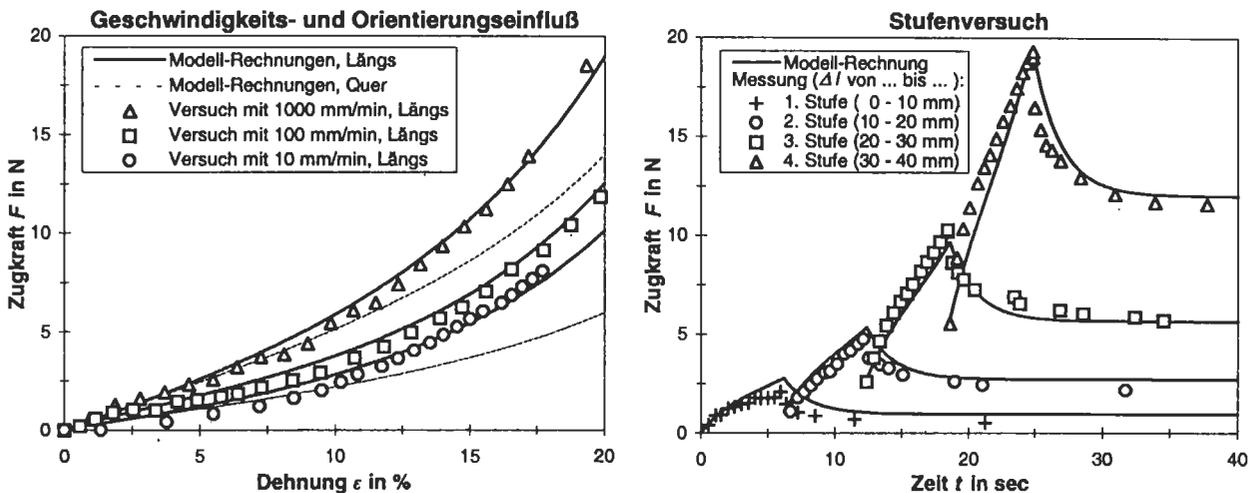


Bild 6: Korrelation von Modell und Experiment.

Schlußwort und Ausblick

Da der hier verwendete Streifen-Zugversuch in jeder Universal-Prüfmaschine ohne weitere Vorrichtungen bei sehr geringem Materialverbrauch durchzuführen ist, besteht berechtigte Hoffnung, daß er sich zu einem Standardversuch für die Kennwertermittlung und die Bestimmung des Umformverhaltens gewebeverstärkter Prepregs entwickeln kann. Ferner erlaubt er auch eine rasche und vor allem quantitative Beurteilung der von vielen Faktoren abhängigen Drapierbarkeit bei trockenen Geweben.

Mit dem in dieser Arbeit zur Beschreibung des Kraft-Verformungs-Verhaltens gewebeverstärkter Prepregs vorgeschlagenen mechanischen Ersatzmodell läßt sich neben der Geschwindigkeitsabhängigkeit und der Relaxation auch der gefundene Einfluß der Gewebeerorientierung auf den Scherkraftverlauf erfassen. Hierzu müssen zur weiteren Bestätigung umfangreiche Messungen und Schlibbilduntersuchungen an anderen Faserverbundhalbzeugen durchgeführt werden.

Literatur

- (1) Hörsting, K., Wulfhorst, B.: „Drapierbarkeit von textilen Halbzeugen zur Verstärkung von Faserverbundwerkstoffen“, Internationale Chemiefasertagung, Dornbirn, 1992
- (2) Mitscherling, J.: „Theoretische Modellbildung zum Umformen thermoplastischer Gewebeprepregs“, Dissertation, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 1992
- (3) Boisse, Ph., Cherouat, A., Gelin, J. C., Sabhi, H.: „Experimental Study and FE-Simulation of Glass Fibre Fabric Shaping Process“, Polymer Composites, Vol. 16, Nr. 1, 1995
- (4) O'Bradaigh, C. M., McGuinness, G. B., Canavan, R. A.: „Experimental Intraply Shear Testing of Glass-Fabric Reinforced Thermoplastic Melts“, ICAC '95, Nottingham, 1995
- (5) Vestopreg® G101: Datenblatt, Hüls AG, Marl bzw. Verseidag-Indutex GmbH, Krefeld
- (6) Interglas® 91745 und 92626: Produktinformationen, Interglas-Textil GmbH, Ulm
- (7) Johnson, A. F., Keilig, Th., Pickett, A. K.: „Numerische Simulation des Formgebungsprozesses von endlosfaserverstärkten Thermoplasten“, Werkstoffwoche '96, Stuttgart, 1996