

Simulation der Ultraschallwellenausbreitung in komplexen Faserverbundwerkstoffen

Julia Hegemann, EADS Deutschland GmbH, Ottobrunn *

Einleitung

Wendet man die Ultraschalltechnik im Impuls-Echo-Verfahren an, wird die Messung mit nur einem Prüfkopf durchgeführt. Dieser sendet ein Ultraschallsignal aus und empfängt die reflektierte Welle wieder. Trifft das Signal auf Fehlstellen, kommt es neben dem Rückwandecho (RE) auch zu einem Echo durch die Fehlstelle (Fehlstellen-Echo - FE). Ein Vorteil des Impuls-Echo-Verfahrens ist die Möglichkeit, die Tiefenlage einer Fehlstelle aus der Laufzeit des Signals zu bestimmen.

Diese Methode stößt bei der Prüfung neuartiger komplexer Werkstoffe, wie z.B. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, zunehmend an ihre Grenzen. Da aufgrund der inhomogenen inneren Struktur vermehrt Streuung auftritt, wird die Detektion des Rückwandechos erschwert. Die Wechselwirkungen zwischen der Ultraschallwelle und der (Mikro-)Struktur sind kaum erforscht und oft bleibt unklar, ob es sich bei den gemessenen Signalen um Strukturtauschen oder einen Defekt im Bauteil handelt.

Mit Hilfe von Simulationen sollen diese Wechselwirkungen in dieser Arbeit untersucht werden, um zu einem verbesserten Verständnis dieser Thematik beizutragen.

Aufgrund der Komplexität von Verbundwerkstoffen ist die Berechnung der Ultraschallausbreitung mit einfachen analytischen Methoden sehr kompliziert. Numerische Verfahren eignen sich hingegen gut für die Modellierung der in der Ultraschalltechnik eingesetzten Impulse sowie deren Ausbreitung und Wechselwirkung in komplexen heterogenen Materialien.

Bisher wurden mangels ausreichend leistungsfähiger Rechner überwiegend zweidimensionale Fälle untersucht. Mit den rasch steigenden Kapazitäten gewinnen numerische Simulationstechniken aber immer mehr an Bedeutung und auch dreidimensionale Modellierungen werden vermehrt durchgeführt.

Zu den wichtigsten numerischen Methoden gehören die Finite Elemente Methode, die Randelementemethode, die Finite Differenzen Methode, die Finite Volumen Methode und auch die Finite Integrationstechnik (FIT). Bei allen Verfahren wird ein Modell diskretisiert. Die Lösungen werden an den Gitterpunkten näherungsweise berechnet und der Lösungsverlauf zwischen den Punkten approximiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz untersucht: die Verknüpfung einer numerischen Simulationsmethode, der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) mit dem Softwaremodul *WiseTex* zur Erstellung eines Mikrostrukturmodells. Dazu wurde der EFIT-Algorithmus, der im Anschluss beschrieben ist, in einem C++-Programm implementiert. So können diskrete, mit *WiseTex* erstellte, Modelle eingelesen werden.

Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik - EFIT

Das Prinzip der Finite Integrationstechnik (FIT) basiert auf Arbeiten von Weiland [1] aus der Elektrotechnik, wo sie für elektromagnetische Rechnungen (EMFIT) entwickelt wurde. Sie wurde für verschiedene Fälle adaptiert und angewandt.

Die elastodynamische Variante wurde von Fellingner und Marklein [2] entwickelt und kam bereits mehrmals für Simulationen auf dem Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung zum Einsatz. Simulationen in inhomogenen und anisotropen Modellen wurden überwiegend im Bereich der Ultraschallprüfung von Beton [3] und bei der Untersuchung der Ultraschallausbreitung in kristallinen Medien [4] durchgeführt.

Als Grundlage der EFIT dienen die elastodynamischen Grundgleichungen: die Cauchy'sche Bewegungsgleichung

$$\iiint_V \rho(\underline{R}) \dot{\underline{v}}(\underline{R}, t) dV = \iint_S \underline{n} \underline{T}(\underline{R}, t) dS + \iiint_V \underline{f}(\underline{R}, t) dV \quad (1)$$

und die Deformationsratengleichung

$$\iiint_V \underline{\dot{T}}(\underline{R}, t) dV = \iint_S \underline{C} \underline{n} \underline{v}(\underline{R}, t) dS \quad (2)$$

Sie verbinden die elastodynamischen Feldgrößen, den Teilchengeschwindigkeitsvektor \underline{v} und den Spannungstensor \underline{T} miteinander. Mit Hilfe des Oberflächenintegrals S (Normale \underline{n}) lässt sich jeweils die zeitliche Änderung der komplementären Feldgröße im umschlossenen Volumen V berechnen. \underline{C} steht für die Elastizitätsmatrix, ρ für die Masendichte und \underline{f} für die anregende Volumenkraftdichte.

Beide Gleichungen werden in ihrer Integralform diskretisiert, das heißt in eine räumlich diskrete Form gebracht. Das Modell wird in ein dreidimensionales Gitter mit kubischen Gitterzellen der Kantenlänge d eingebettet. In diesem Gitter sind die Feldkomponenten des Teilchengeschwindigkeitsvektors und des Spannungstensors an zueinander räumlich versetzten Gitterpunkten angeordnet („staggered grid“ von Yee [5], Bild 1). Die Hauptspannungen sowie die Materialparameter (Dichte, E-Modul und Poisson-Zahl) werden an den Knoten positioniert. Die Scherspannungen liegen auf den Mittelpunkten der Gitterflächen. Die diskreten Teilchengeschwindigkeiten liegen in Kantenrichtung auf den Kantenmittenpunkten.

In der zugehörigen Integrationszelle befindet sich die jeweilige Komponente jedoch im Mittelpunkt. Die Geschwindigkeit hängt beispielsweise von den Spannungstensenoren der vier nebeneinander liegenden Gitterzellen ab. Bild 2 zeigt die Lage einer v_2 -Integrationszelle im Gitter.

* Die Autorin ist Trägerin der Schiebold-Gedenkmünze der DGZfP 2007

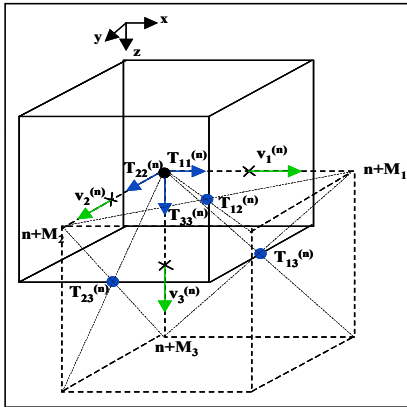


Bild 1: Lage der diskreten Feldkomponenten für den Gitterknoten n

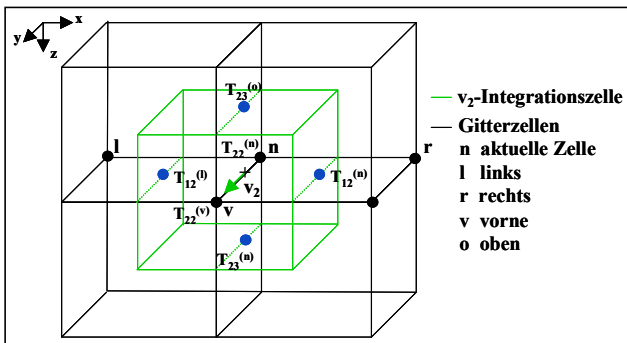


Bild 2: Lage einer v_2 -Integrationszelle im Gitter

Als Folge des gestaffelten räumlichen Gitters erfolgt die zeitliche Diskretisierung ebenfalls gestaffelt. Die Geschwindigkeiten und Spannungen werden zu alternierenden Halbzeitschritten iterativ gelöst. Zu ganzzahligen Vielfachen 1 der Schrittweite Δt werden die Geschwindigkeitskomponenten berechnet. In der Mitte dieser Zeitintervalle, also zu Vielfachen des Zeitpunktes $(1-\frac{1}{2})\cdot\Delta t$ werden die Spannungen ermittelt. Die zeitlich diskreten Differenzquotienten lauten:

$$v_i^{[l]} = v_i^{[l-1]} + \Delta t \dot{v}_i^{[l-\frac{1}{2}]} \quad (3)$$

$$T_{ij}^{[l+\frac{1}{2}]} = T_{ij}^{[l-\frac{1}{2}]} + \Delta t \dot{T}_{ij}^{[l]} \quad (4)$$

Die direkte Nutzung der Integralform führt zu einer höheren numerischen Stabilität und erlaubt ein gröberes Gitter gegenüber nicht gestaffelten Gittern, was eine Verminderung des Speicherplatzbedarfs und der Rechenzeit bedeutet. Die Eigenschaften entsprechen nach der Diskretisierung weiterhin den analytischen Rand- und Übergangsbedingungen, die problemlos eingearbeitet werden können.

Stabilität, räumliche Auflösung, Rand- und Übergangsbedingungen

Um die Simulation numerisch stabil zu halten, müssen die Kantenlänge des Gitters und das Zeitinkrement der Berechnung gewissen Vorgaben genügen. Eine Wellenlänge sollte mindestens acht Zellen umfassen. Die räumliche Diskretisierung muss an der maximalen Frequenz und der niedrigsten auftretenden Wellengeschwindigkeit ausgerichtet werden. Die niedrigste ist die Rayleigh-Wellen-

geschwindigkeit c_R , die zwischen 4.5% und 12.6% langsamer als die Transversalgeschwindigkeit ist [3]. Daher kann man laut [3] folgende Näherung benutzen:

$$d \leq \frac{1}{8} \lambda_{\min} = \frac{1}{8} \frac{c_R}{f_{\max}} \approx \frac{1}{10} \frac{c_{t,\min}}{f_{\max}} \quad (5)$$

Das Zeitinkrement hängt von der höchsten longitudinalen Schallgeschwindigkeit ab, die im Modell vorkommt. Als Stabilitätsbedingung für die Zeit wird auf das Courant-Friedrichs-Lewy-Kriterium [6]

$$\Delta t \leq \frac{d}{c_{\max} \sqrt{3}} \quad (6)$$

zurückgegriffen.

Durch diese Bedingung wird gewährleistet, dass die Geschwindigkeit, mit der die diskreten Gleichungen die Welle im Gitter transportieren, der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit entspricht. Wäre dies nicht der Fall, käme es zu einem Energiestau, der zur Instabilität der Simulation führen kann.

Das Einarbeiten von Randbedingungen gestaltet sich mit FIT besonders einfach. Für die vorliegenden Anwendungsfälle müssen Randbedingungen an den äußeren Modellgrenzen sowie an inneren Grenzflächen formuliert werden.

An den Modellgrenzen normal zur longitudinalen Ausbreitungsrichtung (yz-Ebene) soll der Übergang zu Wasser, bzw. zu Vakuum simuliert werden. Aufgrund des großen Impedanzunterschieds zwischen fluiden und festen Medien wird die Grenzfläche in beiden Fällen als spannungsfrei angesehen.

Die Grenzfläche wird so gewählt, dass sie mit der Gitterebene zusammenfällt, in der die Longitudinalgeschwindigkeit v_1 und die Scherspannungen T_{12} und T_{13} lokalisiert sind. In Bild 3 ist die Lage der Teilchengeschwindigkeit v_1 auf einer spannungsfreien Grenzfläche dargestellt. T_{11} wird im Halbzeitschritt zuvor berechnet. Um die Reflexion an der Modellgrenze zu simulieren, wird die Pseudokomponente $T_{11}^{(r)}$ außerhalb des tatsächlichen Modells eingeführt. Für eine vollständige Reflexion wird ihr der negative Wert von $T_{11}^{(n)}$ zugeordnet.

Um in y- und z-Richtung Randeffekte durch die Bauteilabgrenzungen zu vermeiden, bietet es sich an, das Modell als unendlich ausgedehnte Platte zu definieren. Das ist besonders sinnvoll, da das Modell aufgrund mangelnder Rechnerleistung in seinen Maßen sehr begrenzt ist. Um diese Randbedingung zu realisieren, wird eine periodische Fortführung des Modells simuliert. Praktisch bedeutet dies, dass die fehlende Nachbarzelle durch die Randzelle auf der anderen Modellseite ersetzt wird. So läuft jede Welle, die aus einer Seite herausläuft auf der anderen Seite wieder herein (Bild 3).

Bei heterogenen Materialien muss darauf geachtet werden, zwischen den Materialzellen die Stetigkeit von $n \cdot T$ und v zu gewährleisten. Damit diese physikalischen Randbedingungen auch zwischen unterschiedlichen Medien erfüllt werden, müssen die Materialparameter gemittelt werden. In Bild 3 ist beispielsweise die Lage der Schubspannung T_{13} zwischen den Materialzellen veranschaulicht. In der Berechnung muss die Elastizitätsmatrix über alle vier Nachbarzellen gemittelt werden.

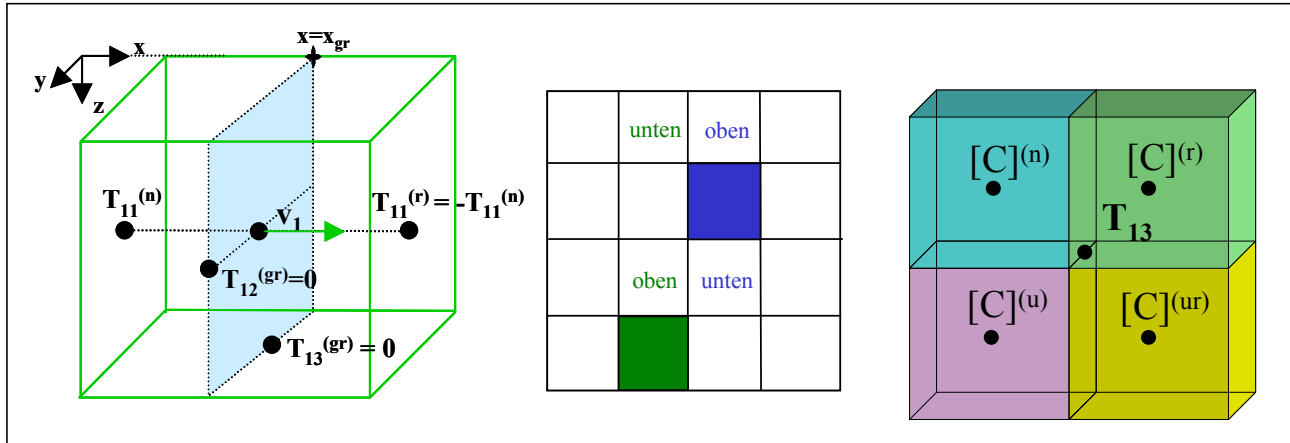


Bild 3: Spannungsfreie Grenzfläche, periodische Randbedingungen und Mittelung der Materialparameter

Modellierung

Die Modellierung der Mikrostruktur wird mit dem Softwaremodul *WiseTex* durchgeführt. *WiseTex* wird seit 1999 vom Departement Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkunde (MTM) der Katholieke Universiteit Leuven (K.U. Leuven) entwickelt und dient meso-mechanischen, hydrodynamischen und Finite-Elemente-Softwarepaketen als integrierter Textil-Preprozessor. Es beschreibt die innere Geometrie und das mechanische Verhalten von textilen Strukturen.

Es können verschiedene Modelle erstellt werden. Als Grundbausteine dienen Fasern, Garne und Rovinge. Aus diesen können zweidimensionale Gewebe, Geflechte mit oder ohne Verstärkung (Inlays), unidirektionale Preforms und Multiaxialgelege generiert werden.

Die Modellierung ist in zwei Abschnitte unterteilt. Zunächst wird eine Elementarzelle des Werkstoffes generiert. Sie beinhaltet alle Informationen über die innere Geometrie, wie z.B. Lagenaufbau und Gewebemuster. Aus den Elementarzellen können anschließend Laminats konstruiert werden.

Als Grundlage für das hier präsentierte Beispiel dient eine validierte Elementarzelle, die von Prof. Lomov von der K.U. Leuven zur Verfügung gestellt wurde. Es handelt sich um

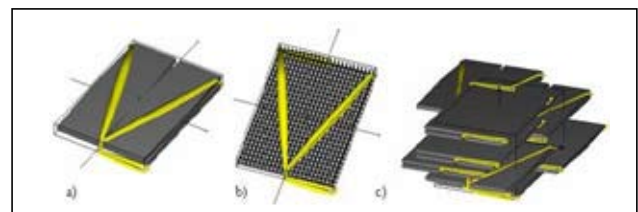


Bild 4: Elementarzelle in a) Legendarstellung, b) Faserdarstellung und c) Laminat aus 10 Elementarzellen

ein biaxiales Gelege mit 47 % Faservolumengehalt (V_f). Die erste Lage der Zelle liegt in 90° und die zweite in 0° -Richtung. Die Lagen sind mit einem Kunststoffgarn zusammen genäht, wodurch Risse und Kanäle entstehen, die mit Harz gefüllt sind. Die wichtigsten Geometriedaten des biaxialen Geleges sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Materialkennwerte der hochfesten und hochmoduligen Kohlenstofffasern T700 und des Matrixwerkstoffes Epoxy-Harz 828LV + DX 6514 wurden ebenfalls von der KU Leuven zur Verfügung gestellt. Die Werte des Harzes wurden dort mit Hilfe von Zugversuchen ermittelt. Die Materialeigenschaften des Nähgarns standen nicht zur Verfügung. Es wurde vereinfacht als isotropes Polyethersulfon (PES) angenommen. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Kennwerte der Materialien des verwendeten Faserverbundwerkstoffes.

In Bild 4 ist die Elementarzelle in a) Lagen- und b) Faserdarstellung zu sehen. Die Elementarzelle wird kompaktiert bis der Faservolumengehalt bei etwa 55% liegt. Anschließend werden 10 Elementarzellen (zufällig zueinander versetzt) zu einem Laminat gestapelt (Bild 4c)). Dabei wird jede zweite Zelle gespiegelt, um einen symmetrischen Aufbau zu erlangen.

Das Modell wird unter Beachtung der Stabilitätskriterien diskretisiert. Dabei wird eine allgemeine Beschreibung des Modells und für jede Zelle, die nicht vollständig mit Harz gefüllt ist, die Kenndaten, wie Lage, Material, Faservolumengehalt und Faserrichtung, in einer Datei gespeichert. Die Faser-

Maße		3,4 x 4,9 x 0,444 mm		
Flächendichte		309,7 g/m ²		
Faservolumengehalt		38,7 %		
Lage	Faserrichtung	∅ V _f %	Innerer V _f %	Channel/Crack
1	90°	47,0	49,2	Crack
2	0°	47,0	51,1	Channel

Tabelle 1: Geometriedaten einer Elementarzelle eines biaxialen Geleges [7]

Material	E ₁ [N/m ²]	E ₂ [N/m ²]	v ₁₂ [-]	v ₂₃ [-]	G ₁₂ [N/m ²]	Dichte [kg/m ³]	Bemerkung
T700	230E09	14E09	0.23	0.3	2.4E09	1760	Faser
Epoxy	3.5E09	3.5E09	0.35	0.35	1.29E09	1150	Matrix
PES	2.5E09	2.5E09	0.4	0.4	0.89E09	1370	Wirkgarn

Tabelle 2: Materialkennwerte für T700, Epoxy- Harz und PES [7]

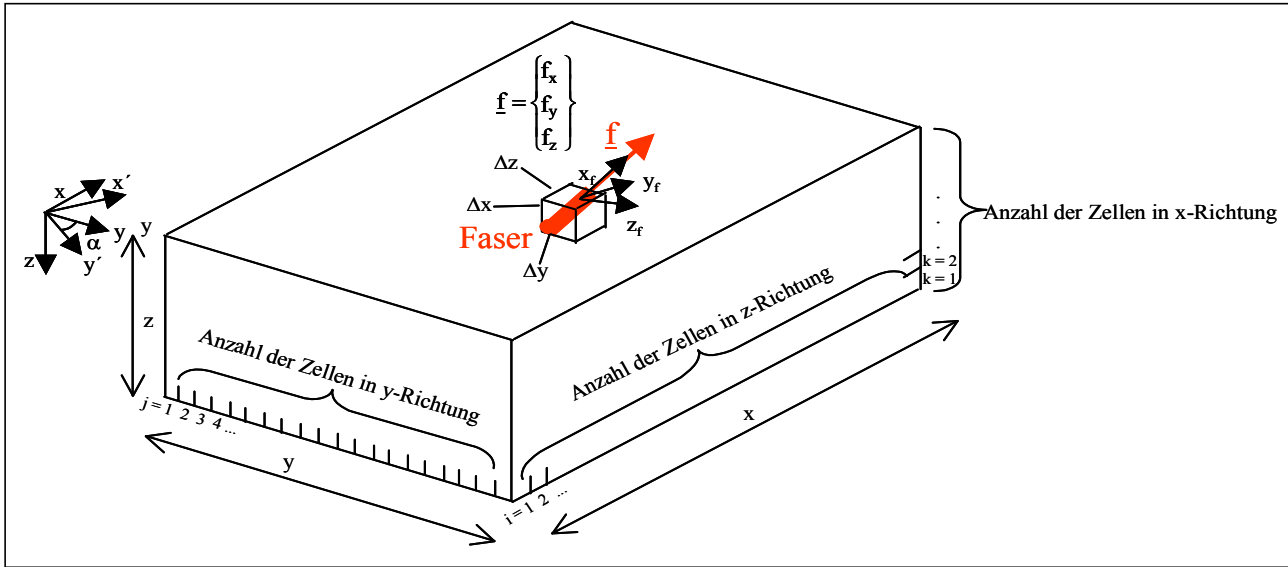


Bild 5: Schematische Darstellung der Modell-Diskretisierung

richtung wird durch einen Vektor (f_x, f_y, f_z) angegeben, durch den mit C++ die lokale Steifigkeitsmatrix berechnet werden kann. Bild 5 zeigt schematisch die Modell-Diskretisierung.

Ergebnisse

Für die Anregung wurde eine Frequenz f_T von 1 MHz und ein synthetischer RC2- Impuls (Raised Cosine mit 2 Zyklen, f_{RC2}) gewählt. Diese Impulsform ist der eines handelsüblichen Prüfkopfes sehr ähnlich und wurde zuvor bereits für EFIT-Simulationen verwendet. Die Bildungsvorschrift des RC2-Impulses lautet:

$$f_{RC2}^{(x=0)} = \begin{cases} (1 - \cos(\pi f_T t)) \cos(2\pi f_T t), & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{2}{f_T} \\ 0, & \text{für } t > \frac{2}{f_T} \end{cases} \quad (7)$$

Der Zeitverlauf des Impulses für 1 MHz sowie das zugehörige Frequenzspektrum sind in Bild 6 dargestellt. Mit Hilfe des Frequenzspektrums lässt sich die Maximalfrequenz bestimmen, die für die Stabilitätskriterien (5) und (6) benötigt wird.

Daraus ergibt sich für das Modell eine Gittergröße von 108 x 206 x 143 Zellen (bei einer Maximalfrequenz von 4 MHz). Die Länge eines Zeitschrittes entspricht 1.53 ns und es wurden 645 Zeitschritte simuliert.

Um die Simulationsergebnisse zu analysieren, werden Schnappschüsse der Wellenausbreitung dem inneren Aufbau gegenüber gestellt.

In Bild 7 sind a) das Dichte-Modell und b) ein Schnitt durch die dreidimensionale Darstellung der Verteilung der Longitudinalgeschwindigkeit für das Laminat dargestellt (Zeitschritt 285).

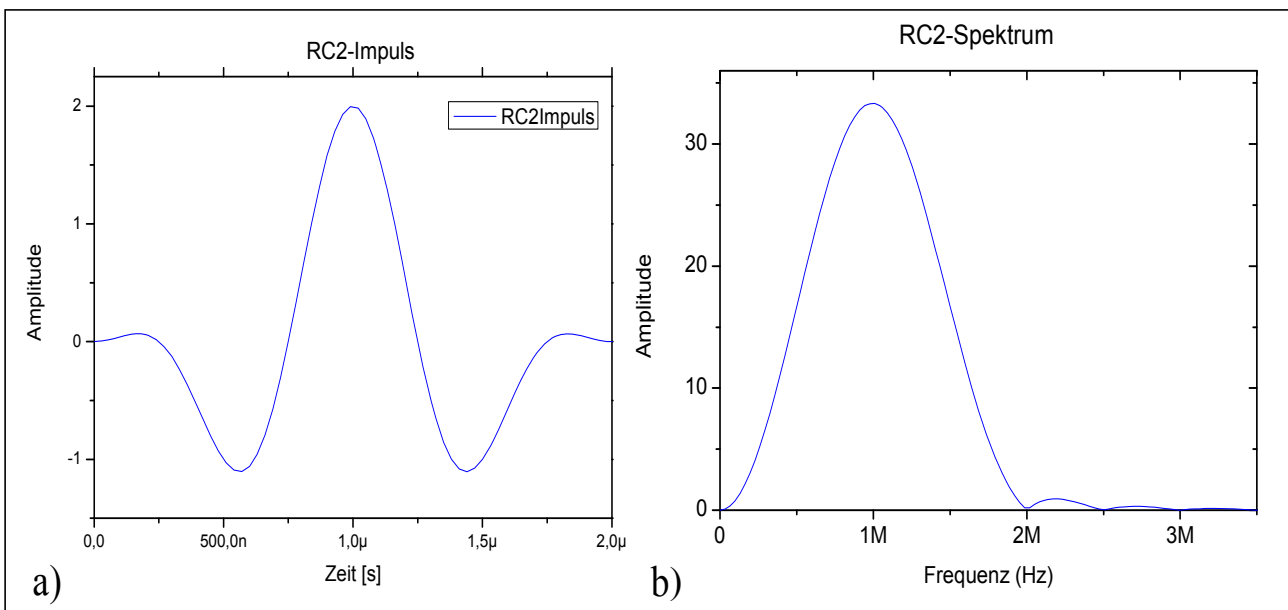


Bild 6: a) Zeitverlauf des verwendeten RC2-Signals und b) das zugehörige Frequenzspektrum

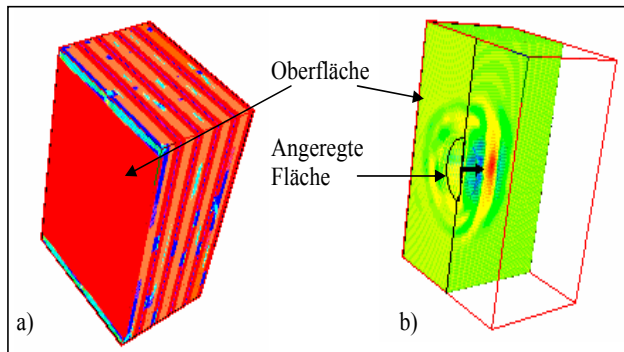


Bild 7: a) Dichte-Modell des Laminats aus zehn kompaktierten Elementarzellen und b) Ausbreitung der Longitudinalwelle im Modell (Zeitschritt 285) [8]

Im Dichtemodell sind 90°-Lagen rot, 0°-Lagen orange, Harz blau und der Nähfaden türkis dargestellt.

Die Visualisierung der Longitudinalgeschwindigkeit entspricht einem Schnappschuss der Welle. Zellen, die sich im Ruhezustand befinden, sind hellgrün, positive Geschwindigkeiten gelb und rot und negative Geschwindigkeiten blau dargestellt. Diese Farben geben auch den Anregungsimpuls wieder.

Betrachtet man einzelne Schnitte durch das Modell, werden die Wechselwirkungen zwischen der inneren Struktur und der Welle deutlich. In Bild 8 sind a) der axiale, b) der sagittale und c) der frontale Schnitt durch die Mitte des Geschwindigkeitsmodells zum Zeitschritt 285 abgebildet.

Im Vergleich dazu zeigen Bild 8 d), e) und f) die entsprechenden Schnitte durch das Dichtemodell. Es ist zu sehen, dass sich die Welle nicht in beide transversalen Richtungen gleich ausbreitet. Das liegt zum einen an den unterschiedlichen Faserrichtungen in den Lagen und zum anderen an den Rissen und Kanälen. Die Einflüsse der Harzansammlungen und des Wirkgarns sind hervorgehoben. Sie führen zur Streuung der Welle.

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei den EFIT-Simulationen Wechselwirkungen zwischen der Ultraschallwelle und der komplexen Struktur der FVW auftreten und die Simulation somit zur Untersuchung der Wechselwirkungen geeignet ist. Um sie genauer zu analysieren, müssten Modelle und Simulationen mit Experimenten in realen Bauteilen abgeglichen werden.

Danksagung

Die Autorin möchte sich an dieser Stelle bei Dr. Rudolf Bilgram und Dr. Rainer Stöbel von der EADS Deutschland GmbH sowohl für die Betreuung als auch für den Vorschlag der Arbeit für die Schiebold-Gedenkmünze bedanken.

Zusätzlicher Dank gilt Prof. Horst Baier von der Universität München für seine Betreuung und Björn van der Broucke und Prof. Stephan Lomov der K.U. Leuven für die Bereitstellung der Elementarzellen und Ihre Unterstützung im Umgang mit WiseTex.

Die Autorin möchte der DGZfP für die Verleihung der Schiebold-Gedenkmünze danken.

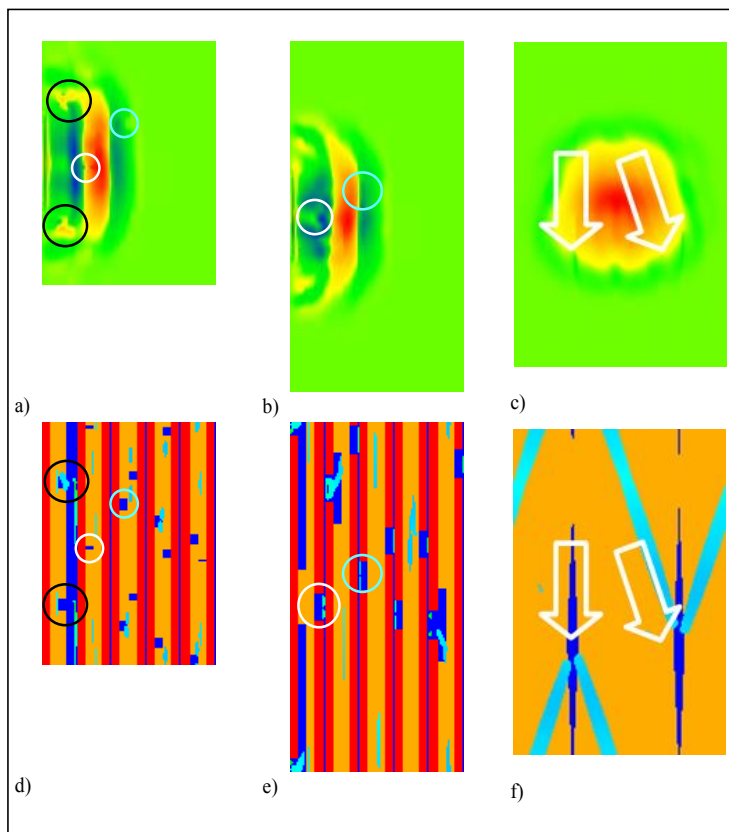


Bild 8: Schnitte durch das Geschwindigkeitsmodell (Zeitschritt 285) im Vergleich mit den Schnitten durch das Dichtemodell a) / d) axial b) / e) sagittal und c) / f) frontal [8]

Literatur

- [1] T. Weiland, „Eine Methode zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis“, AEU, Bd. 31, Issue 3, P. 116 – 120, 1977
- [2] Fellingner, P.; Marklein, R., „EFIT – Elastodynamische- Finite- Integrationstechnik zur Modellierung der Abstrahlung, Ausbreitung und Beugung elastischer Wellen“, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Seminar über Modelle und Theorien für die Ultraschallprüfung, 1990
- [3] F. Schubert, „Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlussfolgerungen für die zerstörungsfreie Prüfung“, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2000
- [4] R. Marklein, „Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik“, Shaker Verlag Aachen, 1997
- [5] Yee, K. S., „Numerical Solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media“, IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-14, pp. 302 – 307, 1966
- [6] Courant, R.; Friedrich, K.; Lewy, H., „Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik“, Mathematische Annalen 100, 32-74, 1928
- [7] S.V Lomov, T. Peeters, „Integrated Textile Preprocessor – WiseTex - User's guide“, K.U. Leuven, Leuven, 2002
- [8] J. Hegemann, „Simulation der Ultraschallwellenausbreitung in komplexen Faserverbundwerkstoffen“, Diplomarbeit, Technische Universität München, 2005