

Modell-basierte Optimierung der Ultraschallprüfung anisotroper Werkstoffe am Beispiel von Faserverbundbauteilen

Martin SPIES*, Hans RIEDER*, Ernst RAU**

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1,
67663 Kaiserslautern, Tel. +49-631-31600-4276, Email Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de

**Cassidian Air Systems, Rechliner Strasse, 85077 Manching

Kurzfassung. In diesem Beitrag beschäftigen wir uns mit der Ultraschallprüfung von CFK-Bauteilen mit geneigten Oberflächen. Zur Verbesserung der Rückwandechos werden die Einschallwinkel in der Regel bauteilabhängig durch entsprechend modifizierte Vorlaufkörper angepasst. Um ein langwieriges Ausprobieren zu vermeiden, müssen die Wellencharakteristika wie die richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeiten, die Abweichung des Energietransports von der Einschallrichtung und das orientierungsabhängige Reflexionsverhalten der Rückwand modelliert werden. Wir illustrieren die Optimierung der Ultraschallprüfung von CFK-Bauteilen mittels konventioneller und Phased-Array-Sensoren anhand eines praxisrelevanten Beispiels und diskutieren das Potential solcher Modell-basierter Ansätze.

1. Einführung

Die Verwendung von Hochleistungsmaterialien und die Anwendung neuer Herstellungsprozesse im Bereich der Luft- und Raumfahrt erfordert die Verfügbarkeit entsprechend ausgereifter Prüfverfahren. Die hohen Anforderungen im Hinblick auf die Fehlerdetektion gelten auch für die Ultraschallprüfung, die im Zuge von Instandhaltungs- und Reparaturaktivitäten eingesetzt wird. Typische Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung von kohlefaserverstärkten Komponenten (CFK) sind der Verlust der Empfindlichkeit und Schallfeldverzerrungen, wenn der Prüfkopf nicht optimal an die Inspektionsbedingungen angepasst wird. Der Einsatz geeigneter Modelle zur Berücksichtigung der Materialeigenschaften Anisotropie und Schallschwächung ist daher unerlässlich, um die derzeit eingesetzten Verfahren zu verbessern und um neue Verfahren zu entwickeln.

In diesem Beitrag beschäftigen wir uns mit der Ultraschallprüfung von CFK-Bauteilen mit geneigten Oberflächen. Zur Verbesserung der Rückwandechos werden die Einschallwinkel in der Regel bauteilabhängig durch entsprechend modifizierte Vorlaufkörper angepasst. Langwieriges Ausprobieren kann durch den Einsatz von Simulationsverfahren vermieden werden. Dazu müssen die Wellencharakteristika wie die richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeiten, die Abweichung des Energietransports von der Einschallrichtung und das orientierungsabhängige Reflexionsverhalten der Rückwand modelliert werden. Die Prüfung mit Phased-Arrays bietet weitere Möglichkeiten, ist allerdings auch mit größerer Komplexität verbunden. Der Einsatz von Phased-Arrays erfordert die Anwendung entsprechender Modelle, beispielsweise zur korrekten Berechnung der Verzögerungszeiten. Wir illustrieren die Optimierung der Ultraschallprüfung von CFK-Bauteilen mittels konventioneller und Phased-Array-Sensoren anhand eines Beispiels aus der Praxis.

2. Simulation von Schallfeldern und Reflektorsignalen in anisotropen Werkstoffen

Die Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung von CFK-Materialien sind einerseits auf die Schallschwächung und dem daraus resultierenden ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis zurückzuführen. Die physikalischen Ursachen liegen in der Viskoelastizität der Epoxidharzmatrix und der Ultraschallstreuung an den Kohlefasern. Zum anderen führt die Anisotropie dieser Werkstoffe zu komplexen Wellenausbreitungsphänomenen bei Einschallung in Nichtsymmetrierichtungen (siehe z.B. [1-3]). Während auch die Schallschwächung mittels geeigneter Modelle berücksichtigt werden kann [4], konzentrieren wir uns hier auf die Modellierung der durch die Anisotropie bedingten Effekte.

Die Anregung und die Ausbreitung von Ultraschallwellen werden von den Materialeigenschaften und durch die Bauteiloberflächen entscheidend beeinflusst. Insbesondere die Prüfung von anisotropen Werkstoffen erfordert die Vorab-Simulation zur Prüfplanung und zur Ermittlung optimaler Prüfparameter. Zur Berechnung von Prüfkopf-Schallfeldern in isotropen und anisotropen Materialien können Fernfeld-Näherungen eingesetzt werden [9], während sich für den Nah- und Fernfeldbereich die Berechnung mittels Generalisierter Punktquellensynthese (GPSS) als leistungsfähig erwiesen hat [5]. Als Beispiel für deren Validierung zeigt Abb. 1 Simulationsergebnisse im Vergleich mit experimentell in Durchschallung ermittelten Schallfeldprofilen für ein unidirektional verstärktes Komposit [6].

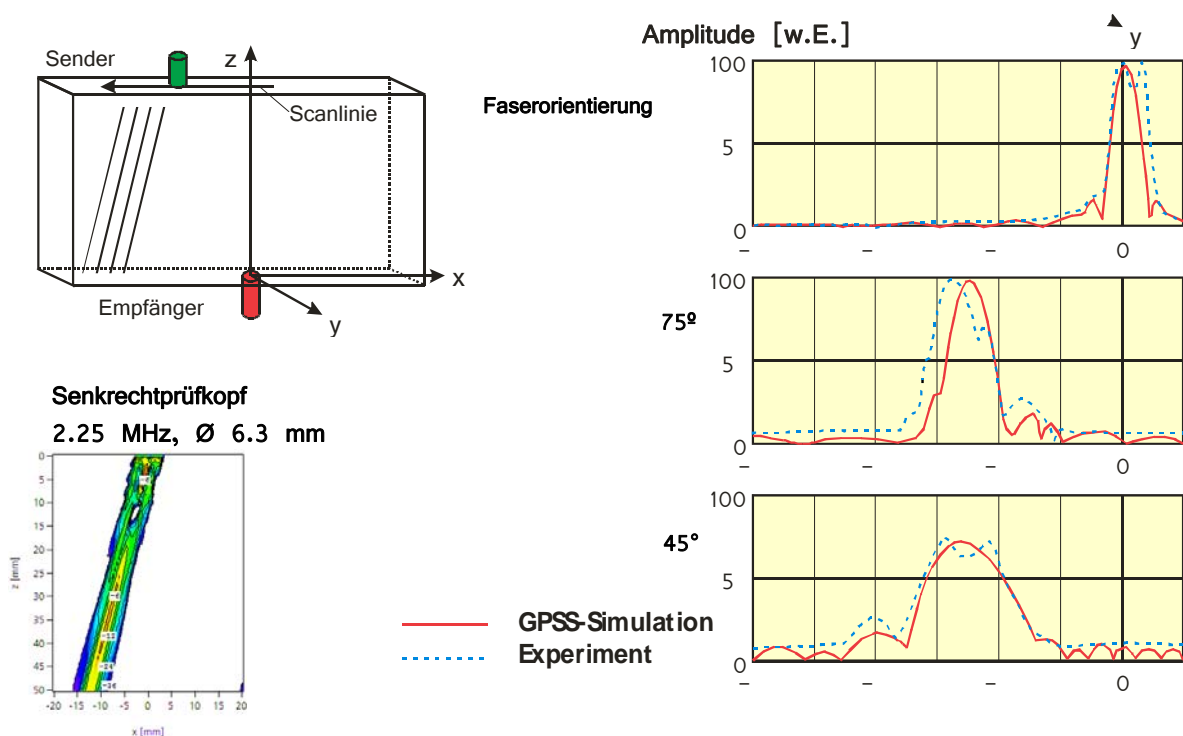


Abb. 1 Gemessene und mittels simulierte Schallfeldprofile für drei Testkörper mit unterschiedlicher Faserorientierung relativ zur Senkrechten. Bei fester Senderposition wurden die Proben auf der Unterseite mit einem identischen Empfangsprüfkopf abgescannt, die Normierung der Profile erfolgte auf die Maximalamplitude im 0° Fall. Das im Material bei 75° Faserorientierung erzeugte Schallfeld ist unten links dargestellt.

Die Modellierung des Abstrahlverhaltens von Streuern und die Berechnung von Fehlersignalen in Nah- und Fernfeld wurde in [7] mittels Generalisierter Punktquellensynthese unter Anwendung der Kirchhoffschen Näherung durchgeführt. Beispiele für die Validierung der GPSS sind in [8] im Hinblick auf die Fehlerprüfung von Bauteilen mit gekrümmten Oberflächen zu finden. Im Fernfeld kann das Abstrahlverhalten flächiger Reflektoren analog zum Falle eines Prüfkopfes beschrieben werden, indem diese als

Sekundärstrahler betrachtet werden. Die resultierenden Formulierungen für die Amplituden-Ortskurven (Echodynamikkurven) gelten dann im gegenseitigen Fernfeld von Prüfkopf und Reflektor; die für den anisotropen Fall abgeleiteten Beziehungen wurden im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen validiert [9].

Die beschriebenen Simulationsverfahren stehen am Fraunhofer ITWM im Sinne eines umfassenden Werkzeugkoffers („Toolbox“) für die verschiedensten Prüfkfigurationen zur Verfügung und werden unter anderem zur Modell-basierten Optimierung der Ultraschallprüfung anisotroper Werkstoffe eingesetzt.

3. Inspektion von CFK-Bauteilen mit geneigten Oberflächen

Wir betrachten ein praktisches Beispiel einer modernen CFK-Struktur bei Cassidian Air Systems, Manching [10]. Abbildung 2 (links) zeigt das zu prüfende Bauteil mit den interessierenden Inspektionsbereichen. Bereiche mit Schrägen an den Rückwänden wirken sich nachteilig auf die Prüfbarkeit bei Senkrechteinschallung aus; durch Anpassung eines Vorlaufkörpers kann die Detektion des Rückwandechos verbessert werden. Die Auswahl des geeigneten Einschallwinkels wird allerdings durch die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten im anisotropen Material erschwert. Durch den Einsatz geeigneter Simulationsverfahren kann langwieriges Ausprobieren vermieden werden.

Die zur Bestimmung des optimalen Keilwinkels notwendigen Modellierungsschritte gliedern sich in: (i) die Berechnung des auf die Rückwand auftreffenden Schallfeldes, das vom in der Praxis eingesetzten Prüfkopf mit dem jeweiligen Vorlaufkörper erzeugt wird; (ii) die Berechnung des an der Rückwand reflektierten Wellenfeldes mittels Kirchhoffscher Näherung und (iii) die Berechnung des im Impuls-Echo-Betrieb empfangenen Rückwandsignals mittels Auldschem Reziprozitätstheorem [11]. Die hierbei variablen Geometrieparameter sind der Keilwinkel α_1 und damit der Einschallwinkel α_2 im Material einerseits sowie der Neigungswinkel β der Rückwand und die Faserorientierung (unter Winkel κ zur Oberfläche) andererseits (Abb. 2, rechts).

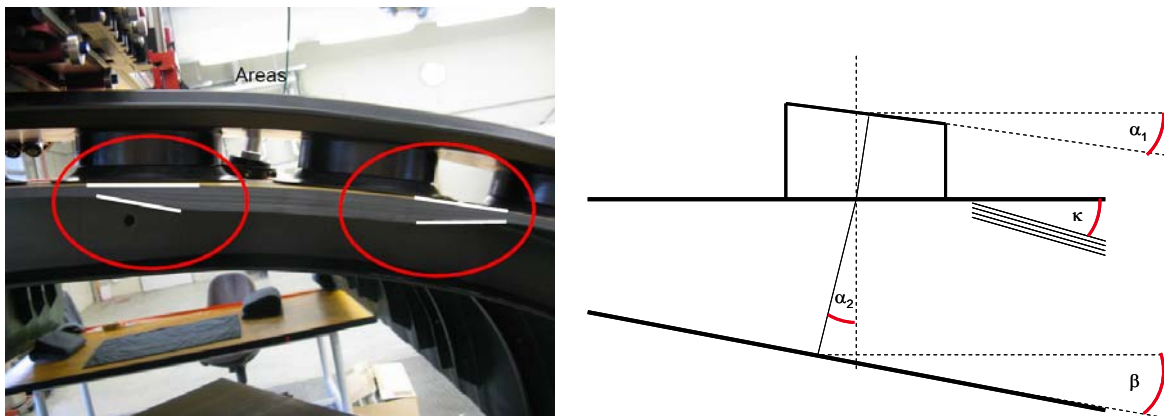


Abb. 2 Bauteil mit geneigter Rückwand in den Übergangsbereichen (links); Skizze der Prüfanordnung mit den variablen Geometrie- und Einschallparametern.

4. Simulationsergebnisse

Reflexions- und Transmissionsprozess

Die anisotropen elastischen Materialeigenschaften führen zu gravierenden Unterschieden bei der Ultraschallausbreitung im Vergleich zu konventionellen, isotropen Werkstoffen. Als

Folge der richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeiten ergeben sich wesentliche Unterschiede bei den Reflexions- und Transmissionskoeffizienten für das Zweischicht-System Vorlaufkörper-Bauteil. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 eine Gegenüberstellung der Energietransmissionskoeffizienten bei Einschallung in Stahl und in CFK. Man erkennt, dass bei der angegebenen Faserorientierung die Quasi-Transversalwelle (quasi-TV) über den gesamten Winkelbereich ins CFK-Bauteil transmittiert wird, während bei Stahl nach Erreichen des 2. kritischen Winkels keine Wellen mehr im Material erzeugt werden. Bereits diese grundlegenden Unterschiede bei ‚einfachen‘ Fragestellungen im Vergleich zu isotropen Werkstoffen zeigen, wie wichtig solche Berechnungen im Zuge der Prüfplanung und Prüfoptimierung sowie der Ergebnisinterpretation sind.

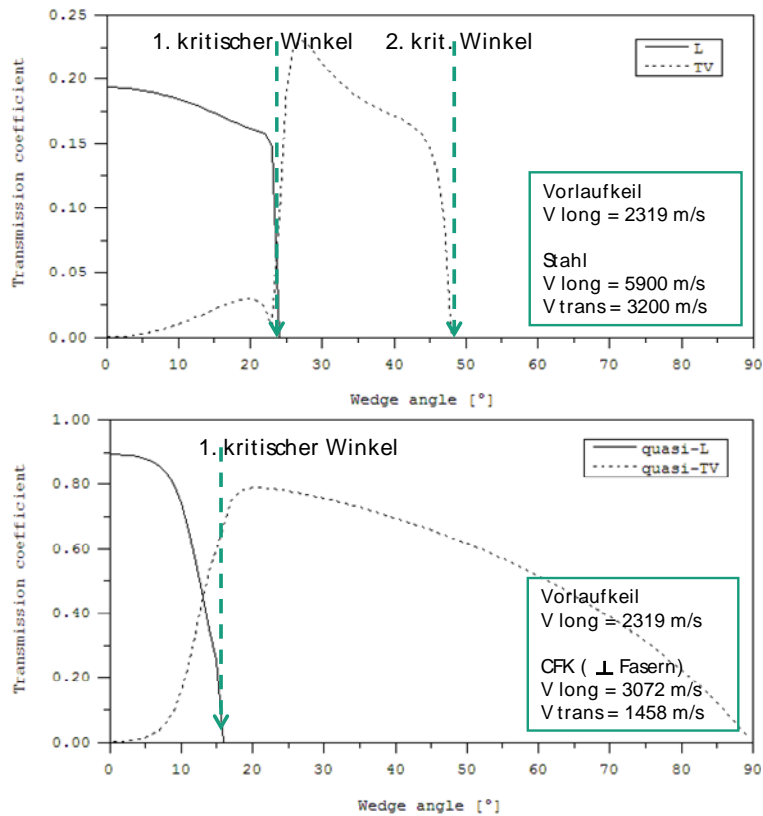


Abb. 3 Energietransmissionskoeffizienten als Funktion des Keilwinkels (einfallende Longitudinalwelle) bei Einschallung in Stahl (oben) und CFK (unten; Faserorientierung senkrecht zur Grenzfläche; die angegebenen Schallgeschwindigkeitswerte gelten bei Einschallung senkrecht zu den Fasern).

Ermittlung des Keil-/Einschallwinkels mittels Simulation

Zur Bestimmung des optimalen Vorlaufkörpers für das hier adressierte Prüfproblem wurden Amplituden-Ortskurven (AOK) berechnet, wobei der Keilwinkel von -10° bis $+15^\circ$ variiert wurde. Zwar beträgt die Mittenfrequenz des in der Praxis eingesetzten Senkrecht-Prüfkopfes nominell 5 MHz (Durchmesser 6.3 mm), allerdings liegt die Mittenfrequenz der Empfangssignale aufgrund der Dämpfung im Material bei etwa 4 MHz; diesen Wert haben wir bei den monochromatischen Berechnungen verwendet. Abbildung 4 zeigt die dabei verwendeten Geometrieparameter, wobei als Reflektor eine 5 mm Flachbodenbohrung anstelle der Rückwand angenommen wurde. Das Ergebnis der Simulationen ist in Abb. 5 zu sehen, in der die AOK als Funktion des Keilwinkels dargestellt sind. Die maximale Reflektoramplitude wird bei einem Keilwinkel von 6° erreicht, dies entspricht einem Einschallwinkel von etwa 7° . Wie Abb. 6 zeigt, trifft das Schallfeld in diesem Fall fast senkrecht auf die Rückwand.

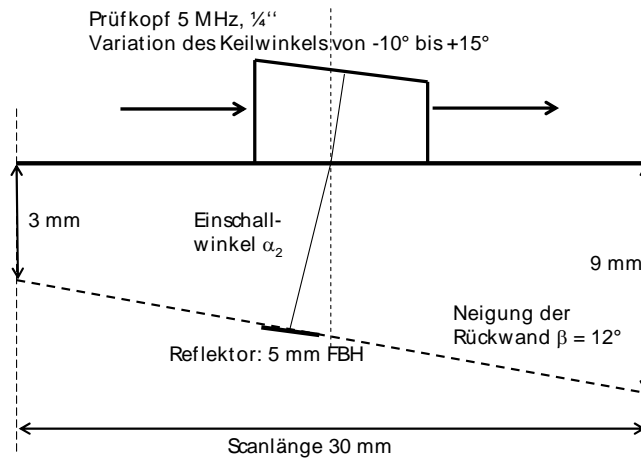


Abb. 4 Schematische Darstellung der Prüfkonfiguration mit den gewählten Simulationsparametern.

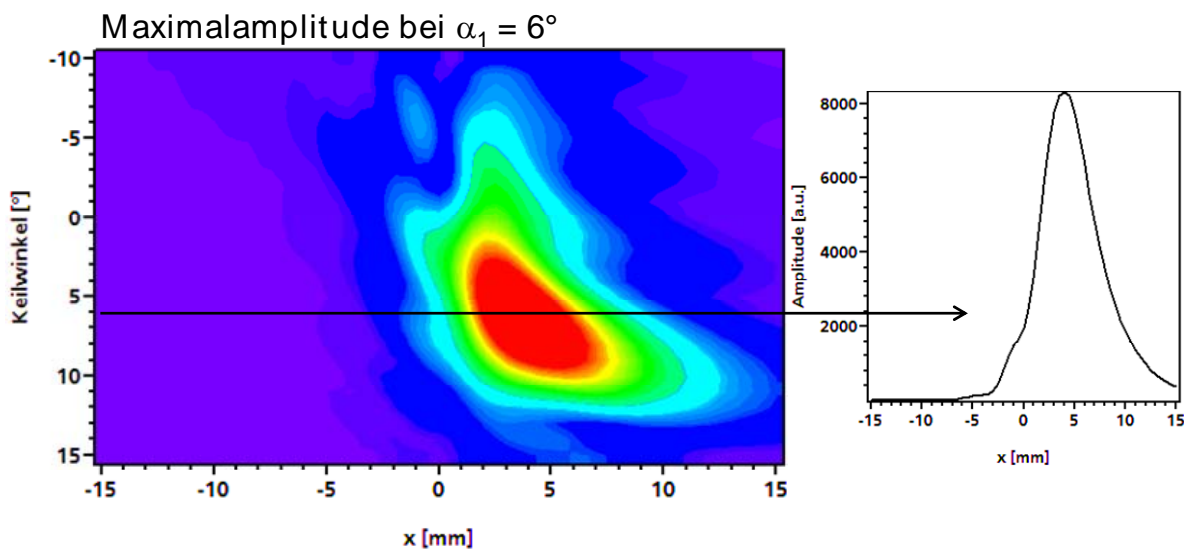


Abb. 5 Berechnete Amplituden-Ortskurven als Funktion des Keilwinkels (Faserwinkel 0° zur Bauteiloberfläche).

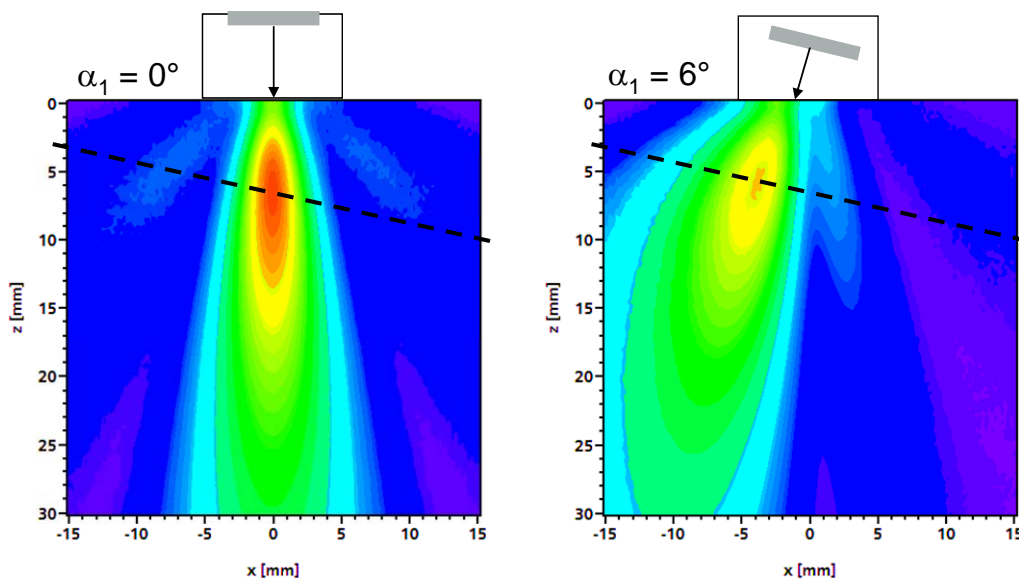


Abb. 6 Berechnete Schallfelder für die Keilwinkel 0° und 6° ; die Rückwand im Inspektionsbereich ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet.

In [10] wurden zwei Vorlaufkörper mit Einschallwinkeln von 6.3° und 13° im Hinblick auf die erzielbare Verbesserung der Rückwandecho-Detektion an dem in Abb. 2 gezeigten Bauteil untersucht. Der Einschallwinkel bei der 13° Technik erzeugt ein unbefriedigendes Einschallecho, worunter die getriggerte Blendenposition leidet. Die A-Scans für beide Inspektionstechniken zeigen allerdings, dass die Amplituden der Rückwandechos (RWE) bei beiden Einschallwinkeln praktisch gleich sind [10]. Anhand von Detailfotos erkennt man, dass die Faserorientierung im interessierenden Inspektionsbereich nicht parallel zur Oberseite des Bauteils, sondern leicht geneigt unter Winkel von ca. 9° zur Oberfläche verläuft. Berücksichtigt man dies in der Simulationsrechnung (Abb. 7), so zeigt sich in den AOK bei den beiden Einschallwinkeln in etwa die gleiche Amplitude des RWE. Darüber hinaus wird bei einem Keilwinkel von etwa 10° das Maximum des RWE erreicht.

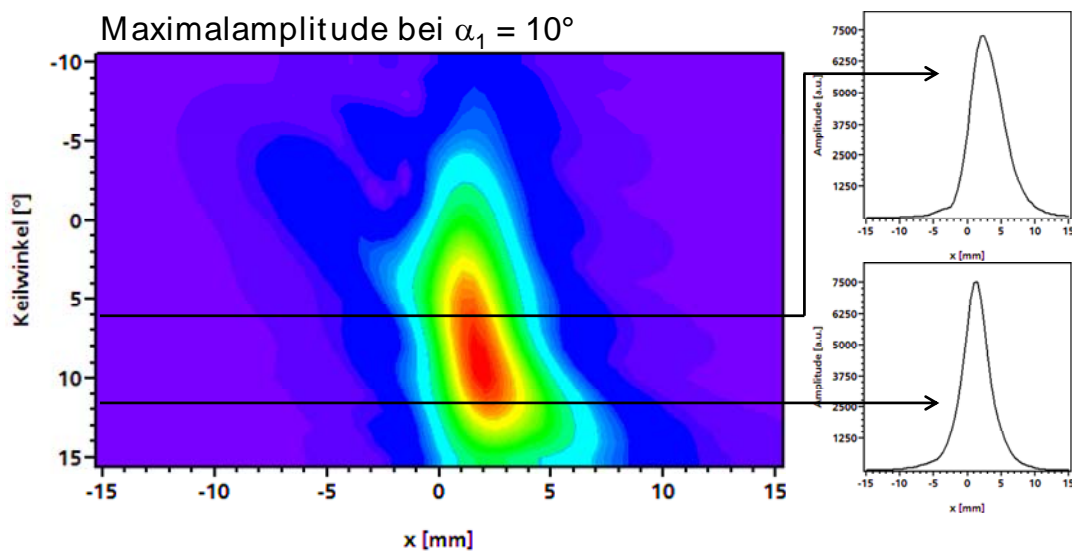


Abb. 7 Berechnete Amplituden-Ortskurven als Funktion des Keilwinkels (Faserwinkel 9° zur Bauteiloberfläche).

Schallfeld- und AOK-Simulation für Phased-Array-Anwendungen

Diese Resultate zeigen die starke Abhängigkeit der Inspektionsergebnisse von den eigentlichen Materialparametern, hier im Wesentlichen von der Faserorientierung. Um mögliche Schwankungen dieser Parameter im realen Bauteil auszugleichen, aber auch um den Wechsel von Vorlaufkörpern bei der Inspektion während des Scannens zu vermeiden, bietet sich der Einsatz von Phased-Arrays an. Durch Anpassung der Verzögerungszeiten können sowohl die Bereiche mit ebener Rückwand, als auch die Übergangsbereiche mit geneigter Rückwand ohne Auswechseln der Sensoren bzw. Vorlaufkörper in einem Scan-Vorgang geprüft werden.

Als Beispiel betrachten wir ein 16-elementiges Linear-Array (Elementabstand 0.6 mm, Schnittbreite 0.1 mm, aktive Fläche 9.5 mm x 6 mm, Frequenz 4 MHz). Analog zu Abb. 6 zeigt Abb. 8 die Schallfelder im Inspektionsbereich bei einem Schwenkwinkel von 17° (links) und bei zusätzlichem Fokussieren auf eine Tiefe von 12 mm durch entsprechende Anpassung der Element-Verzögerungszeiten (rechts, Faserorientierung 0°). Durch die Fokussierung der Energie lässt sich eine über einen weiten Winkelbereich gleichmäßige Amplitude des RWE erzielen (Abb. 9, Faserorientierung 9°).

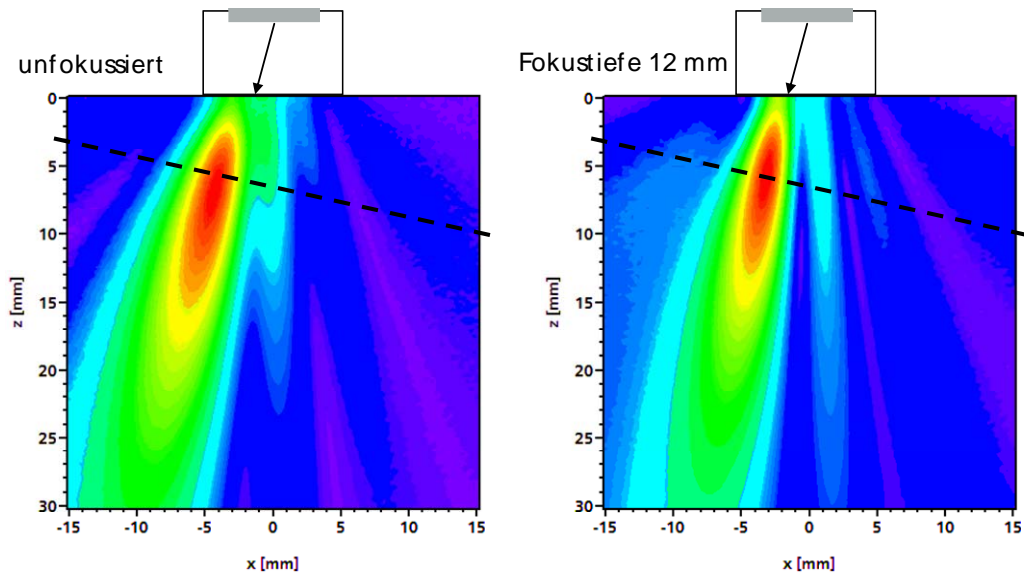


Abb. 8 Berechnete Phased-Array-Schallfelder für einen Schwenkwinkel von 17° (links unfokussiert, rechts fokussiert auf eine Tiefe von 12 mm); die gestrichelte Linie kennzeichnet die Rückwand.

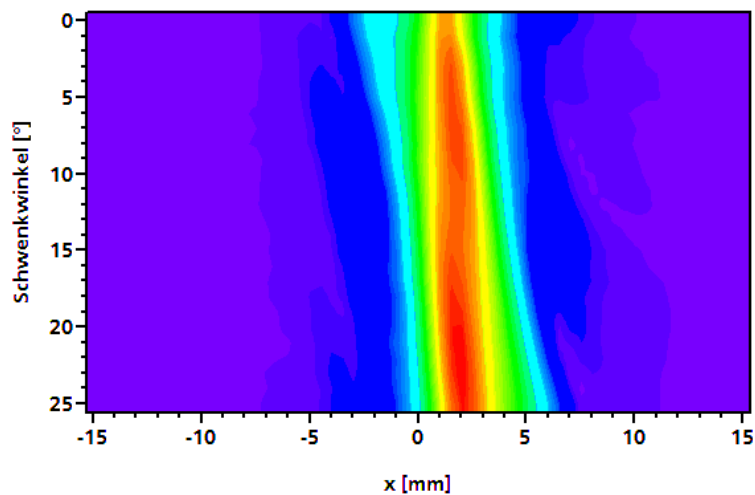


Abb. 9 Berechnete Amplituden-Ortskurven als Funktion des Schwenkwinkels für das untersuchte 16 Element-Linear-Array (Faserwinkel 9° zur Bauteiloberfläche).

5. Zusammenfassung

Stellvertretend für anisotrope Werkstoffe haben wir uns in diesem Beispiel mit Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen beschäftigt. Aufgrund der richtungsabhängigen elastischen Materialeigenschaften gestaltet sich die Ultraschallprüfung von unidirektional verstärkten oder geschichteten CFK-Bauteilen im Allgemeinen schwierig. Dies ist bedingt durch eine Vielzahl von komplexen - in isotropen Werkstoffen nicht auftretenden - Wellenausbreitungsphänomenen. Modellierung und Simulation helfen beim Verständnis und bei der Optimierung der Prüfkfigurationen. Die hier präsentierten Ergebnisse gehen von der Annahme eines homogenen Werkstoffs mit wohlbekannten Eigenschaften (elastische Konstanten, Dichte, Faserorientierung) aus. Diese Annahme ist allerdings üblicherweise nicht bzw. nicht vollständig zu erfüllen. Unterschiede zwischen

den Simulationsvorhersagen und den experimentellen Ergebnissen sind daher in der Regel durch diesen Umstand zu begründen. Dennoch zeigen die Resultate unseres Beitrages, dass die Vorab-Simulation insbesondere bei diesen Materialien wesentliche Vorteile bietet. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Phased-Arrays, denn die korrekte Berechnung der Element-Verzögerungszeiten erfordert die theoretische Erfassung und Berücksichtigung der richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeiten. Aber auch bereits ‚einfache‘ Fragestellungen wie die Berechnung von Reflexions- und Transmissionskoeffizienten führen zu mathematisch anspruchsvollen Berechnungen [12]. Eine Vielzahl solcher Detailmodelle liegt am Fraunhofer ITWM in Form von Berechnungsprogrammen vor, die zur Erarbeitung der hier gezeigten Resultate eingesetzt wurden. Während wir hier immer von einer konstanten Faserorientierung, d.h. einem homogenen Werkstoff, ausgegangen sind, lassen sich auch inhomogene Faserausrichtungen (wie etwa deren Variation über die Bauteildicke) in geeigneten Modellen beispielsweise zur Schallfeldberechnung berücksichtigen [13].

Referenzen

- [1] B.A. Auld. Acoustic Fields and Waves in Solids. Vol. I, II, John Wiley, New York (1973).
- [2] A.H. Nayfeh. Wave Propagation in Anisotropic Media with Applications to Composites. North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1995)
- [3] J.L. Rose. Ultrasonic Waves in Solid Media. University Press, Cambridge (2004)
- [4] M. Spies. Modeling Transient Radiation of Ultrasonic Transducers in Anisotropic Materials Including Wave Attenuation. in: Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 21, Melville, New York, American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings CP509), 807-814 (2002)
- [5] M. Spies. Semi-Analytical Elastic Wavefield Modeling Applied to Arbitrarily Oriented Orthotropic Media. J. Acoust. Soc. Am., 110, 68-79 (2001)
- [6] M. Spies, F. Walte. Application-Directed Modeling of Radiation and Propagation of Elastic Waves in Anisotropic Media. in: Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 14, Plenum Press, New York, 1013-1020 (1995)
- [7] M. Spies. Kirchhoff Evaluation of Scattered Elastic Wavefields in Anisotropic Media. J. Acoust. Soc. Am. 107, 2755-2759 (2000)
- [8] M. Spies. Validierung semi-analytischer Simulation der Fehlerprüfung an ebenen und gekrümmten Bauteilen anhand des internationalen UT Benchmarks 2007. DGZfP Berichtsband 113-CD DACH Jahrestagung (2008), P35
- [9] M. Spies. Quantitative Evaluation of Defects in Anisotropic Media Using the Far-Field Radiation Characteristics of Vibrating Sources. in: Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 21, Melville, New York, American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings CP509), 107-114 (2002)
- [10] E. Rau, E. Grauvogl, P. Bartsch. Vergleich konventioneller und Phased Array Ultraschallanwendungen in der Luftfahrt. DGZfP Berichtsband BB 120-CD Seminar des FA Ultraschallprüfung, 11./12. Nov. 2009, Stutensee (2009), V10
- [11] B.A. Auld. General Electromechanical Reciprocity Relations Applied to the Calculation of Elastic Wave Scattering Coefficients. Wave Motion, 1, 3-10 (1979).
- [12] M. Spies. Transducer-Modeling in General Transversely Isotropic Media via Point-Source-Synthesis. Theory. J. Nondestr. Eval., 13, 85-99 (1994)
- [13] M. Spies. Modeling of Transducer Fields in Inhomogeneous Anisotropic Materials Using Gaussian Beam Superposition. NDT&E International, 33, 155-162 (2000)