

### Numerische Simulation des Formgebungsprozesses von endlosfaserverstärkten Thermoplasten<sup>\*)</sup>

A.F. Johnson\*, T. Keilig\*, A.K. Pickett\*\*

#### Übersicht

Dieser Beitrag beschreibt die Weiterentwicklung des expliziten FE-Programms PAM-STAMP® zur Simulation des Metalltiefziehens hin zu einem Simulationswerkzeug für den Umformprozeß von endlosfaserverstärkten Faserverbundwerkstoffen mit Thermoplastmatrix. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der eigentlichen Umformung, bei der sowohl interlaminares Lagengleiten als auch Verformungen innerhalb einer Einzelschicht auftreten können. Letztere sind speziell bei doppelt gekrümmten Geometrien von Bedeutung. Die einzelnen Prepreglagen werden unabhängig voneinander durch Schalen-Elemente modelliert und ihr Materialverhalten über ein hier vorgestelltes rheologisches Werkstoffgesetz, das die thermo-viskoelastischen Eigenschaften von unidirektional und gewebeverstärkten Prepregs wiedergibt, ausgedrückt. Die Beschreibung des interlaminaren Gleitens zwischen den einzelnen Schichten sowie des Gesenkkontaktes erfolgt durch ein viskoses Reibungsgesetz. Abschließend werden Simulationsergebnisse von idealisierten Geometrien, die der Verifizierung dienen, und von einem Prototypbauteil des Flugzeugbaus aus kohlefaserverstärktem Thermoplast präsentiert.

#### Einleitung

Die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie der Automobilbau zeigen in den letzten Jahren ein erkennbares Interesse an endlosfaserverstärkten Thermoplasten. Auch sind zwischenzeitlich eine Vielzahl thermoplastischer Halbzeuge mit kontinuierlichen Verstärkungsfasern aus Glas, Kohle oder Aramid entweder in unidirektionaler (UD) Form oder als Gewebepreg auf dem Markt. Prepregs sind vorimprägnierte Faserwerkstoffe, d.h. die Matrix ist schon in einem festgelegten Verhältnis mit den Verstärkungsfasern verbunden (vom englischen Wort *preimpregnated* abgeleitet). Diese Materialien mit Thermoplastmatrix haben gegenüber den herkömmlichen duroplastischen Verbundwerkstoffen Vorteile wie Recyclingfähigkeit, erhöhte Schlagzähigkeit und vor allem kurze Taktzeiten bei der Formgebung mit Hilfe des Heißpreß- oder Diaphragma-Verfahrens. Speziell das Preßformen (engl. Thermoforming), dessen prinzipieller Ablauf in Abb. 1 dargestellt wird, bietet eine Möglichkeit zur kostengünstigen Herstellung von hochfesten Strukturbauteilen bei schnellen Produktionszyklen. So sind für Flugzeugkomponenten aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten die Herstellungskosten bereits wettbewerbsfähig geworden [1] und sind für die Automobilindustrie - nicht nur wegen der dort weit verbreiteten Pressentechnologie - weiterhin interessant. Unglücklicherweise haben bisher die hohen Umformtemperaturen sowie der nicht zu vernachlässigende Einfluß von Preßdruck und Abkühlrate auf die Bauteilqualität die Akzeptanz und eine industrielle Anwendung dieser Materialien behindert.

Beim industriellen Blechumformen kann man auf die praktische Erfahrung aus über einem Jahrhundert zurückgreifen, die heute zusätzlich durch eine ganze Reihe kommerzieller Umformsimulations-Programme unterstützt wird. Die Simulation von Formgebungsprozessen für Metallbleche (Streckumformen und Tiefziehen) mit Hilfe von Finiten Elementen (FE) wird üblicherweise durch eine große Verformungen zulassende FE-Analyse sowie durch geeignete Elementierungen und Materialgesetze für die Plastizität des Metalls sehr gut realisiert. So können selbst Effekte wie das extreme Dünnerwerden des Bleches, eventuelle Ribbildung oder das elastische Zurückfedern zuverlässig vorhergesagt werden. Um endlosfaserverstärkte

<sup>\*)</sup> EU-Förderung durch das BRITE/EURAM-Projekt Nr. BE-5092 „Thermoforming“

\* Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart

\*\* Engineering Systems International GmbH, Frankfurter Straße 13-15, D-65760 Eschborn

Thermoplaste wettbewerbsfähig zu machen, ist eine vergleichbare Software für diese Materialien notwendig, damit auch hier der Zeit- und Kostenaufwand bis zum Erreichen der Produktionsreife stark reduziert werden kann. Eine solche FE-Simulation bringt jedoch erhebliche Schwierigkeiten im Vergleich zur Metalltieftzieh-Simulation mit sich.

Die Umformung von ebenen, vorkonsolidierten Laminatplatten aus endlosfaserverstärktem Thermoplast zu fertigen Bauteilen besteht im wesentlichen aus drei Einzelschritten. Zuerst aus der Aufheizung des Halbzeuges in einem Umluftofen oder Infrarot-Heizfeld bis über den Schmelzpunkt der Matrix hinaus und anschließendem Transport in die kältere Presse, zweitens aus dem Schließen der Presse mit der Formgebung des Laminates durch das Werkzeug und zuletzt aus dem Abkühlen des umgeformten Bauteils innerhalb des Gesenks bzw. an der Luft. Der Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der Simulation des eigentlichen Umformprozesses. Hierbei sind die in dem noch über den Matrixschmelzpunkt erwärmten Laminat auftretenden Umformmechanismen weitaus komplexer als in Metallen und setzen sich hauptsächlich aus interlaminarem Lagengleiten zwischen den aufeinanderliegenden Prepreglagen und Schubverformungen innerhalb einer Einzelschicht zusammen. Für die Simulation wird jede Lage des endlosfaserverstärkten Thermoplastes mittels eines rheologischen Materialgesetzes über elastische Fasern, die von einer temperaturabhängig viskosen Matrix umgeben sind, charakterisiert. Dabei ist die exakte Analyse der Temperatur- und Druckverteilungen im Werkstoff während der gesamten Umformung unentbehrlich für die Beschreibung der mechanischen Materialeigenschaften und die Vorhersage der Qualität des fertigen Bauteils. Die Simulation sollte ferner in der Lage sein, Bereiche mit möglichen Fehlstellen wie etwa Delaminationen, Faserbrüchen oder Faltenbildungen vorab zu identifizieren.

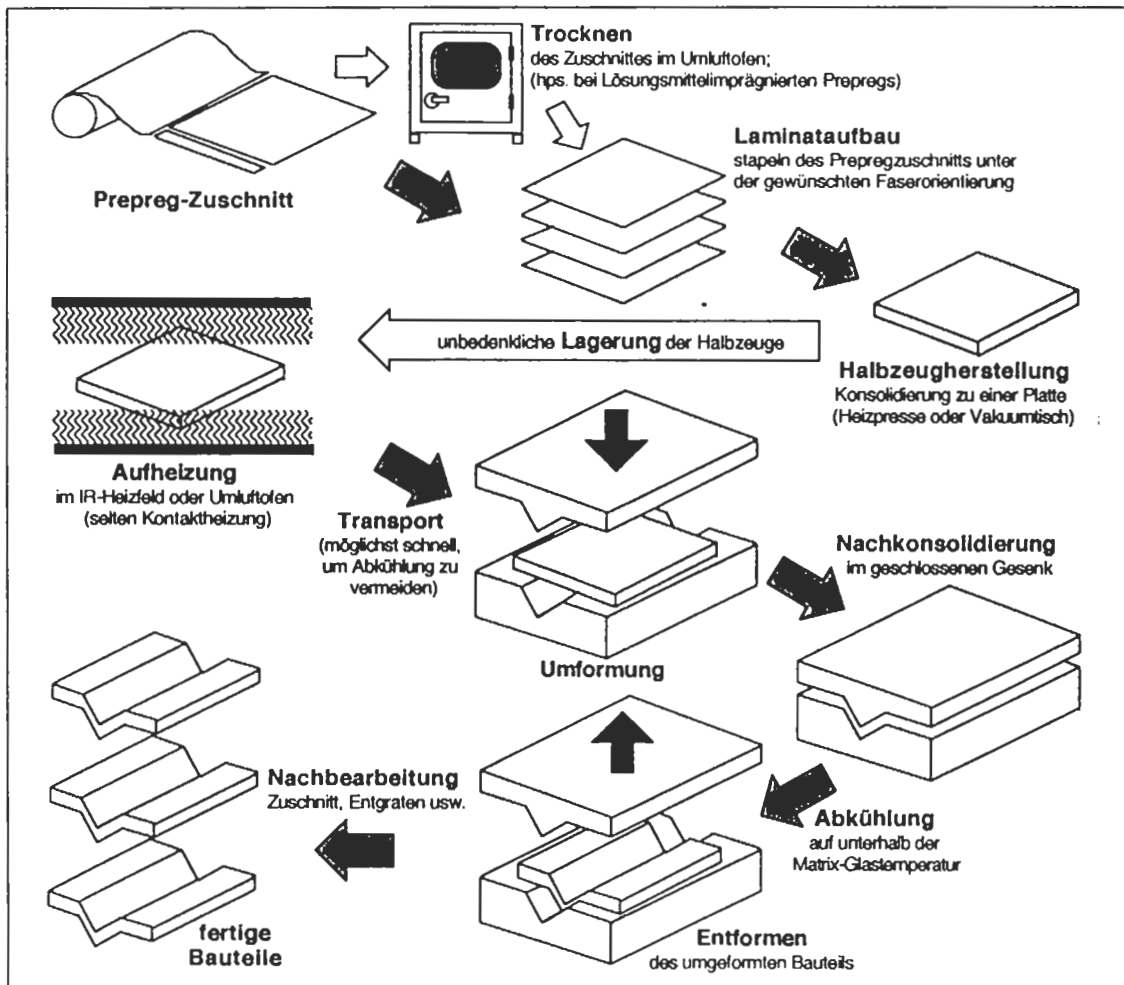


Abb. 1: Prinzipieller Ablauf der Bauteilherstellung mit Hilfe einer beheizbaren Presse (Preßformen, bzw. engl. Thermoforming).

Dieser Beitrag gibt einen Abriß über aktuelle Arbeiten, um die vorhandenen Metalltiefzieh-Simulations-Software PAM-STAMP® [2] für die Fähigkeit der Umformanalyse von endlosfaserverstärkten Thermoplasten zu erweitern. Über vorausgehende Tätigkeiten wurde in [3] und [4] berichtet. Die im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Materialien sind typische Beispiele für kommerziell verfügbare Thermoplastprepregs: Dazu gehört UD kohlefaser-verstärktes PEEK (APC2/AS4 von ICI), mit Kohle- bzw. Aramidgewebe verstärktes PEI (Cetex von TenCate) und glasgewebeverstärktes PA12 (Vestopreg von Verseidag).

### Die Umformmechanismen

Die dominierenden Verformungs- und Fließmechanismen, die in endlosfaserverstärkten Thermoplasten auftreten können, sind in Abb. 2 dargestellt. Die Umformung findet hauptsächlich durch eine Kombination von interlaminarem Gleiten zwischen den aufeinanderliegenden Prepreglagen und durch Schubverformungen innerhalb einer Einzelschicht statt. Das durch flächigen Druck hervorgerufenen transversale Faserfließen kann in guter Näherung mit der Annahme von Inkompressibilität, d.h. Volumenkonstanz, wiedergegeben werden. Ein Fließen der Matrix durch die Fasern hindurch ist aufgrund der hohen Viskosität der Thermoplastschmelze nicht sehr ausgeprägt.

Bei der Umformung von einfach gekrümmten Bauteilen ist das interlaminare Lagengleiten, bei dem sich die einzelnen Prepreglagen relativ zueinander verschieben, der überwiegende Verformungsmechanismus. Der hierfür verfolgte Lösungsansatz besteht darin, die Lagen unabhängig voneinander durch Schalen-Elemente zu modellieren und das Gleiten zwischen den Einzelschichten über ein viskoses Reibungsgesetz zu formulieren. Bei der Umformung von doppeltgekrümmten Geometrien kommt zu den Relativverschiebungen der einzelnen Prepreglagen untereinander noch eine zusätzliche Schubverformung innerhalb jeder Einzelschicht hinzu. Diese innere Schubverformung führt dazu, daß sich in UD-Lagen die Faserorientierung ändert und in gewebeverstärkten Prepregs sich der Zwischenfaserwinkel deutlich verkleinert. Um diese ebenen Verformungen innerhalb der Einzellagen modellieren zu können, ist ein neues Materialgesetz erforderlich, das dieses Verhalten von faserverstärkten Schichten über rheologische Beziehungen beschreibt.

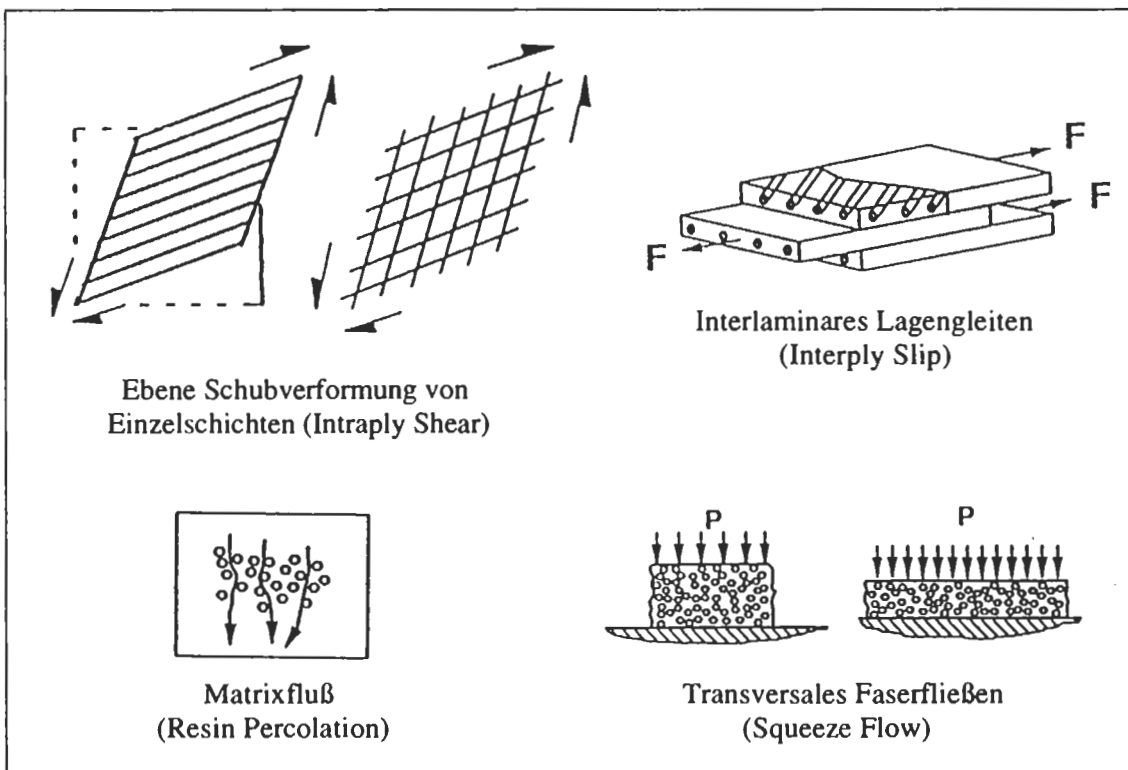


Abb. 2: Die dominierenden Umformmechanismen in endlosfaserverstärkten Thermoplasten.

## Rheologische Werkstoffgesetze für endlosfaserverstärkte Thermoplast-Prepregs

Einen umfassenden Überblick über aktuelle Literatur zur theoretischen Modellbildung für das Umformen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten wird von O'Bradaigh [5] gegeben. Das hier vorgeschlagene Modell basiert auf der verallgemeinerten Theorie nach Rogers [6], in der die viskoelastischen Prepreglagen als faserverstärkte, viskose Flüssigkeit im ebenen Spannungszustand idealisiert werden. Da in dieser Theorie die unterschiedlichen Beiträge von viskoser Matrix und elastischen Verstärkungsfasern getrennt erfaßt werden, bietet sie die einfachste Möglichkeit zur Beschreibung von endlosfaserverstärkten Thermoplast-Prepregs durch ein idealisiertes Materialgesetz. Für UD-Prepregs ist der ebene Spannungszustand in der Lagrange'schen Schreibweise mit inkrementalen Dehnungen wie folgt gegeben:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\eta_L(\dot{\vartheta}) & 2\eta_T(\dot{\vartheta}) & 0 \\ 2\eta_T(\dot{\vartheta}) & 4\eta_T(\dot{\vartheta}) & 0 \\ 0 & 0 & 2\eta_L(\dot{\vartheta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} \\ \dot{\varepsilon}_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{12} \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Hierbei sind für jedes Schalen-Element  $\sigma_{ij}$  die Spannungskomponenten,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  die Komponenten des Geschwindigkeits-Gradienten (bzw. der Dehnungsrate) und  $\varepsilon_{ij}$  die inkrementalen Lagrange'schen Dehnungskomponenten. Des weiteren ist  $\eta_L$  die Longitudinal-Viskosität des Prepregs in Faserrichtung,  $\eta_T$  die Transversal-Viskosität des Prepregs quer zu den Fasern und  $E$  der E-Modul des Prepregs in Faserrichtung. Die Einzelkomponenten der Spannung, Dehnung und Dehnungsgeschwindigkeit sind auf das lokale kartesische Koordinatensystem  $(x_1, x_2)$  des jeweiligen Elements bezogen, wobei die  $x_1$ -Achse in Faserrichtung zeigt. Die bedeutsamen viskoelastischen Effekte in Polymerschmelzen werden im Modell über eine Temperatur- und Dehnungsratenabhängigkeit der beiden Prepregviskositäten berücksichtigt.

Dieses Modell wurde von Johnson [7] durch die Einführung einer zweiten Faserrichtung und einer weiteren Viskosität auf gewebeverstärkte viskose Schichten erweitert. Hierbei muß besonders berücksichtigt werden, daß sich während der ebenen Schubverformung eines Gewebes der Winkel  $\phi$  zwischen der Kett- und Schußrichtung von anfänglich  $90^\circ$  zunehmend verringert. Durch das Mitschleppen der in die viskose Matrix eingebetteten Fasern ist eine solche Winkeländerung auch dann der Fall, wenn ein idealisiertes Fluid-Element gedehnt wird. In [8] wird dieser Effekt ausführlich diskutiert und durch Streifen-Zugversuche mit Thermoplast-Prepregs gezeigt, daß sich dieser Zwischenfaserwinkel  $\phi$  in Abhängigkeit vom jeweiligen Bindungstyp des Gewebes auf bis zu  $50^\circ$  oder noch weiter reduzieren kann. Da es in Gewebe-Prepregs keine so ausgeprägte Richtungsabhängigkeit wie in UD-Prepregs gibt, genügt zur Beschreibung des Verformungsverhaltens eine Viskosität. Das Materialgesetz mit  $\eta_2=\eta_3=0$  ergibt sich in der Lagrange'schen Schreibweise mit inkrementalen Dehnungen somit wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\eta_1(\dot{\vartheta}) & 2\eta_1(\dot{\vartheta}) & 0 \\ 2\eta_1(\dot{\vartheta}) & 4\eta_1(\dot{\vartheta}) & 0 \\ 0 & 0 & 2\eta_1(\dot{\vartheta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} \\ \dot{\varepsilon}_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{12} \end{bmatrix} + E_1 \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + E_2 \begin{bmatrix} m^4 & m^2 n^2 & m^3 n \\ m^2 n^2 & n^4 & m n^3 \\ m^3 n & m n^3 & m^2 n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hierbei ist nun  $\eta_1$  die charakterisierende Viskosität für ein Gewebe-Prepreg,  $E_1$  und  $E_2$  sind die E-Moduli des Gewebe-Prepregs in Kett- bzw. Schußrichtung sowie ferner  $m=\cos\phi$  und  $n=\sin\phi$ . Im kartesischen Elementen-Koordinatensystem  $(x_1, x_2)$  zeigt die  $x_1$ -Achse nun in eine der beiden Faserrichtungen und die zweite Faserrichtung verläuft im Winkel  $\phi$  dazu.

Nachdem in den Gleichungen (1) und (2) die Summe eines viskosen Matrix-Terms und eines elastischen Faser-Terms gebildet wird, muß noch darauf hingewiesen werden, daß sich die Werte der Viskositätskoeffizienten für Thermoplast-Prepregs deutlich von denen der reinen Polymermatrix unterscheiden. Mit Hilfe speziell entwickelter Testverfahren konnten die Prepreg-Viskositäten bestimmt werden [7, 8]. Die so gefundenen Viskositäten für Thermoplast-Prepregs liegen etwa 3 bis 4 Größenordnungen über denen der reinen Matrixviskosität und weisen eine starke Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit auf.

### **Beschreibung der interlaminaren viskosen Reibung**

Das interlaminare Gleitverhalten wird durch ein viskoses Reibungsgesetz wiedergegeben, das experimentell bestimmt wurde [9] und die interlaminare Schubspannung wie folgt beschreibt:

$$\tau = \tau_0 + k v^n \quad (3)$$

Hierbei ist  $\tau_0$  die Fließschubspannung,  $v$  die Relativgeschwindigkeit und die zwei Parameter  $k$  und  $n$  erfassen die viskose Reibung und müssen empirisch festgelegt werden. Die viskose Reibung ist abhängig von der Temperatur, vom aufgebrachten Normdruck, von der Relativgeschwindigkeit und von der Differenz im Faserwinkel zwischen den beiden beteiligten Lagen. Zur Bestimmung des Verhaltens der Laminatlagen bei Gesenkkontakt wurden ebenfalls Versuche durchgeführt [9] und ein der Gleichung (3) ähnliches Reibungsgesetz formuliert.

### **Wärmeübertragung und Wärmeleitung**

Während des Thermoformens von über den Matrixschmelzpunkt erhitzten endlosfaserverstärkten Thermoplasten kommt es während der Formgebung stellenweise zur raschen Abkühlung infolge des Gesenkkontaktes. Somit sind Temperaturverteilung und Wärmetransport sehr wichtige Prozeßparameter und müssen unbedingt korrekt modelliert und richtig berechnet werden. Ein Überblick über die maßgeblichen Wärmetransportgleichungen ist schon früher in [3] veröffentlicht worden. Nun sind diese in den FE-Code von PAM-STAMP<sup>®</sup> implementiert und verifiziert. Die Hauptmerkmale dieser Wärmeleitungs-Berechnung sind ein anisotropes 2D-Modell für den Wärmefluß in den Prepreg-Lagen und ein eindimensionales Modell für den Wärmetransport durch den Laminatstapel und für den Gesenkkontakt. Somit sind zur Beschreibung drei Wärmeleitungskoeffizienten notwendig: Je einer in Faserrichtung und quer dazu sowie einen für den Wärmetransport durch die Dicke. Die so berechneten Temperaturen der einzelnen Schalen-Elemente nehmen über die Temperaturabhängigkeit der Prepreg-Viskositäten in (1) und (2) sowie über das interlaminare viskose Reibungsgesetz (3) direkt Einfluß auf das Umformverhalten des Materials.

### **Ziele und Funktion der numerischen Simulation**

Bevor ein Bauteil aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten erfolgreich in Serie gefertigt werden kann, sind im allgemeinen Umformversuche mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand notwendig. Eine numerische Simulation dieses Formgebungsprozesses ermöglicht es, schon während der Bauteilkonstruktion auf die speziellen Fertigungsprobleme endlosfaserverstärkter Thermoplaste und die damit verbundenen Aspekte der Werkzeugauslegung Rücksicht zu nehmen.

Zur Diskretisierung der umzuformenden Laminatplatte und der Werkzeuge werden konventionelle Schalen-Elemente benutzt und die Umformung wie ein dynamisches Problem gelöst. Die meisten der kommerziell verfügbaren Metall-Umform-Simulationen basieren entweder auf der impliziten oder expliziten FE-Methode. Jedes der beiden Verfahren hat bestimmte Vorteile und Restriktionen [10]. Hier wurde die explizite Methode bevorzugt, weil das Kontaktproblem zwischen den gestapelten Einzellagen, welches ein wesentlicher Teil der Lösung dieser Aufgabe darstellt, durch eine explizites Integrationsverfahren einfacher berechnet und günstiger gehandhabt werden kann. Da die Simulation des interlaminaren Lagengleitens, das ja einen der Hauptverformungsmechanismen darstellt, nicht durch ein einzelnes Schalen-Element erfolgen kann, wird die Laminatplatte durch einen Satz aufeinandergeschichteter Schalen-Elemente modelliert, deren Kontakt untereinander und zum Werkzeug über ein temperaturabhängiges, viskoses Reibungsgesetz nach Gleichung (3) hergestellt wird. Der Hauptvorteil der expliziten Methoden liegt darin, daß die globale Steifigkeitsmatrix nicht berechnet und invertiert werden muß, und statt dessen die Lösung elementweise aufgebaut werden kann. Diese Methoden zeichnen sich bei nichtlinearen Problemen von kurzer Zeitdauer durch hohe Robustheit aus. Bei der Integration arbeitet die Schrittweitensteuerung auf der Zeitachse in Abhängigkeit von der Elementmodellierung und der Materialeigenschaften. Zur Vermeidung von Durchdringungen und zur Kontrolle der Gleitbedingungen werden zeitweise zusätzliche äußere Kräfte, ähnlich einer Straf-Funktion, an den Schalen-Elementen aufgebracht.

Ausgehend von den rheologischen Modellgleichungen (1) und (2) wurde ein temperaturabhängiges viskoelastisches Materialgesetz entwickelt und in den expliziten FE-Code der schon bestehenden Simulations-Software PAM-STAMP® für das Metalltiefziehen implementiert, um so auch das ebene Verformungsverhalten zu charakterisieren. Jede Einzellage ist durch ein Kontinuum modelliert, das zum einen aus einer inkompressiblen Newton'schen Flüssigkeit besteht und zum anderen aus einem Satz (für UD-Prepregs) bzw. aus zwei Sätzen (für Gewebeverstärkungen) an hochsteifen Fasern. Diese Verstärkungsfasern werden als elastisch angenommen und vom Fluß der viskosen Matrix mitgeschleppt.

### Numerische Simulationen und Validierung

In [4] wurde schon eine Reihe wegweisender Simulationen präsentiert. So bestätigte unter anderem eine 2-stufige Umformung eines Hutprofils aus einem 7-lagigen UD-Laminat das viskose Reibungsgesetz für das interlaminare Lagengleiten und den Gesenkkontakt. In einem Gewebezugversuch (Abb. 3) konnte das rheologische Gewebemodell seine Richtigkeit und Zuverlässigkeit beweisen: Durch die Einführung eines Grenzwertes für den Winkel  $\phi$ , bei dem eine weitere Schubverformung blockiert wird, kann sogar über die ebene Gewebescherung hinaus die Faltenbildung erfolgreich simuliert werden, welche für Gewebeprepreps das wohl wichtigste Versagenskriterium während der Umformung bildet. Durch Umformsimulation von zylindrischen Körpern konnte auch die erfolgreiche Modellierung von Faserorientierungen bestätigt werden. Alle diese Testfälle basieren jedoch auf ebenen Deformationen oder einfach gekrümmten Geometrien.

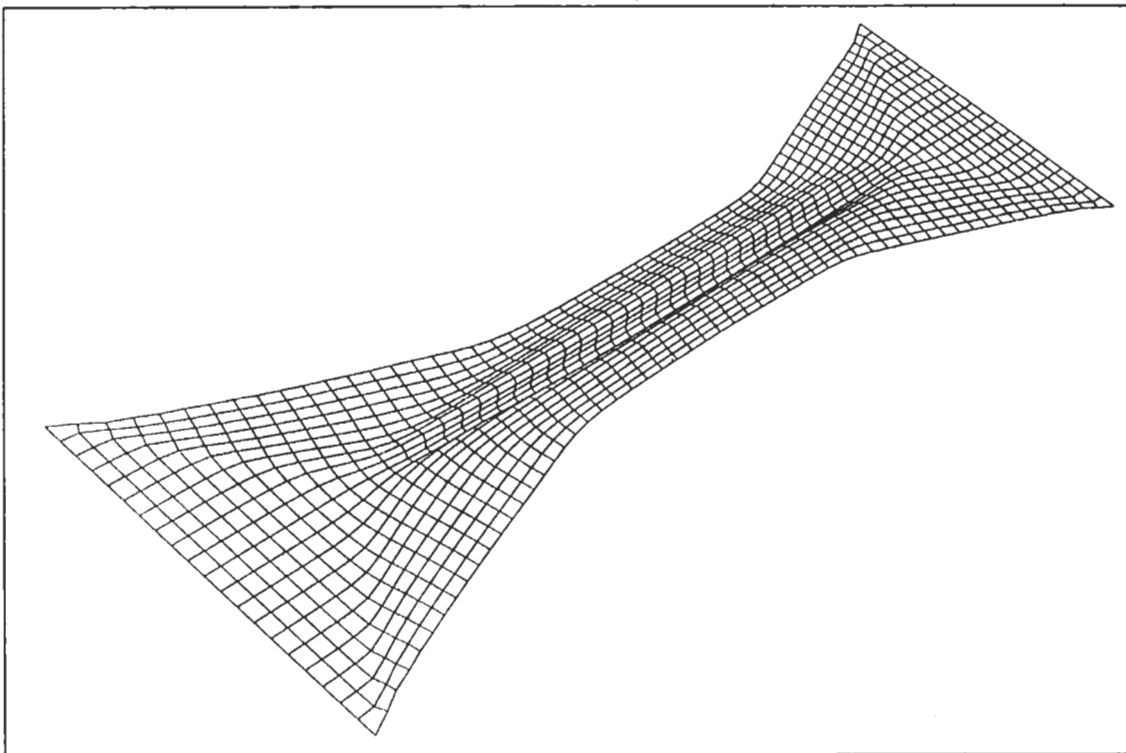
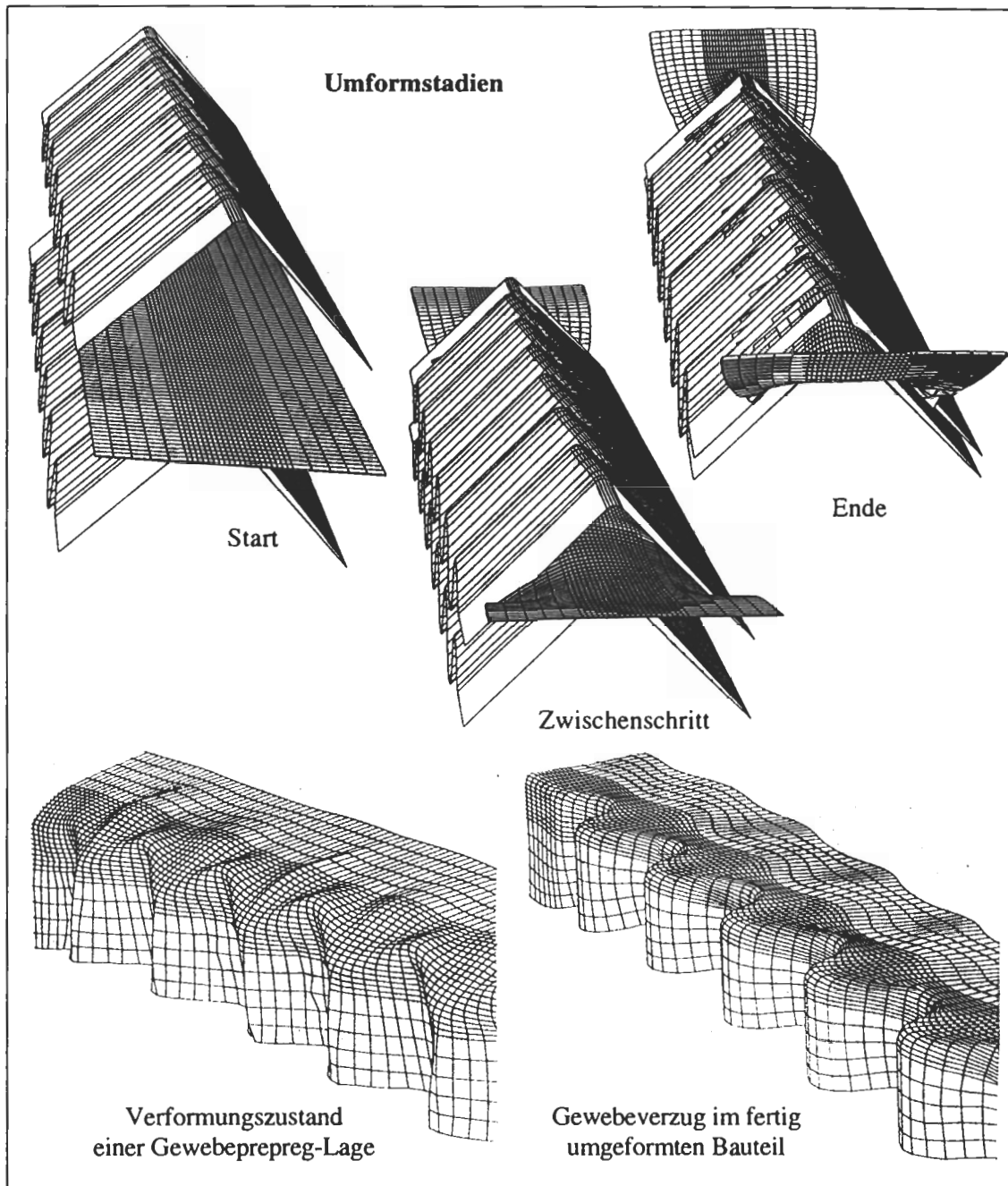


Abb. 3: Faltenbildung bei einem simulierten Gewebezugversuch in perspektivischer Ansicht.

In diesem Beitrag werden nun Simulationsergebnisse eines wesentlich komplexeren, doppeltgekrümmten Bauteils als anspruchsvollerer Test für die Effizienz und die Stabilität der Software vorgestellt. Es handelt sich um ein Winkelstück, das erforderlich ist, um eine sinusförmige Aussteifung eines Hubschrauberbodens mit ebenen Flanschen zu versehen. Hergestellt wird das Bauteil durch Preßformen in einem Aluminium-Gesenk aus vier Lagen Kohlefasergewebe/PEI-Prepreg. Wegen der doppeltgekrümmten Form ist das ausgewählte Bauteil sowohl für die Umformbarkeit des endlosfaserverstärkten Thermoplastmaterials



**Abb. 4:** Umformsimulationen eines Winkelbauteils aus endlosfaserverstärktem Thermoplast.

als auch für die Leistungsfähigkeit der Software eine Herausforderung. Elementare geometrische Betrachtungen zeigen, daß es nur mit einer Gewebeorientierung von  $45^\circ$  zur Längsachse des Bauteils möglich ist, die geforderte Kontur ohne umfangreiche Faltenbildung herzustellen. Nur so ist die zur Drapierung der sinusförmigen Seite notwendige Dehnung von 25% erreichbar. In Abb. 4 wird neben drei Gesamtansichten der Simulation in verschiedenen Stadien der Umformung auch die Verformung einer einzelnen Prepreg-Lage des Thermoplastmaterials gezeigt. Von den beiden Werkzeughälften ist lediglich die Gesenkooberfläche modelliert, so daß die Simulation nur mit Schalen-Elementen auskommt. Die Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Faltenbildung des Gewebes auf der ebenen Seite. Dort werden auch die größten Schubdehnungen, die dem Grenzwinkel der Gewebescherung entsprechen, berechnet. Im fertig umgeformten Bauteil ist auf der ebenen Seite des Winkels das Gewebe nahezu in orthogonaler Form geblieben, auf der sinusförmigen Seite jedoch wird der Zwischenfaserwinkel durch Gewebeverzug stellenweise auf bis zu  $50^\circ$  reduziert.

Bei der DLR wurden einige Winkelstücke in einer Heißpresse umgeformt. Die Parameter hierbei waren eine Ausgangs-Temperatur des Laminates von 340 °C, eine Temperatur des Aluminiumgesenks von 190 °C, ein maximaler Preßdruck von 60 bar sowie eine Umformzeit von 3 Sekunden. So war es möglich, die detaillierten Vorhersagen der Umformsimulation mit den tatsächlichen Bauteilen zu vergleichen. Dabei wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Faserwinkeln festgestellt. Auch die beginnende Faltenbildung konnte am realen Bauteil beobachtet werden. Die Scherung des Gewebeprepreps bringt einen Dickenzuwachs mit sich, so daß die hergestellten Bauteile lokale Dickenunterschiede aufweisen, die mit den berechneten Dicken ebenfalls sehr gut übereinstimmen.

### **Zusammenfassung**

Für das Preßformen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten wurde eine FE-Simulation entwickelt. Um das Fließverhalten des Laminates unter dem Druck des sich schließenden Gesenks bis hin zum Wiedererstarren der Matrix infolge Abkühlung genau beschreiben zu können, wurden signifikante Änderungen an der vorhandenen Software PAM-STAMP® für das Metalltieftziehen erforderlich. Ein eigens entwickeltes viskoses Reibungsgesetz für die Kontaktflächen zwischen den Einzellagen untereinander bzw. dem Gesenk, ein thermo-viskoelastisches Materialmodell für die ebenen Verformungen der einzelnen Prepreglagen sowie ein geeignetes Modell zur Berechnung der Wärmeleitung wurden implementiert. So können selbst Änderungen in der Faserorientierung, transversales Faserfließen, Delaminationen und Schubverformungen in Geweben inklusive der eventuell damit verbundenen Faltenbildung simuliert werden. Abkühlungseffekte sind durch die Wärmeübertragung zwischen Laminat und Gesenk sowie durch temperaturabhängige Matrixviskositäten berücksichtigt. Zur Verifizierung und Optimierung der FE-Simulation wurden für eine Vielzahl von Testgeometrien Rechenläufe durchgeführt. In diesem Beitrag werden nun die Ergebnisse von Umformsimulationen eines industriellen Prototyp-Bauteils vorgestellt. Dadurch wird gezeigt, daß diese Simulations-Software die Leistungsfähigkeit besitzt, ein nützliches und unverzichtbares Werkzeug für die Composite-Industrie zu werden.

### **Literatur**

- [1] W. Werner, „Cost Effectiveness of Structural Applications of Fibre Reinforced Thermoplastics“, Int. Symp. Advanced Materials for Lightweight Structures, ESTEC, SP-336, S. 185-190, Noordwijk NL, 25.-27. März 1992
- [2] PAM-STAMP®, Engineering Systems International SA, 20 Rue Saarinen, F-94588 Rungis
- [3] A.K. Pickett, T. Queckbörner, „An Explicit FE-Solution for the Forming Prediction of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Sheets“, Composites Manufacturing, Vol. 6, Nr. 3/4, S. 237-243, September 1995
- [4] A.K. Pickett, T. Queckbörner, P. de Luca und A.F. Johnson, „Development, Validation and First Industrial Numerical Results of a Finite Element Code to Simulate the Thermoforming Process“, ICAC '95, Nottingham UK, 6.-7. Sept. 1995
- [5] C.M. O'Bradaigh, „Sheet Forming of Composite Materials“, Flow Phenomena in Polymeric Composites, S.G. Advani (ed), Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995
- [6] T.G. Rogers, „Rheological Characterization of Anisotropic Materials“, Composites, Vol. 20, Nr. 1, 1989
- [7] A.F. Johnson, „Rheological Model for the Forming of Fabric-Reinforced Thermoplastic Sheets“, Composites Manufacturing, Vol. 6, No. 3/4, S. 153-160, September 1995
- [8] A.F. Johnson und E. Costalas, „Forming Models for Fabric Reinforced Thermoplastics“, ICAC '95, Nottingham UK, 6.-7. Sept. 1995
- [9] A.M. Murtagh und P.J. Mallon, „Shear Characterization of UD and Fabric Reinforced Thermoplastic Composites for Pressforming Applications“, ICCM-10, Whistler, Canada, August 1995
- [10] R.D. Cook, D.S. Malkus und M.E. Plesha, „Concepts and Applications of Finite Element Analysis“, John Wiley & Sons Inc., New York, 1989