

SIMULATION DER VERTEILUNG VON FASERVOLUMENGEHALTEN IN DER KOMBINIERTEN PREPREG- UND INJEKTIONSTECHNOLOGIE

R. Kaps, A. Quappen, M. Wiedemann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR,
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ÜBERSICHT

Die Kombinierte Prepreg- und Injektionstechnologie (CPI: Combined Prepreg and Injection) ermöglicht die Herstellung kostengünstiger, integraler Composite-Baugruppen unter gleichzeitiger Verwendung von Prepreghalbzeugen und trockenen Faserhalbzeugen. Die in dieser Technologie angewendeten Verfahren gehören zur Klasse der Cocuringverfahren, in denen die Aushärtung der Matrixsysteme der beteiligten Bauteile für den Fügeprozess verwendet wird.

Die hier vorgestellte Prozesssimulation sollte Fragestellungen zum Zusammenhang von Prozessparametern und Lamineigenschaften beantworten, die sich bei der Herstellung von Bauteilen in der CPI-Technologie ergeben. Diese Eigenschaften betreffen in erster Linie die Faservolumenanteile des Prepregs in der Nähe der Fügezonen von Nass- und Injektionsbauteilen. Diese können prozessbedingt durch Fließbewegungen des Prepregharzes vor der Füllung der trockenen Faserpreforms erhöhte Werte annehmen und erlaubte Limits überschreiten. Die Grundlage für die Ermittlung der Fließbewegungen ist das Kompressionsverhalten eines Faserstapels auf Druck senkrecht zur Laminebene. Gegenüber den meisten bekannten Simulationen von VARI-Verfahren erfolgt hier die Kompaktierung des Fasermaterials in Richtung des Harzflusses. Die Simulation wurde für den eindimensionalen Fall in Matlab programmiert.

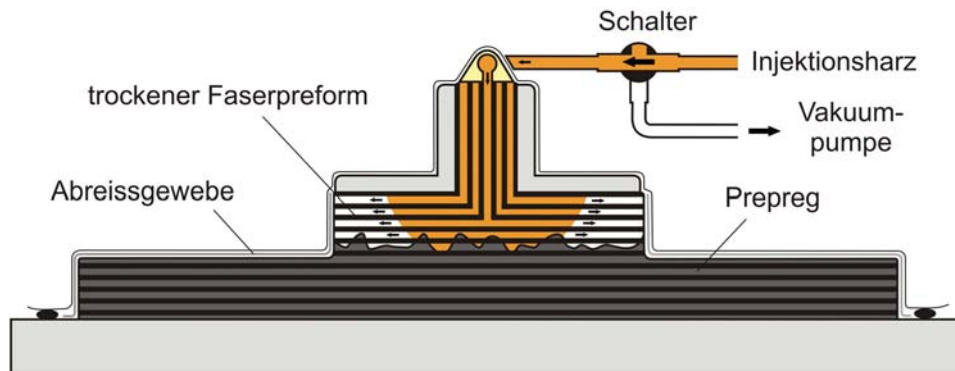


Bild 1.1: Grundprinzip eines CPI-Verfahrens zur Herstellung einer stringerversteiften Prepregplatte

1. EINLEITUNG

Kosteneinsparungen bei der Fertigung von Baugruppen in Prepregtechnologie sind durch die Integration verschiedener Prepregkomponenten vor dem Aushärtprozess zu einer Baugruppe möglich. Die CPI-Technologie erweitert das Kostensparpotenzial, indem die durch komplexe Geometrien kostenintensiven Teile einer integralen Prepregstruktur teilweise durch kostengünstige LRI-Bauteile ersetzt werden. Die trockenen Fasern werden als Bestandteil der Baugruppe mit den Prepreganteilen in einem Injektionsprozess mit Harz gefüllt. Die guten mechanischen Eigenschaften in den Bereichen mit einfachen Geometrien werden weiterhin durch die Verwendung von Prepreganteilen erreicht.

Eine Voraussetzung für die Zertifizierung eines Verfahrens dieser Technologie ist die Erfüllung der Qualitätsnormen für Verbundwerkstoffe. Diese schreiben Grenzen für maximale und minimale Faservolumenanteile vor. In einem CPI-Verfahren

können sich bei ungünstig gewählten Prozessparametern deutlich überhöhte Faservolumenanteile ergeben. Zur Ermittlung des günstigen Prozessfensters sollte der Prozess mittels einer eindimensionalen Simulation analysiert und charakterisiert werden.

Neben der Modellbildung waren verschiedene Besonderheiten zu berücksichtigen, die in dem speziellen Fertigungsverfahren begründet sind. Da das Prepregharz im Laminat fertigungstechnisch bedingt schon zu einem bestimmten Grad vorvernetzt ist, steigt die Viskosität innerhalb der Zeiträume der Prozessschritte aufgrund weiterer Polymerisation maßgeblich an. Dieses Verhalten hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Simulation und muss daher berücksichtigt werden. Eine weitere Besonderheit ist die Modellierung des Übergangs zweier Matrixharzsysteme und deren Viskositäten.

Der komplette Prozesszyklus sieht eine erste Phase des Harzübergangs in die trockenen Fasern

des Injektionsbereiches vor (Ausbluteneffekt bzw. englisch „bleeding“), dem sich die Injektion der trockenen Restfasern als zweite Phase anschließt. Die dritte Phase beginnt, wenn sich die Harzfronten treffen. Das ausgeblutete Prepregharz wird aufgrund des sich aufbauenden Harzdruckes des Injektionsharzes zurückgedrängt, so dass der Faservolumengehalt im ausgebluteten Bereich wieder sinkt.

1.1 Ausbluteverhalten des Prepregharzes

Der grundlegende Aufbau von Standard CPI-Baugruppen ist relativ simpel und beginnt jeweils mit der Ablage der Prepreglagen und der Herstellung des zu füllenden Faserpreforms. Die Prepreglagen werden keiner vorherigen Behandlung, wie z.B. einer Vorkompaktierung unterworfen. An den Stellen, an denen der trockene Faserpreform Kontakt mit der Prepreghaut hat, wird die prozessbedingte Abdeckung des Prepregs mit Abreißgewebe, Trennfolie und Breather unterbrochen. Nach der Positionierung des Faserpreforms wird der gesamte Aufbau mit einer Siegelfolie abgedeckt und evakuiert. Nach dem Erreichen der Injektionstemperatur und des Injektionsdruckes wird das Injektionsharz über die Injektionslinien in den Preform injiziert. Ein solcher Aufbau ist in Bild 1.1 als Prinzipskizze dargestellt.

2. MODELLBILDUNG

Der Kompaktierungs- und Ausblutevorgang stellt den zentralen Kern des zu simulierenden Prozesses dar. Ein Teil des Harzüberschusses fließt aufgrund der Erhöhung des Faservolumengehaltes des Prepregs (Kompaktierung) in das trockene Fasermaterial. Dabei unterscheidet sich dieser Fließprozess von denen, die in vielen kommerziellen Programmen zur RTM-Simulation zugrunde gelegt werden.

Der physikalische Vorgang in der Kompaktierungssimulation für das Ausbluten eines Prepregs ist der gleiche, wie die Füllung eines flächigen und dünnen Fasermaterials im VARI-Verfahren. In einem VARI-Verfahren wird das Harz durch eine externe Leitung zur Verfügung gestellt. Die Besonderheit in dieser Ausblutesimulation ist die Übereinstimmung von Kompaktierungsrichtung des Fasermaterials und der Fließrichtung des Harzes.

In kommerziellen Programmen zur RTM-Simulation werden konstante und unbewegliche Faserlagen angenommen, die sich in einer Werkzeugkavität mit konstantem Volumen befinden. Mit diesen Bedingungen ist auch der Faservolumengehalt (FVG) des Fasermaterials konstant. Der Fluss des Mediums entsteht durch einen konstanten Druck bzw. einem konstanten Volumenstrom, der am Injektionspunkt angelegt wird. Bei einem eindimensionalen Fließproblem mit konstantem Injektionsdruck ist die Fließgeschwindigkeit proportional zur Druckdifferenz aus Injektionsdruck und dem Gasdruck im trockenen Fasermaterial. In zwei wesentlichen Zuständen wird der grundlegende Unterschied der RTM-Simulation und der

Simulation eines VARI-Verfahrens, stellvertretend für eine Kompaktierungssimulation, deutlich. Wenn der Injektionsdruck P_{inj} abgeschaltet wird stoppt bei der RTM-Simulation augenblicklich die Fließfront aufgrund des fehlenden Druckgradienten.

Der andere Zustand beschreibt den Fall, wenn bei der RTM-Simulation die Fließfront das Ende des flächigen Fasermaterials erreicht hat. Wenn das komplette Fasermaterial gefüllt ist, verschwindet der Druckgradient sofort und es liegt ein statische Zustand vor. An jeder Stelle des getränkten Fasermaterials herrscht der Injektionsdruck P_{inj} vor. In beiden Fällen treten im VARI-Verfahren andere Druckverteilungen des Harzes auf. Bei der Abschaltung des Injektionsdruckes beginnt das Injektionsharz bei den VARI-Verfahren sich im gesamten Fasermaterial zu verteilen. Es stellt sich ein dem bereits injizierten Harzvolumen entsprechender Faservolumengehalt ein. Gleiches gilt, wenn die Fließfront das Preformende erreicht und sich langsam der Zielfaservolumengehalt einstellt.

2.1 Definition des Netzwerkverhaltens

Prinzipiell können verschiedene Vorgehensweisen zur Berechnung von Kompaktierungssimulationen gewählt werden. Es besteht die Möglichkeit der Wahl, die Kompaktierung und damit die Veränderung von Faservolumenanteilen durch Verschiebung der Knotenpunkte (Netzdeformation) darzustellen oder die Elementierung konstant zu lassen und in den Elementen neben dem Harz auch die Fasern fließen zu lassen. In Bild 2.1 links ist diese Situation als eindimensionales System dargestellt. Zunächst ist das Prepreg mit den unkompaktierten Faserlagen (erste Spalte) in den kompaktierten Zustand überführt (zweite Spalte). Mit dem gestiegenen Faservolumengehalt der trockenen Fasern sinkt die Zelhöhe. In der dritten Spalte beginnt die erste Prepregzelle mit der Abgabe von Harz in die erste Zelle mit trockenen Fasern.

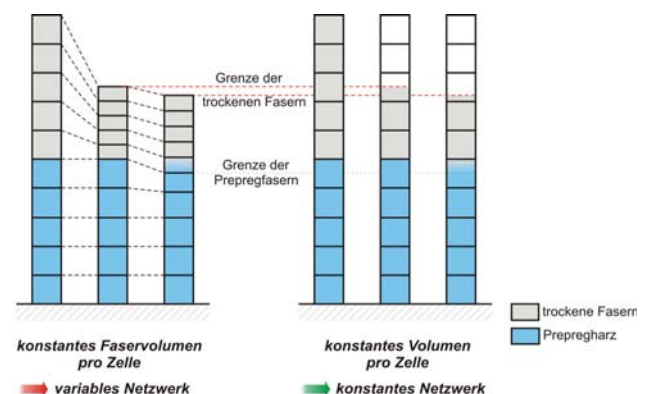


Bild 2.1: Vergleich des faservolumenabhängigen Netzwerkverhaltens

Bei der hier vorgestellten Simulation wird der zweite Ansatz verfolgt. Dieser Ansatz verspricht

durch die Verwendung konstanter Volumina und fester Geometrien eine geringere geometrische Komplexität, besonders in Hinblick auf eine Erweiterung der Simulation auf mehrere Dimensionen. Die Verwendung eines konstanten Netzwerkes ist in der rechten Skizze in Bild 2.1 dargestellt.

2.2 Grundprinzip der Fließsimulation

Bei der Analyse der hier durchzuführenden Kompaktierungssimulation wird ein mehrlagiges Prepreggelege angenommen, das mit einer gleich großen Anzahl trockener Faserlagen bedeckt ist. Die trockenen Faserlagen haben die gleichen Kompaktierungs- und Permeabilitätseigenschaften wie die Prepregfasern. Dieser Aufbau liegt auf einer Werkzeugoberfläche und wird einseitig mit einer flexiblen Membran abgedeckt. Der gesamte Aufbau wird mit einer Evakuierungsleitung versehen und an den Rändern luftdicht gesiegelt. Das Prepreggelege soll ein unidirektionales Gelege (UD-Gelege) sein, dessen faserparallele Ausrichtung mit der x-Richtung des globalen Koordinatensystems übereinstimmt. Die transversale Faserrichtung liegt in der y- und in der z-Richtung, wobei die Kompaktierung des Fasermaterials nur in z-Richtung erfolgt.

Außerhalb dieser Siegelung herrscht ein Druck P (z.B. der Druck in einem Autoklaven), der sich über die flexible Membran in jeden Punkt des Gelegeaufbaus überträgt. Gutowski [5] und Davé [4] nutzen diese Annahme und beschreiben den Druck an jeder Stelle im Prepreglaminat als Summe aus dem Druck des Harzes p_r und dem Druckanteil σ_f , der durch das Faserbett getragen wird:

$$(1) \quad P = p_r + \sigma_f$$

Für die kann auch die sogenannte Federanalogie entsprechend den Darstellungen in Bild 2.2 herangezogen werden. In dieser Federanalogie wird angenommen, dass ein trockenes Faserpaket beim Aufbringen eines bestimmten Kompressionsweges z eine, von der Art des Faserhalbzuges abhängige Federspannung $\sigma_f(x)$ erzeugt.

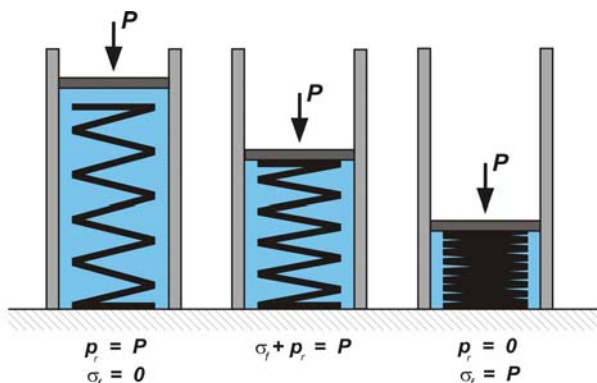


Bild 2.2: Federanalogie zur Beschreibung der FVG-abhängigen Faser- und des Harzdrücken

In Bild 2.2 ist das Faserpaket als Feder dargestellt und komplett von Harz bzw. einer inkompressiblen Flüssigkeit eingehüllt. In der linken Darstellung ist das Faserpaket vollständig entspannt und erzeugt keine Kräfte. Der Druck P des Stempels wird vollständig vom Harzdruck p_r aufgefangen. In der mittleren Darstellung ist das Faserpaket leicht gespannt, so dass der Stempeldruck P sowohl vom Flüssigkeitsdruck des Harzes als auch von der Faserspannung σ_f getragen wird. Der Harzdruck wird zu Null, wenn die Fasern auf Block liegen bzw. die Faserspannung σ_f genau dem Stempeldruck P entspricht (rechte Darstellung).

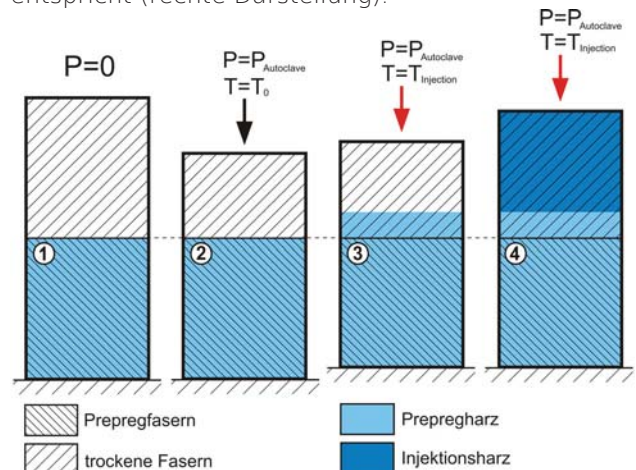


Bild 2.3: Kompaktierungs und Füllungsablauf in einer CPI-Simulation

Wenn die Abhängigkeit der Faserspannung vom Kompaktierungsweg und der Faservolumengehalt zweier Orte bekannt sind, lässt sich über den Druckunterschied die Fließgeschwindigkeit des Harzes zwischen den beiden Orten bestimmen. Eine Simulation auf Basis dieses Kompaktierungsmodells kann sowohl das Ausbluten eines Prepregs als auch die Injektion von trockenem Fasergelegen berechnen. Im vorliegenden Fall soll ein kombinierter Prozess aus dem Ausblutevorgang des Prepregs und anschließender Injektion der verbleibenden trockenen Fasern untersucht werden.

Die Simulation des kombinierten Prozesses soll das Verhalten des Faservolumengehaltes in Abhängigkeit von Zeit, Ort und verschiedener Prozessparameter im CPI-Prozess beschreiben.

Der reale CPI-Prozess kann in mehrere Abschnitte unterteilt werden:

1. Kompaktierung,
2. Aufheizung auf Injektionstemperatur,
3. Haltezeit zur Homogenisierung der Temperatur von großen Bauteilen,
4. Injektion der zweiten Harzkomponente,
5. Aufheizen auf Aushärtetemperatur und
6. Aushärtephase.

Dieser Ablauf des CPI-Prozesses ist in Bild 2.3 idealisiert dargestellt. Die erste Skizze zeigt die

Prepreglagen mit den unkompaktierten trockenen Faserlagen, die in der nächsten Skizze kompaktiert dargestellt sind. Den Ausblutvorgang stellt die dritte Skizze dar. Durch das Ausbluten des Prepregs verringert sich die Dicke des Prepreggeleges, wo hingegen sich die Dicke des darüberliegenden Faserstapels durch die Aufnahme des Prepregharzes leicht erhöht. In der letzten Skizze erfolgt die Benetzung der verbliebenen trockenen Fasern mit Injektionsharz, die ebenfalls zu einer Erhöhung der Dicke des Fasergeleges führt.

2.3 Steuernde Differenzialgleichung

2.3.1 Darcys Law

Henry Darcy (1803-1858) war ein französischer Wissenschaftler, der in Experimenten die stationäre vertikale Durchströmung von Wasser durch ein Sandbett untersuchte. Er fand den nach ihm benannten linearen Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Potential des Wassers und des sich einstellenden Massenstroms des Wassers. Der Proportionalitätsfaktor wird aus der Durchlässigkeit (Permeabilität) und der Höhe des Sandbettes gebildet [3]. Dieser einfache Zusammenhang wird auch bei der Beschreibung des Harzflusses durch ein Faserbett verwendet.

$$(2) \quad u_D = -\frac{K(p_2 - p_1)}{\eta L}$$

K beschreibt die Permeabilität des porösen Mediums, η die dynamische Viskosität des Harzes, p den Druck und L die Länge des zu durchfließenden Mediums. Im Fall der Analyse des Kompaktierungsverhaltens bzw. der Fließvorgängen in Kompaktierungsrichtung ist u_D die Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und durchflossenen Medium. Da sich aber auch die Fasern infolge der Kompaktierung bewegen können, gilt für die Darcygeschwindigkeit u_D :

$$(3) \quad u_D = u_r - u_f$$

Für den dreidimensionalen Raum für ein infinitesimal kleines Volumen mit der Abhängigkeit der Permeabilität und des Harzdruckes vom Faservolumengehalt geschrieben werden als:

$$(4) \quad u_D = -\frac{\bar{K}(V_f)}{\eta} \nabla p_r(V_f)$$

Der Tensor K enthält die Komponenten der Permeabilitäten K_{ij} ($i, j = x, y$ oder z). Im hier vorliegenden Fall einer eindimensionalen Analyse der Fließvorgänge vereinfacht sich die Gleichung (4) reduziert auf die Dickenrichtung z zu:

$$(5) \quad u_D = -\frac{K_{zz}(V_f)}{\eta} \frac{\partial}{\partial z} p_r(V_f)$$

2.3.2 Kontinuitätsgleichung

Für die Bestimmung der Zustandsänderung in einem Faserlaminat wird ein finites Volumenelement definiert und eine Bilanz der eingehenden und ausgehenden Massen bestimmt. Diese Bilanz wird unter Beibehaltung des Gesamtvolumens bestimmt und daher Kontinuitätsgleichung genannt. In Bild 2.4 ist ein solches Volumen mit den einfließenden Volumenströmen $q_{xyz,1}$ und den ausfließenden Volumenströmen $q_{xyz,2}$ dargestellt.

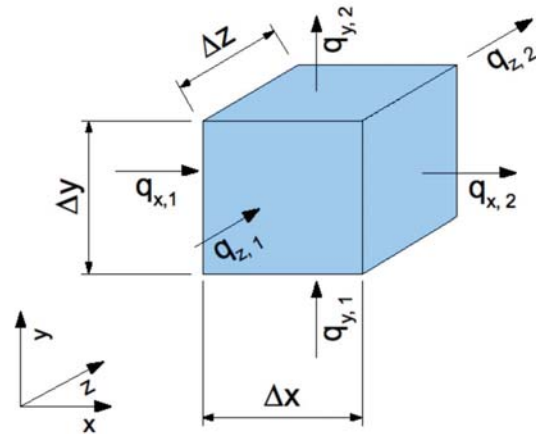


Bild 2.4: Volumenelement mit ein- und ausfließenden Volumenströmen

Bei der Betrachtung des Volumenelementes in Bild 2.4 sind die eingehenden Volumenströme mit den Indices 1 und die ausgehenden Ströme mit 2 bezeichnet. Dabei gilt:

$$(6) \quad q_i = u_i \cdot A_i$$

Für die Simulation wird eine Beschreibung der zeitlichen Änderung des Faservolumengehaltes V_f bzw. der komplementären Porosität ϕ gesucht. Dazu wird die Bilanz ein- und ausströmender Faservolumen gebildet. Nach dem Ersetzen des Volumenstroms q und der Fläche A nach Gleichung (6) erhält man für ein infinitesimal kleines Volumenelement:

$$(7) \quad \frac{\partial V_f}{\partial t} = -\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial}{\partial x_i} u_{f,i} \right) = -\nabla u_f$$

Wenn die zeitliche Änderung des Faservolumengehaltes V_f in Gleichung (7) analog zur zeitlichen Änderung der Porosität ϕ bestimmt wird, erhält man die erweiterte Kontinuitätsgleichung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen fließenden Medien zu:

$$(8) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial V_f}{\partial t} = 0 \Rightarrow \nabla u_f + \nabla u_r = 0$$

Aus Gleichung (7) und der Divergenz der Gleichung (3) kann die Darcygeschwindigkeit in

die jeweilige Fließgeschwindigkeit der Fasern und des Harzes überführt werden mit:

$$(9) \quad u_D = -2u_f \quad \text{bzw.} \quad u_D = 2u_r$$

Da sich der Gesamtdruck, der über die Siegelfolie auf dem Laminat lastet, entsprechend Gleichung (1) aus der Summe des Harzdruckes p_r und der Faserspannung σ_f zusammensetzt und räumlich und zeitlich konstant ist, folgt aus dem Gradienten der Drucksummen:

$$(10) \quad \nabla P = \nabla p_r + \nabla \sigma_f = 0$$

Nach Ableitung der Flussbedingung nach Darcy aus Gleichung (4) und dem Ersatz der Darcygeschwindigkeit u_D und des Harzdruckes p_r nach Gleichung (9) und (10) erhält man:

$$(11) \quad \nabla u_f = -\frac{1}{2} \nabla \left(\frac{K(V_f)}{\eta} \nabla \sigma_f \right)$$

Wenn Gleichung (11) in die DGL für die zeitliche Veränderung des Faservolumengehaltes aus Gleichung (7) eingesetzt wird, ergibt sich die für die Simulation des Kompaktierungsverhaltens eines Faserpaketes die zentral steuernde Differentialgleichung:

$$(12) \quad \frac{\partial V_f}{\partial t} = \frac{1}{2} \nabla \left(\frac{K(V_f)}{\eta} \nabla \sigma_f \right)$$

Somit gehört das zu betrachtende Problem zur Klasse der Anfangswert-Probleme und gehört zum gleichen Typ, wie das einer instationären Diffusion nach dem 2. Fickschen Gesetz mit veränderlichem Diffusionskoeffizienten $D(V_f)$.

2.4 Faserspannung in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt

Die Kenntnis der Federspannung des Fasermaterials in Kompaktierungsrichtung ist notwendig, um eine Simulation auf Basis einer faservolumenabhängigen Druckfeldbestimmung durchzuführen. Zur Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens haben Cai und Gutowski [2] eine Gleichung entwickelt, mit der sich die Faserspannung σ_f anhand des Faservolumengehaltes und einiger charakteristischer Fasereigenschaften berechnen lässt:

$$(13) \quad \sigma_f = \frac{3\pi E_f}{\beta^4} \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_{f,0}}} - 1}{\left(\sqrt{\frac{V_{f,\max}}{V_f}} - 1 \right)^4}$$

Dabei ist $V_{f,0}$ der minimale Faservolumengehalt bei einem Harzdruck p_r gleich Null, $V_{f,\max}$ der maximal

erreichbare Faservolumengehalt, E_f die Biegesteifigkeit der Faser und β ein Faktor für die Welligkeit der Fasern (Spannweite zu Amplitude). Grundlage dieser analytischen Gleichung ist ein UD-Gelege aus welligen Fasern. Die Fasern in dem Gelege erzeugen ab einem Faservolumengehalt $V_f \approx 0,5$ (Kohlenstofffasern) aufgrund ihrer Welligkeit und den zunehmenden Kontakten untereinander eine Spannung quer zur Faserrichtung. Diese Spannung wirkt in Abhängigkeit von Wellenlänge und Amplitude wie eine Federkraft.

Durch die schlechte Integrierbarkeit ist diese Gleichung für den Einsatz in der Kompaktierungssimulation nicht geeignet. Daher wurde in [7] eine neue Gleichung auf Basis einer Exponentialfunktion entwickelt, ausgehend von der Abbildung der Faserkompaktierung nach Davé [4]. Davé hatte seine Exponentialfunktion nur für einen Druckbereich bis $P \approx 0,07 \text{ MPa}$ als passend beschrieben. Durch Erweiterungen der Gleichung konnte der Geltungsbereich auf den praktisch brauchbaren Druckbereich (hier bis $P = 0,7 \text{ MPa}$) mit ausreichender Genauigkeit ausgeweitet werden.

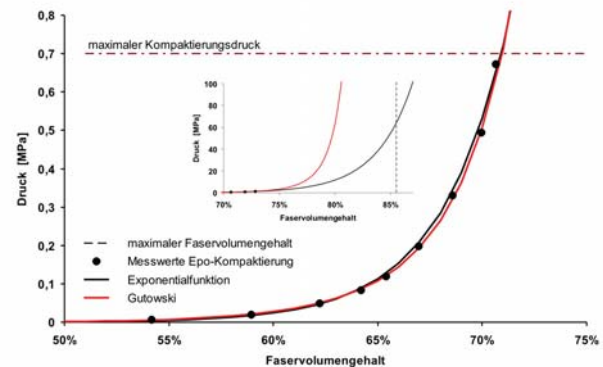


Bild 2.5: Anpassung und Vergleich der gemessenen Kompaktierung eines UD Geleges und den analytischen Funktionen nach Gutowski und einer Exponentialfunktion Permeabilität in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt.

2.5 Permeabilität in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt

Bei der Betrachtung des Flusses von Harz durch Prepregmaterialien oder UD-Gelege im VARI-Verfahren ist die Permeabilität nicht konstant, sondern eine Funktion der Porosität. Die Karman-Cozeny Gleichung wird in den meisten Fällen verwendet, um die Durchlässigkeit poröser Medien in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes darzustellen [4]. Diese wurde ursprünglich für Medien mit sphärischen Partikeln entwickelt. Durch das Ersetzen des hydraulischen Radius an zylindrische Medien kann diese Gleichung für die Verhältnisse in einem Faserbett angepasst werden.

Gutowski [5] hat Versuche zur Permeabilität mit Fluiden verschiedener Viskositäten ausgeführt. Dabei stimmten die Messungen aus den

Versuchen für die axiale Permeabilität sehr gut mit der Carman-Kozeny Gleichung mit $k_{xx} = 0,7$ überein. Bei den Versuchen zur transversalen Permeabilität konnte keine befriedigende Übereinstimmung erzielt werden. Deswegen wurde die Gleichung modifiziert, um die Sperrung des Durchflusses zu ermöglichen, wenn die Fasern auf Block liegen. Dieser Fall bedeutet das Absinken der Permeabilität auf $K_{yy,zz} = 0$, da alle Flusskanäle in transversaler Richtung blockiert sind. In der ursprünglichen Gleichung ist eine transversale Permeabilität von $K_{yy,zz} = 0$ erst bei einem Faservolumengehalt von $V_f = 1$ möglich. $V_f = 1$ kann aber real nicht erreicht werden, da die Faseranordnung mit der höchst möglichen Dichte (hexagonale Packung) nur ein Faservolumengehalt $V_f = 0,904$ ermöglicht. Die modifizierte Gleichung lautet:

$$(14) \quad K_{zz} = \frac{r_f^2}{4k_{zz}} \frac{\left(\sqrt{\frac{V_{f,\max}}{V_f}} - 1 \right)^3}{\frac{V_{f,\max}}{V_f} + 1}$$

Mit dieser Gleichung und mit den Koeffizienten $k_{zz} = 0,2$ und $r_f = 4 \cdot 10^{-6}$ konnten die in den Messungen ermittelten Werte sehr gut nachgebildet werden.

Da eigene Permeabilitätsmessungen zu aufwändig gewesen wären, wird für die Simulation auf die von Gutowski ermittelten Daten zurückgegriffen. Die Carman-Kozeny Gleichung ist durch die beiden Wurzelterme sehr kompliziert zu handhaben. Darüber hinaus ist die Carman-Kozeny Gleichung nur sehr schwer integrierbar, sobald sie mit der differenzierten Druckgleichung multipliziert wird. Zur Umgehung dieses Problems sollte die Carman-Kozeny Gleichung durch eine Näherungsgleichung ersetzt werden. Für die Näherungslösung wird mindestens ein logarithmischer Ansatz notwendig, da der Logarithmus der Carman-Kozeny streng monoton fallend ist. Es werden mindestens drei Stützstellen benötigt, um nicht durch eine Linearisierung des Verlaufes zu große Abweichungen zu erhalten.

2.6 Reaktionskinetik des verwendeten Prepregharzsystems

Während der Aushärtung eines Harzsystems laufen komplexe Prozesse ab, die im Verlauf fortschreitender Polymerisation einen immer stärkeren Einfluss auf die Viskosität des Harzes haben. Für die Beurteilung und Optimierung von Fertigungsprozessen ist die Kenntnis des Verlaufes der Viskosität in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur bei isothermer Betrachtung eine grundlegende Voraussetzung.

Der Verlauf der Viskosität η wird nach Woo et al. [8] in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades α für das dort beschriebene Harzsystem Hercules 3501-

6 durch eine Beziehung des Arrhenius-Typs gut wiedergegeben:

$$(15) \quad \eta = \eta_{\infty} e^{\left(\frac{U}{R \cdot T} + K \cdot \alpha \right)}$$

wobei η_{∞} eine Konstante ist, U die Aktivierungsenergie, R die allgemeine Gaskonstante und T die absolute Temperatur in Kelvin ist. Als nächstes muss die Reaktionskinetik nachgebildet werden, um eine Beziehung zwischen dem Umsatz α und der Zeit t herzustellen. Um auch bei veränderten Temperaturen den Verlauf der Viskosität bei isothermen Härtephasen wiedergeben zu können, wird in [8] vorgeschlagen, für Umsätze $\alpha \leq 0,3$ folgender Beziehungen zu verwenden:

$$(16) \quad \frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \cdot \alpha)(1 - \alpha)(B - \alpha)$$

K_1 und K_2 sind in Gleichung (16) Faktoren, die experimentell bestimmt werden müssen. Diese Beziehung ist mit der Bestimmung der Konstanten K_1 , K_2 und B hinsichtlich der dafür notwendigen thermoanalytischen Versuche relativ komplex. In Bild 2.6 sind mit entsprechend bestimmten Konstanten die analytisch und experimentell bestimmten Verläufe der temperaturabhängigen Viskositäten des Prepregharzes dargestellt. Für die maximale Zeitspanne von 180 Minuten ergibt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung der Verläufe.

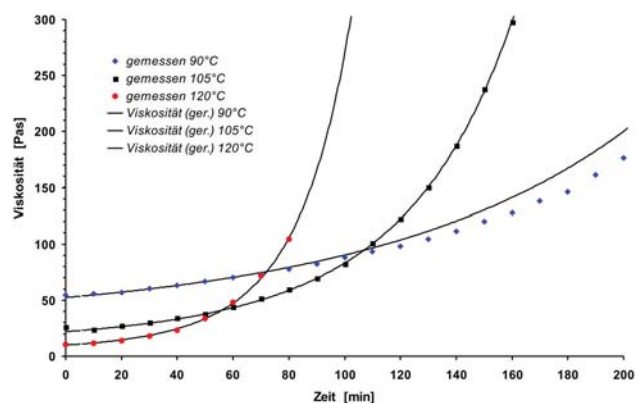


Bild 2.6: Gegenüberstellung gemessener und gerechneter Temperaturverläufe ausgewählter isothermer Temperaturniveaus

3. DURCHFÜHRUNG DER SIMULATION

Die in Dickenrichtung eines Laminates eindimensionale Simulation wurde auf Basis eines Finite-Differenzen-Verfahrens aufgebaut. In Bild 3.1 ist der Ablauf der Simulation schematisch dargestellt. Sie beginnt mit der Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten der Fasern und des Harzes zwischen den gefüllten Zellen auf Basis der DGL aus Gleichung (12). Aus diesen Geschwindigkeiten können unter

der Differenzierung zwischen Ausblute- und Injektionsvorgang die Faserflussgeschwindigkeiten zwischen allen Zellen bestimmt werden. Nach der Ermittlung des kleinsten notwendigen Zeitschrittes erfolgt die Berechnung der ausgetauschten Fasermengen und daraus der neuen Faservolumengehalte der Zellen. Der Kreislauf schließt mit der Aktualisierung der Zellzustände, welche die Positionen der Siegelfolie, der Harz- und Faseübergänge und der Füllzustände beinhalten.

Der zu simulierende Aufbau des Laminates in Bild 3.2 sah für den CPI-Prozess ein 2 mm Starkes Prepreglaminat am Boden einer Werkzeugplatte vor und darüber geschichtet 2 mm trockene UD-Fasern.

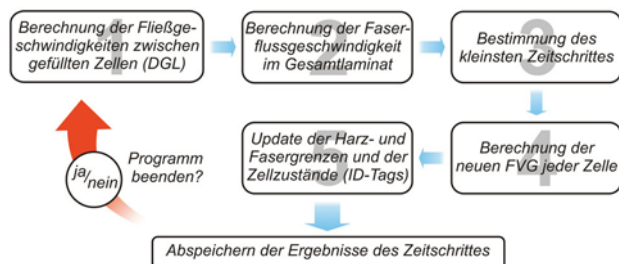


Bild 3.1: Übersicht über die Ablaufstufen bei den Berechnungen der Faser- und Harzflüsse für einen Zeitschritt Δt ohne Injektion von Matrixharz

Die trockene Faserlage liegt auf dem Prepreg zunächst in unkompakter Form und wird zu Beginn der Simulation auf den dem Aussendruck entsprechenden maximalen FVG kompaktiert. In den Grafiken ist überwiegend nur die kompaktierte Dicke eines trockenen Faserpaketes zu sehen, da der Kompaktierungsvorgang relativ zur Gesamtdauer des Prozesses sehr schnell beendet ist.

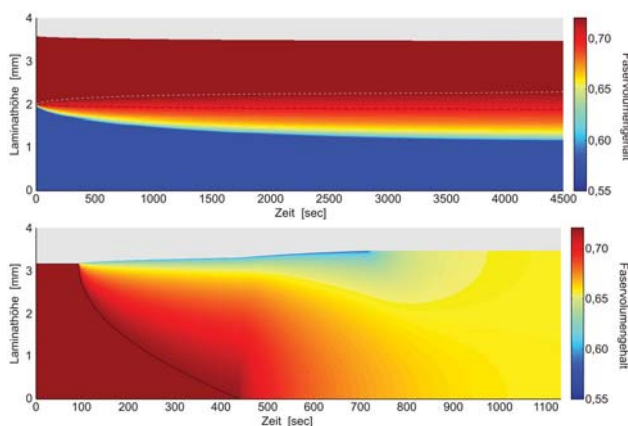


Bild 3.2: Faservolumengehalt; zeitlicher Ablauf des Prepregausblutens (oben) und der Injektion eines eindimensionalen trockenen Faserlaminates mit dem Injektionspunkt an der obersten Lage (unten)

Sobald die Injektion der trockenen Fasern startet, verändert sich die Dicke des Laminates. Ein

solcher Effekt ist besonders gut bei der reinen Injektion eines trockenen Faserlaminates zu beobachten, wie es in Bild 3.2 dargestellt ist. Hier beginnt die Injektion nach 100 Sekunden und erreicht bei ca. 850 Sekunden die unterste Faserlage. Durch die stetige Injektion mit Harz in der obersten Lage sinkt der Faservolumengehalt in den Zellen stetig, so dass sich die Gesamtdicke des Laminates trotz des Harzverlustes durch die Füllung der freien Volumen zwischen den trockenen Fasern langsam erhöht.

Wenn die Harzfront die unterste Lage erreicht und die Füllung der freien Volumen beendet ist, beschleunigt sich kurzfristig die Steigerung der Laminathöhe. Nach der Abschaltung der Injektion bei 2300 Sekunden bleibt die Laminatdicke aufgrund des sich nicht ändernden Harz- und Faservolumens konstant und es vollzieht sich ein Ausgleichsvorgang des Faservolumengehaltes auf ein einheitliches Niveau.

In Bild 3.2 sind zwei CPI-Prozesse bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen dargestellt. Die obere Skizze zeigt einen CPI-Prozess bei 90°C, bei dem nach einer Haltezeit von 1800 Sekunden die Injektion der verbleibenden trockenen Fasern beginnt. Nachdem die Fließfront des Injektionsharzes die Fließfront des Prepregharzes erreicht, verändert sich der hohe FVG der zuvor mit Prepregharz benetzten Fasern wieder in Richtung niedrigerer Werte. Aufgrund der niedrigeren Viskosität des Injektionsharzes sinkt der FVG in den injizierten Bereichen schnell bei entsprechendem Anstieg des Harzdruckes. Es entsteht ein hoher Druckgradient im Übergangsbereich von Injektions- zu Prepregharz, der das Prepregharz langsam in Richtung des Prepreglaminates zurückdrückt und so auch dort die FVG senkt. Nach Ablauf einer Gesamtprozesszeit von 4500 Sekunden liegt der maximale Faservolumengehalt bei $V_{f,maxz} = 0,6305\%$ und damit unterhalb der geforderten Grenze von $V_{f,Grenz} = 0,64\%$.

In der unteren Skizze ist die Simulation des gleichen Aufbaus dargestellt, wie in der oberen Skizze. Die Prozesstemperatur wurde auf 120°C verändert und Haltezeit wurde auf 1800 Sekunden verlängert. Beim Start der Injektion hat sich das Prepregharz in den trockenen Faserlagen wesentlich weiter verteilt und die Erhöhung des FVG der Prepreglagen ist durch den Harzmassenverlust weiter fortgeschritten. Aufgrund des temperaturbedingt höheren Vernetzungsgrades des Prepregharzes zum Zeitpunkt der Injektion kann durch den Gegendruck des Injektionsharzes der FVG im Prepregharzbereich weniger effizient gesenkt werden. Die maximal verbleibenden FVG haben daher in der unteren Skizze ein höheres Niveau und liegen mit $V_{f,maxz} = 0,657\%$ über der Grenze von $V_{f,Grenz} = 0,64\%$.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Beschreibung eines harzgetränkten Faserstapels konnten auf Basis eines nicht verformbaren Netzwerkes die Fließbewegungen von Harz

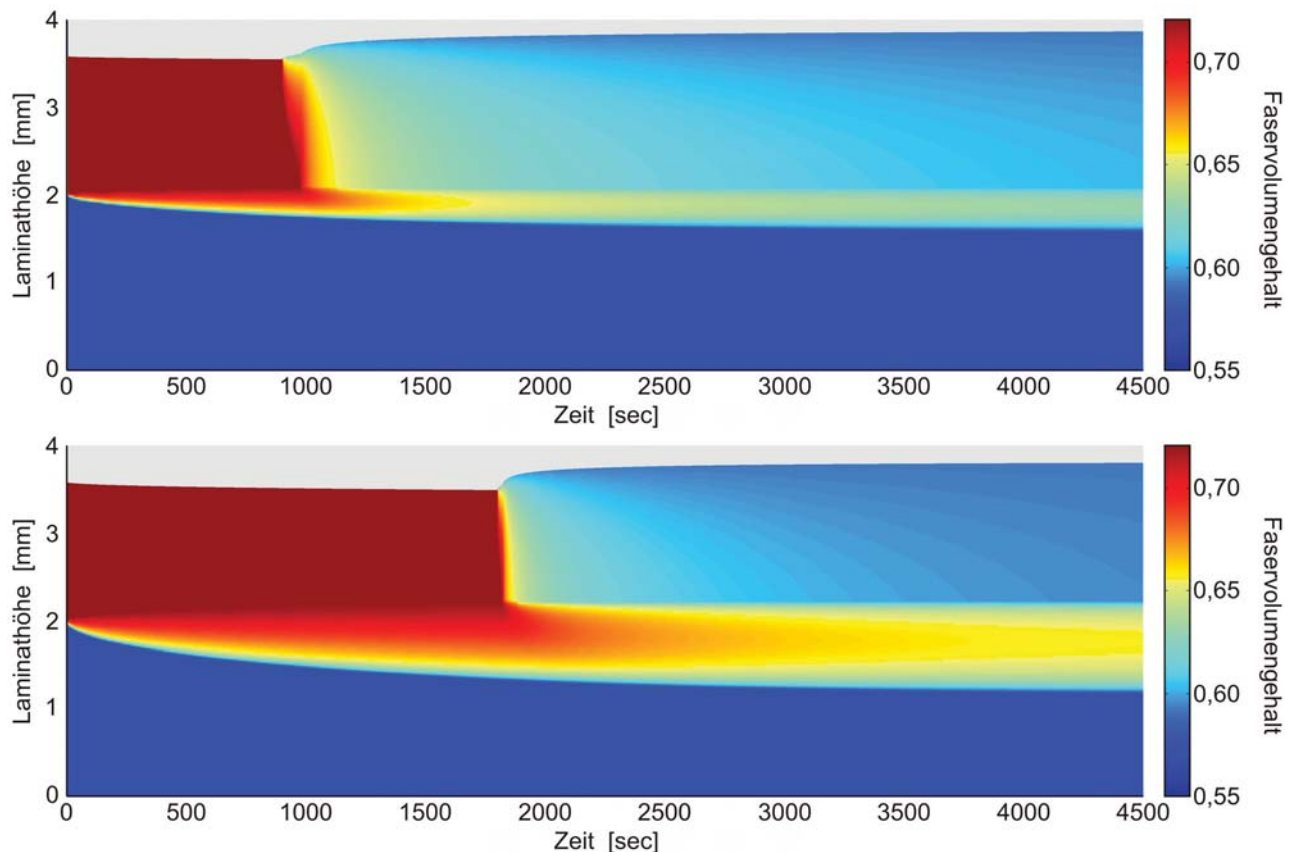


Bild 4.1: oben - Faservolumengehalt; CPI-Simulation bei 90°C mit Start der Injektion bei 1800 Sekunden mit einer Ausgangslaminat aus 2 mm Prepreg und 2 mm unkompaktiertem UD-Gelege, unten - gleicher Aufbau und Injektionszeit aber bei einem Temperaturniveau von 120°C.

und Fasern zwischen den Zellen des Netzwerkes definiert werden. Über eine eindimensionale Fließsimulation wurde dann mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Verfahren das zeitabhängige Verhalten der Verteilung von Faservolumengehalten über der Laminatdicke während eines CPI-Prozess analysiert.

Aus der Analyse der Simulationen in Bild 4.1 kann festgestellt werden, dass prinzipiell ein Prozessfenster bei den CPI-Verfahren existiert, in denen die geforderten Limits der Faservolumengehalte eingehalten werden können.

Bei höheren Temperaturen wirkt sich einerseits die niedrigere Viskosität zugunsten eines erweiterten Ausblutens aus, Zum anderen steigt auch die Polymerisationsgeschwindigkeit, so dass bei längeren Haltestufen vor der Harzinjektion aufgrund einer zu stark gestiegenen Viskosität des Prepregharzes ein Ausgleich der hohen FVG nicht oder nur schwer stattfinden kann. Je höher die Injektionstemperatur gewählt wird, umso weiter muss daher die Haltezeit vor der Injektion bzw. die Aufheizphase begrenzt werden.

Mit dieser Simulation ist es möglich, den CPI-Prozess für eine Vielzahl verschiedener Prozessparameter darzustellen und über die Zusammen-

fassung der Ergebnisse den Prozess hinsichtlich der zulassungsrelevanten Grenzen des Faservolumengehaltes zu optimieren.

Literatur:

- [1] Ahn K. J., Seferis J. C., Berg J. C., Simultaneous Measurements of Permeability and Capillary Pressure of Thermosetting Matrices in Woven Fabric Reinforcements, *Polymer Composites*, Vol. 12, No. 3, 1997
- [2] Cai, Z. and T. G. Gutkowski, The 3-D Deformation Behavior of Lubricated Fiber Bundles, *Journal of Composite Materials*, El. 26, No. 16, 1992
- [3] Darcy H.; The Public Fountains of the City of Dijon - The Distribution of Water, Paris 1856
- [4] Davé, R., J.L. Kardos and M.P.Dudukovic, A Model for Resin Flow during Composite Processing: Part1, *Polymer Composites*, Vol. 8, No. 1, 1987

- [5] Gutkowski, T. G., Morigaki T. and Z. Cai, The Consolidation of Laminate Composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, 650-669, 1987
- [6] Hubert, P and Poursartip, A Method for Direct Mesasurement of Fibre Bed Compaction Curve of Prepregs, *Composites: Part A*, Vol. 32, 179-187, 2001
- [7] Quappen A.; Entwurf eines Konzeptes zur Simulation des Ausblute- und Kompaktierungsverhaltens eines Prepreggeleges aus Faserverbundwerkstoff, Diplomarbeit, TU Braunschweig 2008
- [8] Woo Il Lee, Alfred C. Loos and George S. Springer; Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin, *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, 510