

Modellierung von Ultraschallprüfverfahren an Faserverbundwerkstoffen

Markus G. R. SAUSE¹, Andreea-Manuela ZELENYAK¹

¹ Universität Augsburg, Institut für Physik, Experimentalphysik II, D-86135 Augsburg

Kurzfassung. Ziel von Modellierungsverfahren ist es, die realen Messungen möglichst detailgetreu widerspiegeln zu können, so dass es bereits im Vorfeld der Messung möglich ist, die Prüfmöglichkeit einschätzen zu können. Insbesondere bei Faserverbundwerkstoffen spielt dabei neben den klassischen Herausforderungen die Beschreibung der inneren Merkmale, sowie die Interaktion der eingeschallten Welle mit den inneren Merkmalen eine wichtige Rolle. In diesem Beitrag wird eine Modellierungsumgebung vorgestellt, die es erlaubt die vollständige Kette der Ultraschallprüfung in solchen Werkstoffen abzubilden. Dazu zählen die Signalerzeugung im Prüfkopf, die Schallausbreitung, die Interaktion mit inneren Merkmalen sowie die Umwandlung der Ultraschallwelle am Prüfkopf in ein elektrisches Signal. Dabei wird auf den Einfluss der einzelnen Komponenten für die Modellierung eingegangen und die jeweiligen Lösungsansätze für den Bereich der Finiten-Elemente-Modellierung vorgestellt.

1. Einführung

Während im Bereich der Auslegung und Berechnung von Strukturen Modellierungen im Vorfeld der tatsächlichen Umsetzung bereits seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik sind ist dies für die meisten Bereiche der zerstörungsfreien Prüfung leider noch nicht der Fall. Analog zu den anderen technischen Disziplinen wäre es allerdings enorm hilfreich bereits im Vorfeld einer Prüfaufgabe die technische Durchführbarkeit beurteilen zu können. Sicherlich existieren für viele Standardaufgaben analytische Formeln die als Hilfsmittel dienen können um den Einschallwinkel festzulegen oder die Schallbündelaufweitung abzuschätzen [1]–[4]. Dennoch verlieren diese für viele anwendungsrelevanten Geometrien oder Materialien ihre Gültigkeit. Wie auch in der Berechnung von Strukturen haben sich daher mittlerweile viele Berechnungshilfsmittel für zerstörungsfreie Prüfmethode etabliert, die entweder auf semi-analytischen Ansätzen basieren oder verstärkt auf numerische Verfahren setzen.

Zu den großen Vertretern dieser Softwarepakete zählen Ansys, Abaqus, Comsol Multiphysics und CIVA. Während die ersten drei Softwarepakete auf dem Einsatz von Finite-Elemente-Modellierung (FEM) basieren, profitiert CIVA in seiner Rechengeschwindigkeit vom Einsatz von analytischen Ansätzen. Nachteilig ist bei CIVA jedoch die Kapselung des Systems, so dass dem Nutzer nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Anpassung der Modelle bleibt. Im Gegensatz dazu bieten die klassischen FEM-Programme viele Freiheiten bei der Gestaltung von Prüfkörpern, der Einbindung und Gestaltung der Prüfköpfe sowie der Einbindung von Materialeigenschaften. Aktuell besitzt jedoch keines der Softwarepakete die Möglichkeit die gesamte Bandbreite der Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung abzudecken. Für die Modellierung der Ultraschallprüfung sind jedoch alle Programme



grundsätzlich geeignet [5]–[8]. Grundsätzlich lässt sich die Modellierung dabei in drei verschiedene Teilaspekte gliedern:

- 1) Die Beschreibung der (Ultra-)Schallausbreitung in Festkörpern und Flüssigkeiten
- 2) Die Beschreibung der Interaktion von (Ultra-)Schallwelle und Ungängen
- 3) Die Beschreibung des Prüfkopfes beim Senden und Empfangen der (Ultra-)Schallwelle

Von diesen genannten Teilaspekten ist nur der dritte Bereich unabhängig von den zu untersuchenden Prüfkörpern, spielt jedoch für die Signalinterpretation eine entscheidende Rolle (vgl. Abschnitt 2.3). Die ersten beiden Aspekte richten sich nach dem jeweiligen Werkstoff des Prüfkörpers sowie der Geometrie. Für die meisten klassischen Werkstoffe sind die Herangehensweisen dafür gut bekannt und einer detailgetreuen Abbildung des gesamten Prüfvorgangs steht nichts im Wege.

Im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe bildet jedoch einerseits die Darstellung des Werkstoffs, sowie die Darstellung der Ungängen bereits eine zentrale Herausforderung. Im Gegensatz zu Metallen sind faserverstärkte Kunststoffe heterogene und anisotrope Werkstoffe, deren interne Architektur (z.B. Lagenaufbau) bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen. Ebenso sind die typischen Ungängen oder auch Merkmale nur schwer zu klassifizieren und in ihrer Vielfalt eindeutig zu beschreiben. Bereits für einen einfachen „Riss“ gilt es zu unterscheiden ob dieser in der Kunststoffmatrix verläuft, ob die Fasern gebrochen sind und in welcher Orientierung er im Bauteil vorliegt. Bedingt durch die Orientierung der einzelnen Faserlagen kann dieser nicht an jeder Position im Werkstoff in jeder Richtung auftreten. Zudem kann eine größere Schadenszone eine ungewöhnliche Komplexität erreichen, die anders als in Metallen eine weite 3-dimensionale Verzweigung aufweist und viele verschiedene Merkmale enthält.

Ziel der Modellierung einer Ultraschallprüfung für diese Werkstoffe ist es daher, die nötige Detailtreue in der Darstellung zu ermöglichen, ohne dabei die Rechenzeit der Modelle soweit zu erhöhen, dass eine praktische Anwendung nicht mehr wirtschaftlich erscheint.

2. Modellierung und Validierung

Für die folgenden Untersuchungen wurde als Modellierungsumgebung das kommerziell erhältliche Softwarepaket COMSOL Multiphysics 5.1 verwendet. Für alle Rechnungen werden das „structural mechanics module“, das „CFD module“ und das „AC/DC module“ der Software verwendet. Damit lässt sich die gesamte Messkette der Ultraschallprüfung innerhalb einer Programmumgebung abbilden (s. Abb. 1). Innerhalb einer P-SPICE Schaltungssimulation wird zunächst der elektrische Sendeimpuls erzeugt und als Signalspannung an das piezoelektrische Wandlerelement des Prüfkopf weiter gegeben. Durch Lösen der gekoppelten partiellen Differentialgleichungen für den direkten piezoelektrischen Effekt wird dadurch vom Wandlerelement eine Ultraschallwelle erzeugt, die sich zunächst im Prüfkopfmodell und anschließend im Prüfkörper ausbreitet. Im Fall einer Wasservorlaufstrecke wird die Ultraschallausbreitung über Fluidodynamik beschrieben, im Falle des Prüfkörpers und des Prüfkopfes wird die Ultraschallausbreitung über Festkörpermechanik beschrieben. Dabei wird sowohl die Interaktion der Ultraschallwelle mit den Rändern des Prüfkörpers als auch Teil-Reflexionen beim Eindringen in Medien mit verschiedenen Impedanzen und bei der Interaktion mit inneren Defekten berücksichtigt. Dadurch gelangt die zurück reflektierte Welle mit zeitlicher Verzögerung wieder zum Prüfkopf und wird dort durch die Berechnung des indirekten piezoelektrischen Effekts wieder in eine Signalspannung umgewandelt und als Eingangssignal einer P-SPICE

Schaltungssimulation übergeben. Dieser gesamte Ablauf ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Innerhalb der Programmumgebung von COMSOL Multiphysics werden alle genannten Modellierungsschritte zeitgleich durchgeführt, so dass die sequentielle Darstellung in Abb. 1 nur zur besseren Übersicht dient.

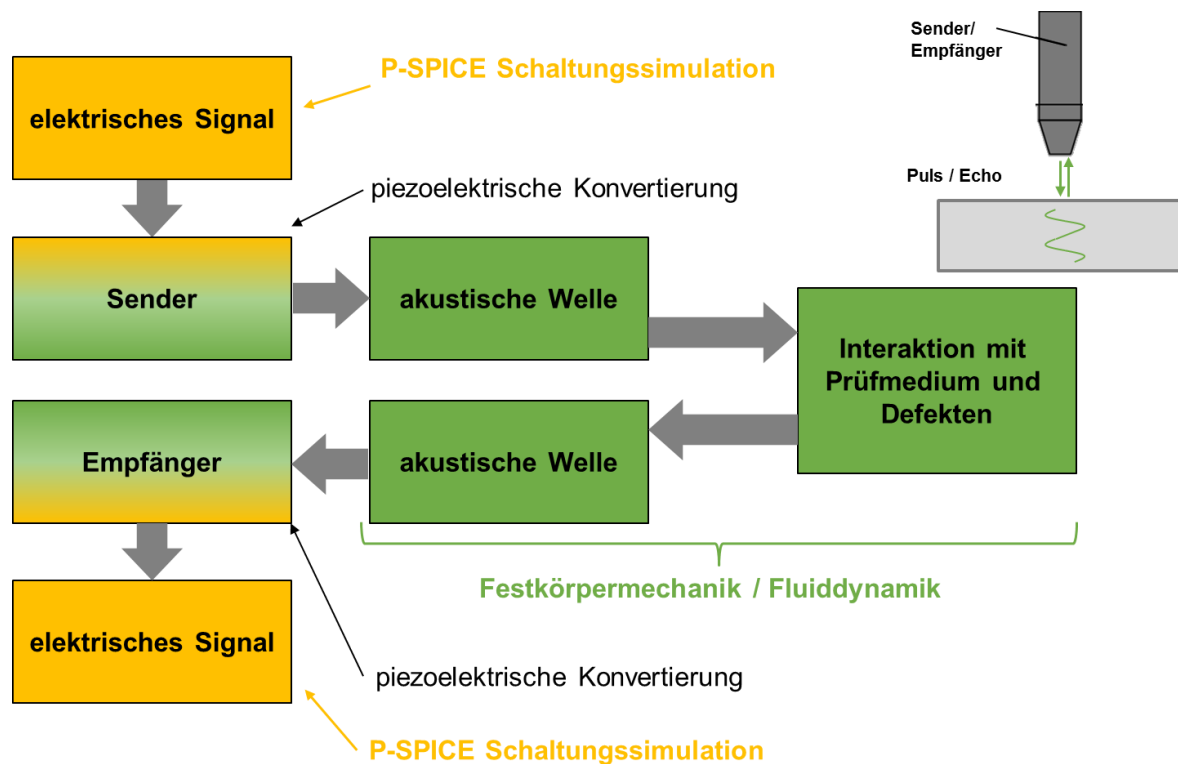


Abb. 1. Schematische Darstellung der gesamten Modellierungskette.

In den folgenden Abschnitten soll kurz auf die einzelnen Bestandteile der Modellierungskette eingegangen werden und die spezifischen Herangehensweisen näher erläutert werden.

2.1 Wellenausbreitung

Die Beschreibung der Ausbreitung von Ultraschallwellen in Festkörpern und Flüssigkeiten ist zwar kein vollständig abgeschlossenes Forschungsfeld, jedoch sind die wesentlichen Grundlagen seit Jahrzehnten bekannt [1]–[4]. Im Bereich der numerischen Modellierung beschränkt sich die wesentliche Aufgabenstellung daher auf zwei Aspekte. Dies sind zum einen die richtige Wahl der Diskretisierung und zum anderen die richtige Wahl der Randbedingungen. In manchen Programmpaketen ist die richtige zeitliche und räumliche Diskretisierung bereits implizit enthalten, da sonst mit den eingesetzten Algorithmen keine Konvergenz erreicht wird. Im Fall von COMSOL Multiphysics kann der Nutzer den verwendeten Zeitschritt und die verwendete Rechennetauflösung frei wählen. Da beide Einstellungen maßgeblich zur gesamten Rechendauer beitragen bietet es sich an zur Wahl der richtigen Einstellungen Konvergenzstudien durchzuführen. Dazu wird in Analogie zu [9] die Zielgröße überwacht und das Rechenetz oder der Zeitschritt so lange verfeinert bis kein Unterschied mehr zwischen den Signalen zu erkennen ist. Dies ist als Beispiel für ein A-Scan Signal in Abb. 2-a dargestellt. Der erste Puls stellt dabei das Oberflächenecho, der zweite Puls das Rückwandecho in einem Aufbau analog zu Abb. 6 dar. Variiert man die Rechennetauflösung des Prüfkörpers, so zeigt sich eine Veränderung im Rückwandechosignal. Dies kommt durch die verfälschte Beschreibung der

Signalausbreitung zustande. Zur Quantifizierung des Effektes kann die Kohärenz zwischen dem aktuellen A-Scan Signal und einem Referenzsignal (z.B. mit sehr hoher Auflösung) heran gezogen werden. Dies ist für die drei gezeigten Signale in Abb. 2-b im Vergleich zu einer Referenz mit 0,06 mm Rechennetauflösung dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass für höhere Frequenzen die berechnete Kohärenz zwischen den Signalen unter einen Wert von 1 fällt, was einer perfekten Übereinstimmung entsprechen würde. Bis zu der verwendeten Prüffrequenz von 5 MHz kommen also nur Rechenetze kleiner als 0,16 mm in Frage um keine Verfälschung bei der Berechnung der Signalausbreitung zu erhalten. Analog kann bei der Wahl des Zeitschritt vorgegangen werden (im gezeigten Beispiel 2 ns). Diese Vorgehensweise erlaubt eine deutliche Steigerung der Effizienz der Rechenmodelle, da Bereiche, die für den aktuellen A-Scan keine Rolle spielen entsprechend schlechter aufgelöst werden können, während die Bereiche im Laufweg der Ultraschallwelle entsprechend hoch aufgelöst werden müssen.

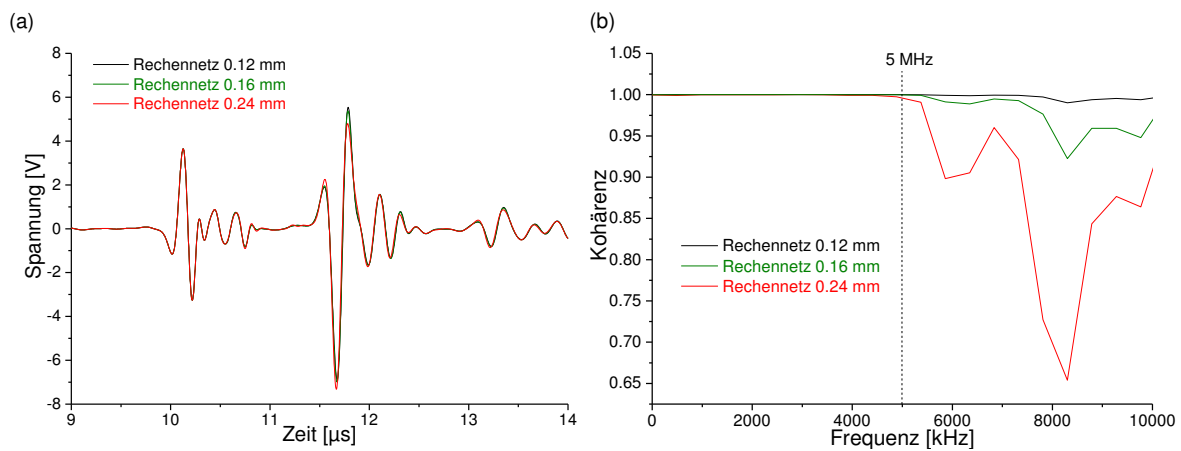


Abb. 2. Rechenergebnis eines Ultraschallpulses für verschiedene Rechennetauflösungen (a) und daraus berechnete Kohärenz im Vergleich zu Referenzlösung (b).

Die Wahl der richtigen Randbedingungen ist spezifisch für die jeweilige Geometrie. Als besonders nützlich für die Effizienz der Modelle stellen sich jedoch Randbedingungen dar, die einfallende Wellen entweder vollständig absorbieren und nur gering zurück reflektieren. Dies erlaubt die Verringerung des Modellvolumens durch Einschränkung des modellierten Bereiches, falls die in der Realität auftretenden Reflektionen im modellierten Zeitraum keine Rolle spielen. Dies lässt sich in COMSOL Multiphysics standardmäßig durch „perfectly matched layers“ und „low reflecting boundaries“ erreichen, deren spezielle Implementierung für anisotrope Medien in [9] gezeigt ist.

Neben der Anwendung von anisotropen Materialdaten spielt ansonsten für die faserverstärkten Kunststoffe vor Allem die Berücksichtigung der Signaldämpfung eine Rolle. Diese lässt sich durch einen komplexen Steifigkeitstensor explizit realisieren [10]–[12]. Schwierig bei diesem Ansatz ist jedoch die von Hosten und Castaings gezeigte Messung der komplexen Steifigkeitsmatrix. Bei der Modellierung der Puls-Echo Prüfung in hinreichend dünnen Strukturen spielen die Dämpfungsbeiträge aus diesem Anteil allerdings ohnehin eine untergeordnete Rolle. Entscheidend in diesem Bereich ist vor Allem die geometrischen Aufweitung des Schallfeldes, was bei einer vollständigen 3-dimensionalen Modellierung ohnehin in der Modellierung enthalten ist [3].

2.2 Darstellung von Merkmalen in Faserverbundwerkstoffen

Die Notwendigkeit für eine 3-dimensionale Modellierung des Prüfkörpers ergibt sich jedoch auch aus der Architektur der Faserverbundwerkstoffe.

2.2.1 Lagenaufbau

Zur Berücksichtigung des Lagenaufbaus, d.h. der Orientierung der einzelnen Faserlagen im Werkstoff ist ohnehin mit Ausnahme weniger Spezialfälle eine 3-dimensionale Beschreibung notwendig. Durch den Symmetriebruch der Einzellagen ist nur selten eine Darstellung als Teilvolumen mit Symmetrierandbedingungen oder gar als 2-dimensionales Modell möglich. Insbesondere verbietet sich für die Modellierung der Puls-Echo-Prüfung die sonst übliche Herangehensweise der Reduktion auf 2-dimensionale Scheibenelemente. Die reduzierte Raumrichtung entspricht hier gerade der Prüfrichtung und stellt damit die entscheidende Richtung zur Erfassung im Modell dar. Daher sind für die korrekte Modellierung entsprechend auch die Steifigkeitsdaten des Werkstoffs in der Richtung senkrecht zur Ebene notwendig. Diese sind in der Praxis jedoch selten verfügbar. Ebenso erfordert die Darstellung von komplizierteren Textilarchitekturen, wie Geweben, Geflechtes oder vergleichbarem die Darstellung des Prüfkörpers in einem 3-dimensionalen Ansatz.

2.2.2 Innere Defekte

Im Weiteren erfordern auch die inneren Merkmale des Faserverbundwerkstoffs, die nicht auf die explizite Architektur zurückgehen eine Darstellung in 3-Dimensionen. Diese Defekte können in der Modellierung nur teilweise mit einfachen geometrischen Formen angenähert werden. Während für eingeschlossene Porosität im Faserverbundwerkstoff statistische Verteilungen von Ellipsoiden angenommen werden können, so lassen sich Risse und Delaminationen (flächige Risse parallel zur Oberfläche) häufig nur unzureichend genau mit Polygonen oder Rechtecken nachbilden. Dies gilt insbesondere für größere Schädigungszonen, z.B. als Folge eines Impacts. Als Alternative bietet sich daher eine direkte Einbettung des Defektes in einer FEM-Umgebung an. Wie in Abb. 3 dargestellt besteht die Möglichkeit aus hochauflösenden Computertomographiedaten direkt ein CAD-Modell des Defektes zu erhalten. Wie in [13], [14] gezeigt wird dabei mit Hilfe eines Segmentierungsverfahrens der relevante Bereich (hier Rissnetzwerk) im Volumendatensatz erfasst und als Oberflächennetzwerk extrahiert. Zur anschließenden Verwendung in einem FEM-Programm wird die extrahierte Oberfläche zunächst geglättet und repariert, bevor diese als CAD-Modell in das FEM-Programm importiert werden kann. Dies erlaubt eine sehr detailgetreue Abbildung der tatsächlichen Defektgeometrie und damit erst einen echten quantitativen Vergleich zu experimentellen Daten.

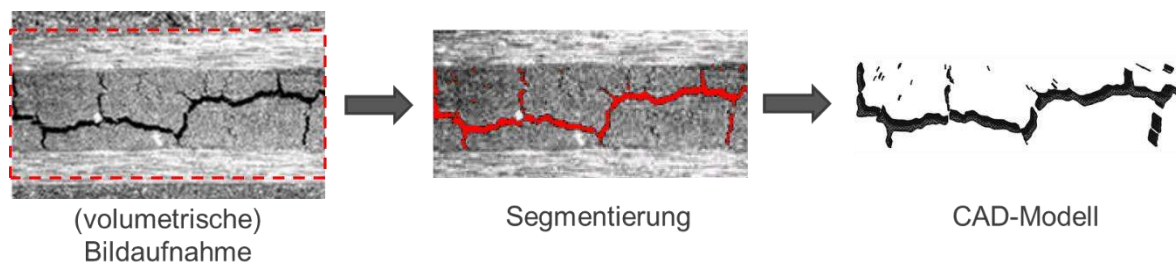


Abb. 3. Extraktion von inneren Defekten aus CT-Aufnahmen zur Verwendung in FEM-Berechnung.

2.3 Berücksichtigung von Sender- und Empfängercharakteristik

Unabhängig vom verwendeten Werkstoff ist für die quantitative Berechnung des Ultraschallsignals eine genaue Kenntnis der Charakteristik des Ultraschallprüfkopfes notwendig. In Abb. 4 ist hierzu als typisches Beispiel ein Handprüfkopf, ausgeführt als Einzelschwinger gezeigt. Dieses 3-dimensionale Objekt lässt sich bei Kenntnis des inneren Aufbaus in ein CAD-Modell überführen und im hier gezeigten Fall in ein einfaches 2-dimensionales Modell, dessen Schnittbild ebenfalls in Abb. 4 gezeigt ist. Zur Modellierung dieses Ultraschallprüfkopfes ist die Kenntnis der Materialdaten für Dämpfungsmasse, Gehäuse, Wandlerelement, Anpassungsschicht und Vorlaufstrecke notwendig. Diese sind üblicherweise nur teilweise verfügbar, so dass die Validierung des Modells anhand von Parameterstudien erfolgt.

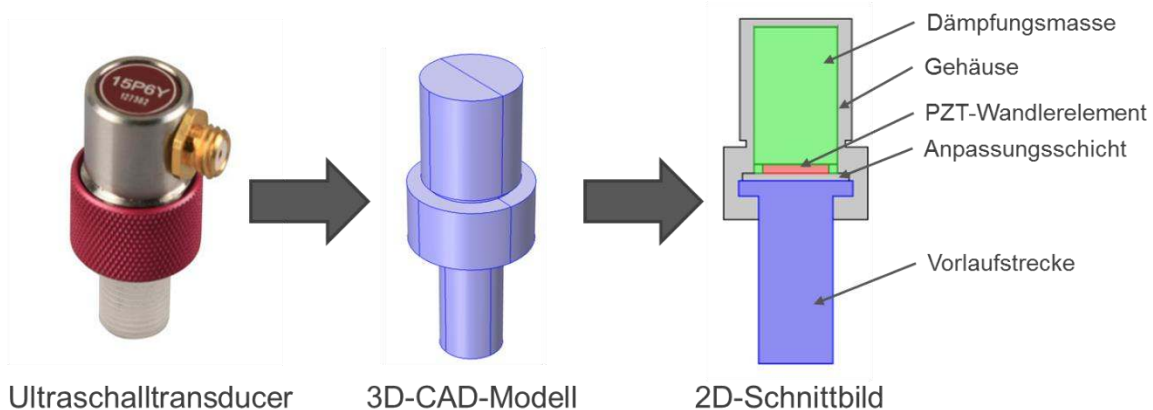


Abb. 4. Details zur Modellierung der Komponenten eines typischen Ultraschallprüfkopfes.

Innerhalb von COMSOL Multiphysics wird in der P-SPICE Schaltungssimulation ein Anregungspuls definiert, der dem experimentell verwendeten Puls des Signalgenerators entspricht (z.B. Nadelpuls mit bestimmter Flankensteilheit). Über eine Schaltung, die den experimentell verwendeten Kabelimpedanzen entspricht wird dieses Signal an die eine Seite des Wandlerelementes gelegt. Die andere Seite wird geerdet. Im Wandlerlement wird dieses Potential durch den piezoelektrischen Effekt in einen Ultraschallpuls umgesetzt, dessen Ausbreitung in Abb. 5 zu zwei Zeitpunkten dargestellt ist. Als Ausbreitungsmedium wird neben der Vorlaufstrecke eine Stahlplatte mit 2 mm Dicke und bekannten Materialeigenschaften gewählt. Dadurch werden zusätzliche Unsicherheiten bezüglich der Materialeigenschaften des Prüfmediums weitgehend ausgeschlossen. Die zurück reflektierte Ultraschallwelle wird im Wandlerelement wieder in eine Signalspannung umgesetzt und als Spannungsabfall über einem Widerstand in der P-SPICE Simulation ausgelesen und mit dem experimentell verwendeten Verstärkungsfaktor multipliziert. Dies erlaubt einen direkten quantitativen Vergleich des A-Scan Signals zwischen Experiment und Modellierung wie in Abb. 5 dargestellt. Bei unzureichender Übereinstimmung kann so eine iterative Anpassung unbekannter Materialdaten des Prüfkopfes erfolgen. Ebenso lassen sich dadurch wenig relevante Teile des Prüfkopfes im Modell entfernen, da dies zur Steigerung der Effizienz des Modells beiträgt.

Dieselbe Vorgehensweise empfiehlt sich zur Validierung des Modells in Kombination mit Faserverbundwerkstoffen. Da die Materialdaten des Faserverbundwerkstoffs häufig unbekannt oder mit hohen Unsicherheiten behaftet sind kann die iterative Validierung des Modells anhand eines Referenzsignals erfolgen. Bei einer hohen Zahl unbekannter Materialdaten empfiehlt sich jedoch im Vorfeld eine Sensitivitätsanalyse des Modells oder ein Optimierungsansatz.

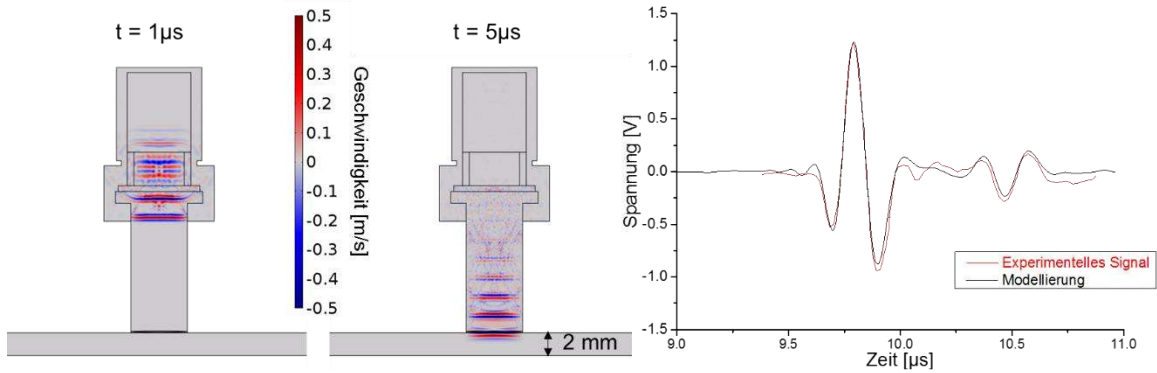


Abb. 5. Validierung des Ultraschallprüfkopfs anhand Referenzmessung auf Stahlplatte.

3. Beispiel – Zwischenfaserbruch in einem Kreuzlagenaufbau

Ein Beispiel für ein vollständiges Modell zur Ultraschallprüfung im Puls-Echo Verfahren ist in Abb. 6 gezeigt. Hier wurde der Prüfkopf auf die notwendigen Bestandteile Dämpfungsmasse, Wandlerelement und Vorlaufstrecke reduziert und in 2D als axialsymmetrisches Objekt implementiert. Die gezeigte Darstellung als 270° Rotationskörper soll dies verdeutlichen. Über eine Projektionsvorschrift werden die Auslenkungen der Unterseite der Vorlaufstrecke bidirektional auf den modellierten Prüfkörper übertragen. Dieser ist als Kreuzlagenaufbau aus einem T800/913 carbonfaserverstärkten Epoxidharz implementiert. Die Orientierung der Faserlagen ist dazu in Abb. 6 rechts dargestellt. Als künstlich eingebrachter Defekt dient in diesem Beispiel ein eingebetteter Zwischenfaserbruch mit 30° Neigung zur Senkrechten und 1 mm Kantenlänge.

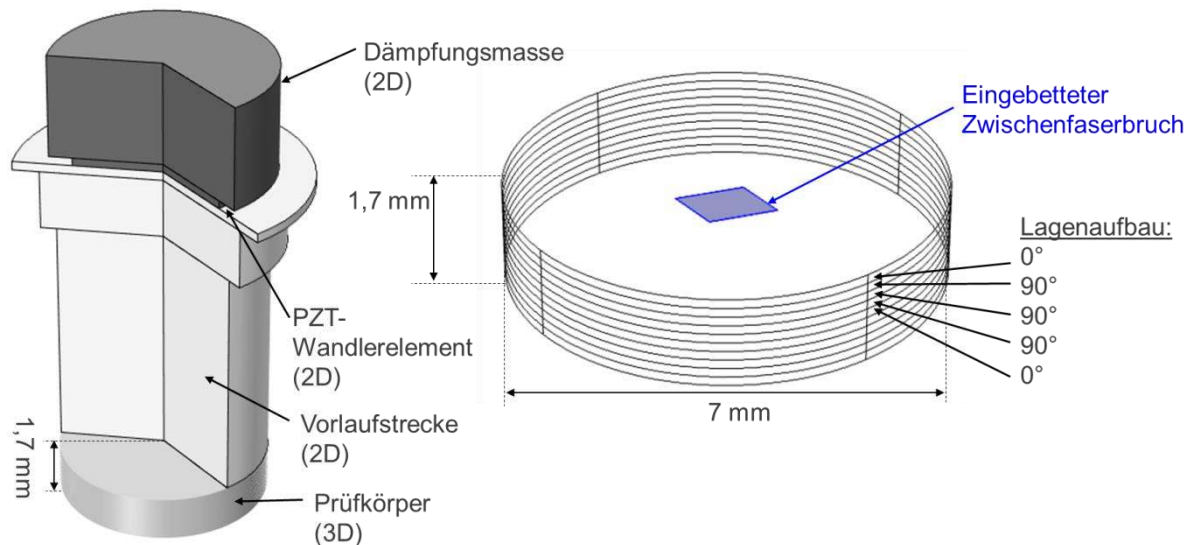


Abb. 6. Kopplung des 2D-Ultraschallprüfkopf an 3D Prüfkörpergeometrie (links) und Details der Prüfkörpergeometrie (rechts).

Das Rechenetz für den Prüfkopf wird diesem Fall mit einer Maximalauflösung von 0,06 mm gewählt, für den Prüfkörper zu 0,16 mm. Der Zeitschritt für die gewählte Modellierungsdauer von 12 μs wird zu 2 ns gewählt.

Das Ergebnis der Modellierung ist als Schnittbild in der Prüfkörpermitte in Abb. 7 dargestellt. Die einfallende Welle wird dabei aufgrund des hohen Impedanzsprungs zum eingebrachten Zwischenfaserbruch fast vollständig reflektiert, wie in den drei aufeinanderfolgenden Schnittbildern zu erkennen ist. Aufgrund der Größe des Defektes

(Kantenlänge 1 mm) führt dies jedoch zu einem kaum wahrnehmbaren Fehlerecho, wie im Vergleich des A-Scan zum ungeschädigten Modell zu erkennen ist. Stattdessen rühren viele der sichtbaren Echos im Bereich zwischen Oberflächenecho und Rückwandecho von den (Mehrfach-)Reflektionen an den einzelnen Materiallagen her. Im Vergleich zum ungeschädigten Zustand wird das Vorhandensein des Zwischenfaserbruchs noch am ehesten durch die Abnahme des Rückwandechos um etwa 0,9 dB sichtbar. Dies verdeutlicht die Problematik der Trennung von Materialsignatur und Fehlersignatur in Faserverbundwerkstoffen und wird in realen Proben durch die Dickenschwankung des Prüfkörpers und Signalrauschen noch deutlich erschwert.

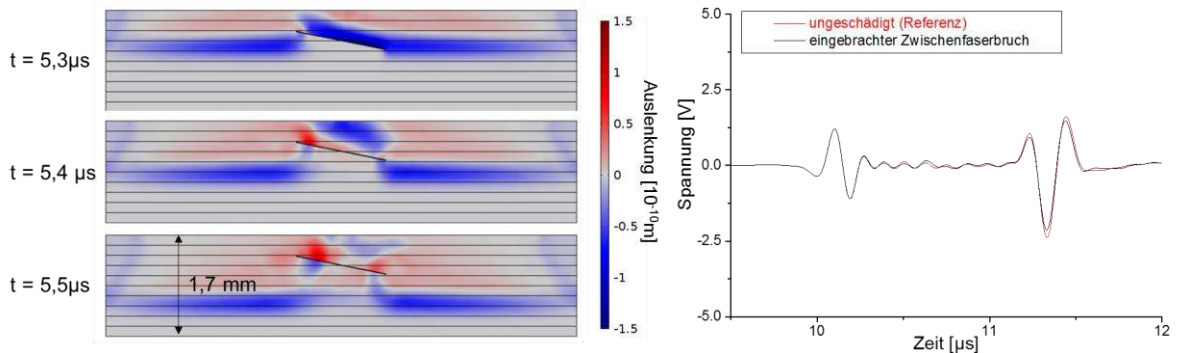


Abb. 7. Interaktion der einfallenden Welle mit dem Zwischenfaserbruch zu drei Zeitpunkten (links) und A-Scan Signale mit und ohne Zwischenfaserbruch (rechts).

4. Zusammenfassung

Auf Basis moderner FEM-Programme lässt sich eine detailgetreue Modellierung von Ultraschallsignalen bei der Puls-Echo Prüfung von Faserverbundwerkstoffen erreichen. Zur quantitativen Berechnung der Signale ist jedoch eine Abbildung der gesamten Messkette erforderlich, was eine gute Kenntnis der einzelnen Parameter und Materialdaten voraussetzt.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekt „MAIzfp – Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätssicherung von Faserverbundwerkstoffen“ innerhalb des Spitzencluster MAI Carbon.

Referenzen

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 4th ed. American Society for Testing and Materials, 1990.
- [2] P. J. Shull, Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications. CRC Press, 2002.
- [3] B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids, 2nd ed. Krieger Publishing Company, Malabar, 1990.
- [4] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge University Press, 2004.
- [5] A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, S. Marzano, M. D. Piccioni, and D. Scardigno, “Simulation of an Ultrasonic Immersion Test for the Characterization of Anisotropic Materials,” in Proceedings of the 2012 COMSOL Conference, 2012.
- [6] G. Baskaran, C. L. Rao, and K. Balasubramaniam, “Simulation of the TOFD technique using the finite element method,” Insight - Non-Destructive Test. Cond. Monit., vol. 49, no. 11, pp. 641–646, Nov. 2007.

- [7] F. Honarvar and S. Khorasani, "Simulation of Time-of-Flight Diffraction (ToFD) Technique by Finite Element Method," in *Simulation in NDT*, 2010.
- [8] O. Dupond, V. Duwig, and T. Fouquet, "Influence of stress corrosion crack morphology on ultrasonic examination performances," *Rev. Prog. QNDE*, 2008.
- [9] M. G. R. Sause, M. A. Hamstad, and S. Horn, "Finite element modeling of lamb wave propagation in anisotropic hybrid materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 249–257, 2013.
- [10] M. Castaings, C. Bacon, B. Hosten, and M. V. Predoi, "Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 3, p. 1125, Feb. 2004.
- [11] M. Castaings, P. Cawley, R. Farlow, and G. Hayward, "Single Sided Inspection of Composite Materials Using Air Coupled Ultrasound," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 17, no. 1, pp. 37–45, 1998.
- [12] B. Hosten, "Heterogeneous structure of modes and Kramers–Kronig relationship in anisotropic viscoelastic materials," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 3, p. 1382, 1998.
- [13] M. G. R. Sause and A.-M. Zelenyak, "Modellierung von Schallemissionsquellen auf Basis von volumetrischen Bildinformationen," in *20. Kolloquium Schallemission*, 2015, pp. 1–9.
- [14] S. Kalafat, A.-M. Zelenyak, and M. G. R. Sause, "In-situ monitoring of composite failure by computing tomography and acoustic emission," in *20th International Conference on Composite Materials*, 2015, pp. 1–8.