

Der Einfluss der Schallschwächung in Guss- und Verbundwerkstoffen auf die Schallfelder von Standard- und Gruppenstrahler-Prüfköpfen

Martin SPIES, Hans RIEDER

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Tel. +49-631-316004276, Email Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag betrachten wir den Einfluss der frequenzabhängigen Schallschwächung auf die Schallfeldausbildung. Die Berechnung erfolgt mit der Generalisierten Punktquellensynthese (GPSS) im Frequenzbereich mit anschließender inverser Fourier-Transformation. Für faserverstärkte Kompositmaterialien erfolgt die Berücksichtigung der durch Viskoelastizität bedingten Schallschwächung durch die Verwendung von komplexwertigen frequenzabhängigen elastischen Konstanten, während für Betone experimentell ermittelte frequenzabhängige Schwächungskoeffizienten verwendet werden. Anhand von Beispielen für kommerzielle Standard- und Array-Prüfköpfe wird der Einfluss der Schallschwächung auf die Schallfeldausbildung illustriert.

1. Einführung

Faser- und partikelverstärkte Verbundmaterialien, Gusswerkstoffe und Betone zählen aufgrund ihrer für den Ultraschall ungünstigen Eigenschaften zu den schwerprüfbaren Werkstoffen. Die Streuung elastischer Wellen an (Grob-)Korn- und/oder Phasengrenzen in Gusswerkstoffen und an den Zuschlagstoffen in Betonen führt zu einer mitunter beträchtlichen Schallschwächung und damit zu einem geringen Nutzsignal bei der Ultraschallprüfung. Bei neuartigen Betonwerkstoffen wie UHPC („Ultra High Performance Concrete“) kommt es außerdem zur Streuung an den verstärkenden Fasern aus Stahl, Textilien oder Plastik. In kohlefaserverstärkten Kunststoffen wirkt sich neben der Streuung an den Fasern und der durch die Faserorientierung bedingten Anisotropie auch die Viskoelastizität der Epoxidharzmatrix nachteilig aus. Durch die Simulation auf der Basis physikalischer Modelle gelingt es, diese Effekte quantitativ zu erfassen. Dies erlaubt, konventionelle Prüfverfahren zu optimieren, aber auch neue Ansätze zu entwickeln.

In diesem Beitrag betrachten wir den Einfluss der frequenzabhängigen Schallschwächung auf die Schallfeldausbildung. Die Berechnung erfolgt mit der Generalisierten Punktquellensynthese (GPSS) im Frequenzbereich mit anschließender inverser Fourier-Transformation. Im Falle von Betonen verwenden wir experimentell bestimmte frequenzabhängige Schwächungskoeffizienten, während für faserverstärkte Kompositmaterialien die Berücksichtigung der durch Viskoelastizität bedingten Schallschwächung durch die Verwendung von komplexwertigen frequenzabhängigen elastischen Konstanten erfolgt. Anhand von Beispielen für kommerzielle Standard- und Array-Prüfköpfe werden Effekte wie die Reduktion des Schallbündelöffnungswinkels bei zunehmender Schallschwächung

illustriert. Diese Effekte müssen insbesondere bei der Anwendung von bildgebenden Ultraschallverfahren berücksichtigt werden. Aber auch bei konventionellen Verfahrenswegen zur Fehlerprüfung sind diese Schallfeldinformationen unerlässlich, um die Prüfsituation im Hinblick auf die Abdeckung des Prüfvolumens und die durchschallbare Tiefe bewerten zu können.

2. Schwer prüfbare Werkstoffe

Die Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung der hier betrachteten Materialien sind im Wesentlichen auf die zum Teil beträchtliche Schallschwächung und dem daraus resultierenden ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis zurückzuführen. Die physikalischen Ursachen liegen zum einen in der Absorption der Schallenergie durch Effekte wie Visko- oder Poroelastizität, zum anderen spielt die Streuung der Ultraschallwellen an Korn- und Phasengrenzen eine bedeutende Rolle. Bei faser- und partikelverstärkten Verbundwerkstoffen, zum Beispiel kohlefaserverstärkten Kompositen, wird die Schallschwächung durch die Viskoelastizität der Epoxidharzmatrix und durch die Streuung an den Kohlefasern hervorgerufen. Darüber hinaus führt die Anisotropie dieser Werkstoffe zu komplexen Wellenausbreitungsphänomenen, insbesondere bei Einschallung in Nichtsymmetrierichtungen [1]. Bei Gusswerkstoffen ist die Streuung elastischer Wellen an den (Grob-) Korngrenzen und/oder den Phasengrenzen (beispielsweise bei Duplex-Stählen) für hohe Schwächungswerte verantwortlich, die in der Größenordnung von 1 dB/cm und mehr liegen können [2]. Dies führt zu den wohl bekannten Schwierigkeiten bei der Prüfung von Bronze-, Stahl- oder Graugusskomponenten. Abbildung 1, links, zeigt als Beispiel ein Schliffbild einer CuNiAl-Bronze mit grobem Gefüge, wie es bei gegossenen Schiffspropellern in einem Dickenbereich bis zu etwa 500 mm auftritt [3].

Ähnlich wie in der Matrix von faserverstärkten Kompositwerkstoffen existieren in Betonen Schwächungsmechanismen im Zement und aufgrund der Streuung der Ultraschallwellen an den Zuschlagstoffen. Innovative Werkstoffentwicklungen in diesem Bereich stellen die faserverstärkten Betone (UHPC) dar, bei denen die Streuung an den Fasern zusätzlich zur Schallschwächung beiträgt. Abbildung 1, rechts, zeigt eine aus einem UHPC-Block herausgetrennte Probe; hier sind die Zuschlagstoffe sowie die angeschnittenen Stahlfasern zu erkennen.



Abb. 1 Links: Schliffbild eines grobkörnigen CuNiAl-Gefüges; rechts: Nahaufnahme eines UHPC-Probekörpers mit Zuschlagstoffen und angeschnittenen Stahlfasern (kleine, dunkle Bereiche).

Da die Ultraschallprüfung dieser in den verschiedensten Bereichen eingesetzten Werkstoffe stetig an Bedeutung gewinnt [4,5], ist die Simulation der Schallfelder sowohl von Standard- als auch von Gruppenstrahler-/Array-Prüfköpfen im Hinblick auf die Optimierung konventioneller und die Entwicklung neuer, innovativer Prüfverfahren unerlässlich. Dies gilt auch für den effektiven, applikationsspezifischen Einsatz von Phased-Array-Prüfköpfen und hinsichtlich der korrekten Erfassung des Rekonstruktionsvolumens beim Einsatz von tomographischen Verfahren [6]. Darüber hinaus liefert die quantitative Erfassung der Effekte durch die Simulation auf der Basis geeigneter physikalischer Modelle wichtige Informationen hinsichtlich der energetischen Verhältnisse, also über die zu erwartenden Signal-Rausch-Verhältnisse.

3. Schallfeldmodellierung mittels Generalisierter Punktquellensynthese

Eine ganze Reihe von analytischen, halb-analytischen und numerischen Verfahren steht im Bereich der Ultraschallsimulation zur Verfügung. Durch die Anwendung von Näherungslösungen und anschließende Validierung lässt sich die Effektivität semi-analytischer Verfahren zusätzlich steigern. Die von uns zur Schallfeldmodellierung eingesetzte Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) wurde für isotrope und anisotrope Medien zur Schallfeldberechnung und Prüfkopfoptimierung [1,7,8] sowie zur Simulation der Ultraschall-Fehlerprüfung [9] entwickelt. Aufgrund der Berücksichtigung der unterschiedlichen physikalischen Randbedingungen an Oberflächen, Grenzflächen und Reflektoren stellt diese Methode eine Weiterentwicklung der Punktquellensynthese aus den 1980er Jahren dar [10]. Das GPSS-Simulationsverfahren wurde mehrfach im Vergleich mit Experimenten validiert, aussagekräftige Ergebnisse einer solchen Validierung sind z.B. in [11] zu finden.

Den physikalischen Hintergrund dieser Methode bildet das Huygenssche Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront ist Startpunkt einer Elementarwelle, die neue Wellenfront entsteht durch Überlagerung aller Elementarwellen. Deren Ausbreitungsfunktionen werden abhängig von den jeweiligen physikalischen Randbedingungen mit den entsprechenden Punktrichtwirkungen versehen, daher die Bezeichnung ‚generalisiert‘. Die Ausbreitungsfunktionen sind durch die Wellenzahlen und die Polarisationsvektoren charakterisiert, die anhand der Lösungen der Newtonschen Bewegungsgleichung bestimmt werden [7]. Die verschiedenen physikalischen Prozesse, die mit dem gestellten Prüfproblem verbunden sind, müssen entsprechend modelliert werden. Bei der Schallfeldberechnung sind dies (i) die Abstrahlung der Ultraschallwellen durch zirkulare, ebene oder fokussierte Prüfköpfe sowie die Ausbreitung der Wellen im jeweiligen Medium und (ii) der Reflexions- und Transmissionsprozess an der Grenzfläche zwischen Vorlaufmedium und Probe bzw. Bauteil beim Einsatz von Winkelprüfköpfen oder bei Anwendung der Immersionstechnik.

Die numerische Berechnung der jeweiligen Oberflächenintegrale erfolgt sukzessiv auf der Basis äquidistanter Gitter unter Beachtung des Sampling-Theorems. Die Modellierung der Zeitsignale erfolgt durch Berechnung der harmonischen Wellenfelder für viele Frequenzen und deren anschließende numerische Fourier-Transformation in den Zeitbereich. Dazu wird eine geeignete Anregungsfunktion zur Charakterisierung des Prüfkopfsignals herangezogen. Die Berechnung der zugehörigen Schallfelder erfolgt danach durch Bestimmung der maximalen Amplitudenwerte. Diese Vorgehensweise ist insbesondere zur Berücksichtigung der frequenzabhängigen Schwächungsmechanismen geeignet. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Betrachtung der Schallfelder, die von kommerziell verfügbaren Ein- und Multielementsensoren in Kontakttechnik erzeugt werden.

Für kohlefaserverstärkte Verbundwerkstoffe erfolgt die Berechnung der Wellenzahlen und Polarisationsvektoren durch die Verwendung von komplexwertigen elastischen Konstanten gemäß $C_{ij} = C_{ij}^0 + j\omega\eta_{ij}$, wobei ω die (Kreis-) Frequenz und η_{ij} die Elemente des Viskositätstensors bezeichnen [1,12]. Zur Berücksichtigung der Schallschwächung in Beton verwenden wir einen anderen Ansatz. Hier wird in der die Elementarwellen charakterisierende Ausbreitungsfunktion ein exponentieller Schwächungsterm verwendet, der die frequenzabhängigen Schwächungskoeffizienten enthält.

4. Simulationsergebnisse

4.1 Unidirektionale Faserverbundwerkstoffe

Exemplarisch für die im Luft- und Raumfahrtbereich immer häufiger verwendeten faserverstärkten Kunststoffe betrachten wir in einen unidirektional verstärkten Kompositwerkstoff. In den Berechnungen verwenden wir für die Dichte den Wert $\rho=1.56 \text{ g/cm}^3$ und Werte für die elastischen Konstanten und die Viskositäten, die von Hosten et al. bestimmt wurden [12].

Als Standard-Prüfkopf betrachten wir einen Senkrecht-Prüfkopf der Mittenfrequenz 2.25 MHz mit einem Durchmesser von 6.3 mm. Anhand von Wellenfrontbildern zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten (1 μs , 2 μs und 3 μs) ist in Abbildung 2 die Ausbreitung der Ultraschallimpulse illustriert; als Anregungsimpuls haben wir einen RC2-Impuls verwendet, der etwa 75 % Bandbreite entspricht. Die Berechnungsergebnisse ohne und mit Berücksichtigung der Schallschwächung sind im direkten Vergleich für den Fall dargestellt, dass die Fasern in der Probe senkrecht zur Oberfläche verlaufen. Die (zeitliche)

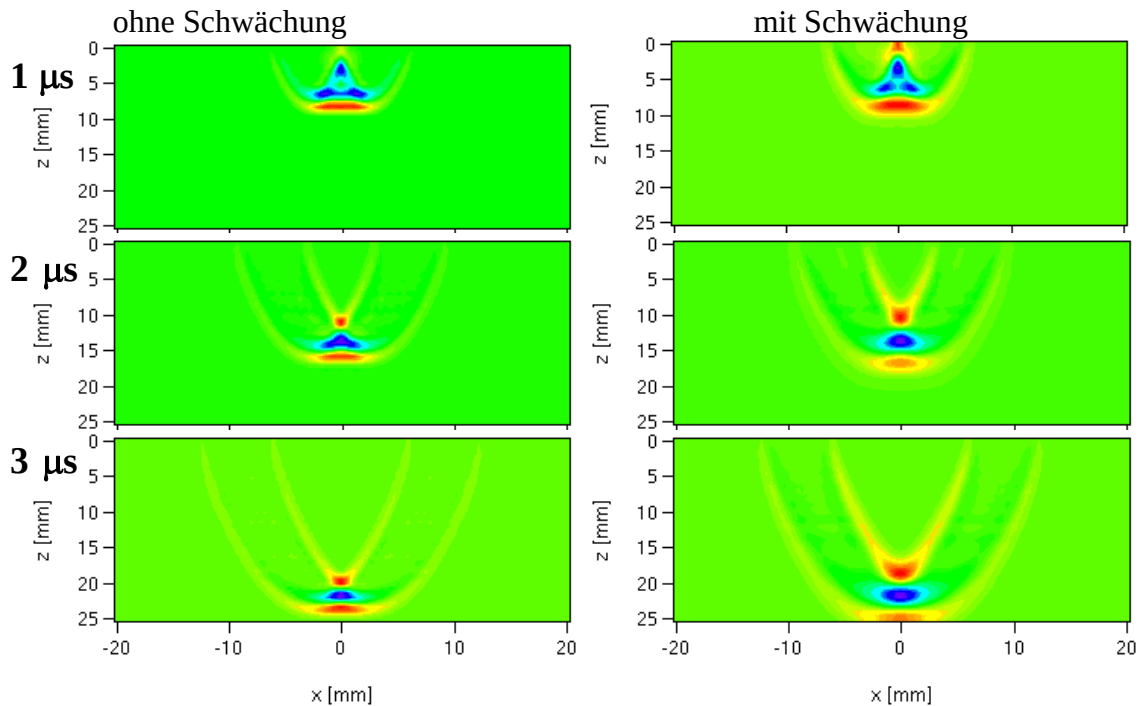


Abb. 2 GPSS-Simulation der Ausbreitung eines Ultraschallimpulses im betrachteten unidirektionalen Faserverbundwerkstoff ohne (links) und mit Berücksichtigung der Schallschwächung (rechts).

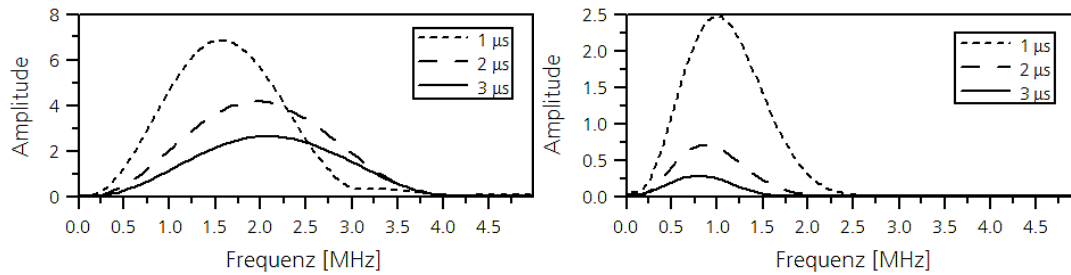


Abb. 3 Aus den in Abb. 2 dargestellten Impulsen berechnete Spektren.

Verbreiterung der Impulse ist eine Folge der Schallschwächung und entspricht der Verschiebung des spektralen Inhalts zu niedrigeren Frequenzen. Die aus diesen Daten berechneten Spektren (Abb. 3) zeigen, dass die Mittenfrequenz nach einer Strecke von ca. 20 mm bei weniger als 1 MHz liegt. Es ist auch erkennbar, dass die Mittenfrequenz von 2.25 MHz im Fall ohne Schallschwächung erwartungsgemäß erst jenseits der Nahfeldlänge ‚erreicht‘ wird.

Aus diesen transienten Daten werden die zugehörigen Prüfkopf-Schallfelder bestimmt, indem die Maximalamplitude der Teilchenverschiebung an jedem Raumpunkt ermittelt wird. Abbildung 4 zeigt Schallfelder für drei unterschiedliche Faserorientierungen

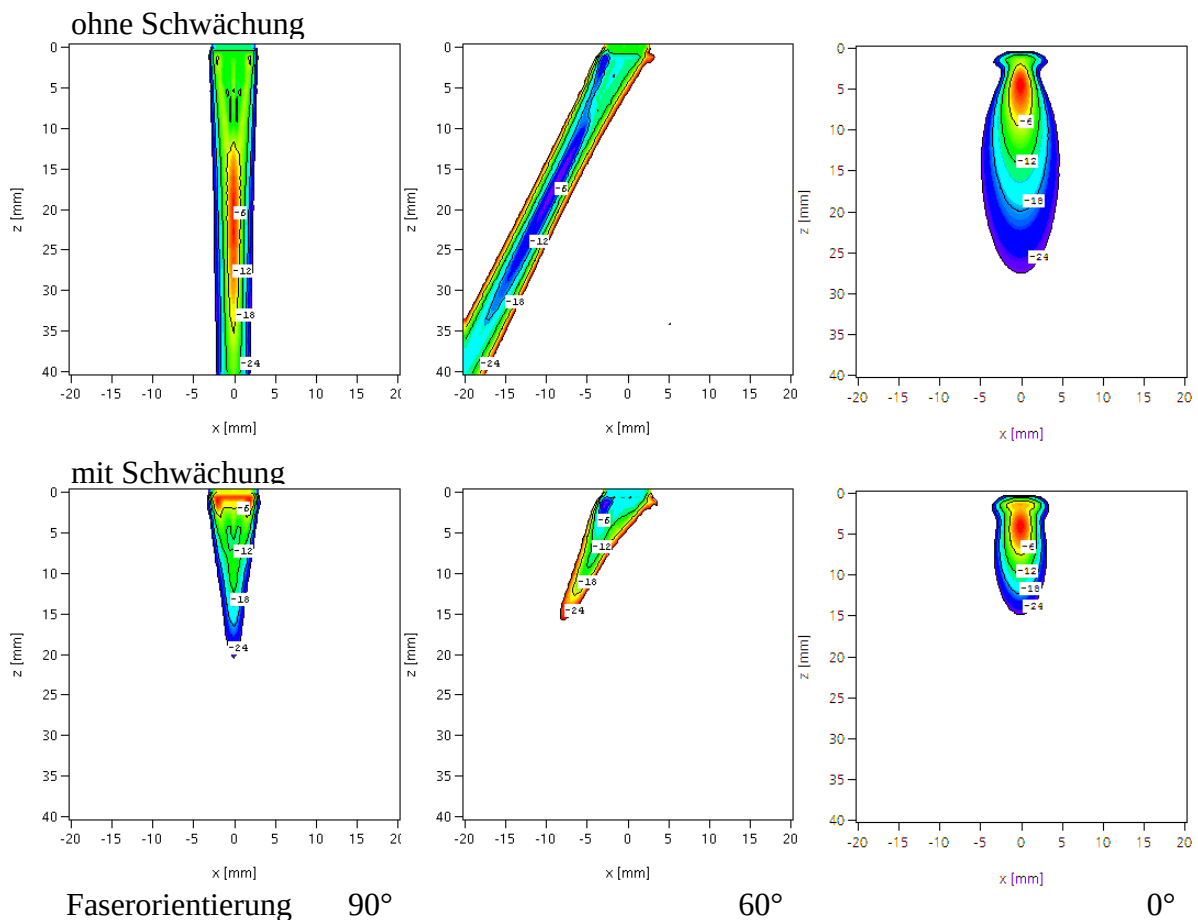


Abb. 4 Berechnete Schallfelder im unidirektionalen Kompositwerkstoff für unterschiedliche Faserorientierungen (spezifiziert durch den Winkel der Fasern zur horizontalen Oberfläche); die Amplituden sind im Bereich von 0 dB bis -24 dB dargestellt.

in einem Bereich von $40 \times 40 \text{ mm}^2$ mit logarithmischer Amplitudenskalierung. In allen Fällen führt die Schallschwächung zu einer drastischen Verringerung der Schallfeldamplituden, bei gleichzeitiger Verringerung des Schallbündelöffnungswinkels. Der Einfluss der Schallschwächung ist bei Einschallung senkrecht zu den Fasern (Faserorientierung 0°) erwartungsgemäß am stärksten: stellt man die Amplituden von 0 dB bis -24 dB dar (wobei 0 dB dem Maximum entspricht), so ist das Schallfeld bei einer Tiefe von etwa 20 mm - dies entspricht im ‚ungedämpften‘ Fall der Nahfeldlänge – bereits unter -24 dB abgesunken.

4.2 Betone

Die Diagnose, die Überwachung und die Prüfung von Bauwerken nehmen eine immer größer werdende Bedeutung im Bauwesen ein, nicht zuletzt aufgrund des steigenden Alters unserer Infrastruktur. Die zur Prüfung von Betonen und anderen Baustoffen angewendeten Ultraschallverfahren arbeiten in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 200 kHz. Die in das zu untersuchende Bauteil eingekoppelten Ultraschallwellen werden an Materialien unterschiedlicher akustischer Impedanz gestreut, reflektiert und gebeugt. Aus den detektierten Ultraschallsignalen können dann Informationen über das Bauteilinnere gewonnen werden. Allerdings führen Luftporen, Zuschlagstoffe und auch Verunreinigungen zu einer starken Schallschwächung.

In unserem Beispiel betrachten wir eine Betonmischung aus Sand und Zement mit Zuschlagstoffen, deren Durchmesser maximal 10 mm beträgt. Wir verwenden die Werte von $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ für die Dichte sowie $V_{\text{Long}} = 4.0 \text{ mm}/\mu\text{s}$ und $V_{\text{Trans}} = 2.75 \text{ mm}/\mu\text{s}$ für die Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwelle und der Transversalwelle. Die in einem aufwändigen Messverfahren für eine solche Betonmischung bestimmten frequenzabhängigen Schallschwächungswerte haben wir der Veröffentlichung von Gaydecki et al. [13] entnommen.

Zur effektiven Schallanregung und -detektion in Betonen haben sich Punkt-Kontakt-Prüfköpfe durchgesetzt, die ohne Koppelmittel auf die Messoberfläche aufgesetzt werden [14] und als Einzelschwinger oder als Arrays erhältlich sind. Wir betrachten im folgenden den Array-Prüfkopf A1220 der Firma Acsys [15], der aus 24 Punkt-Kontakt-Einzelprüfköpfen besteht (Abb. 5). Zur Schallanregung werden die 4×3 Elemente auf einer Seite verwendet, die andere Seite mit ebenso vielen Elementen zur Detektion. Der Elementabstand beträgt 20 mm, der Kontaktdurchmesser 2 mm; Mittenfrequenz und Bandbreite werden vom Hersteller mit 55 kHz und 118 % angegeben.

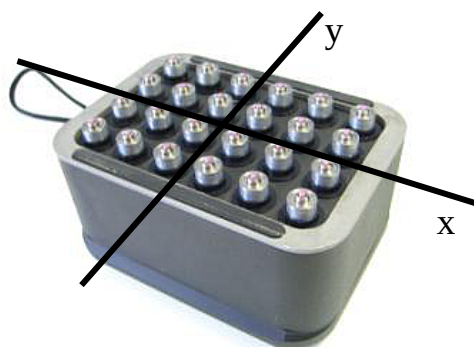


Abb. 5 Punkt-Kontakt-Array-Prüfkopf A1220 der Firma Acsys [15] mit 24 Elementen.

Abbildung 6 zeigt die Sende-Empfang-Richtcharakteristiken in den beiden senkrecht zueinander stehenden x-z- und y-z-Ebenen (siehe Abb. 5) in einem Bereich von 500 x 500 mm². Während die Empfindlichkeit des Prüfkopfes ohne Schallschwächung weiter als 500 mm reicht, ändert sich die Situation bei Berücksichtigung der Schallschwächung drastisch; das Amplitudenlevel von -36 dB ist dann bereits bei etwa 200 mm erreicht. Diese Ergebnisse zeigen außerdem, dass eine zufriedenstellende Sensitivität dieses Prüfkopfes erst jenseits von ca. 70 mm erreicht wird; man kann also auch hier von einer ‚Nahfeldlänge‘ sprechen.

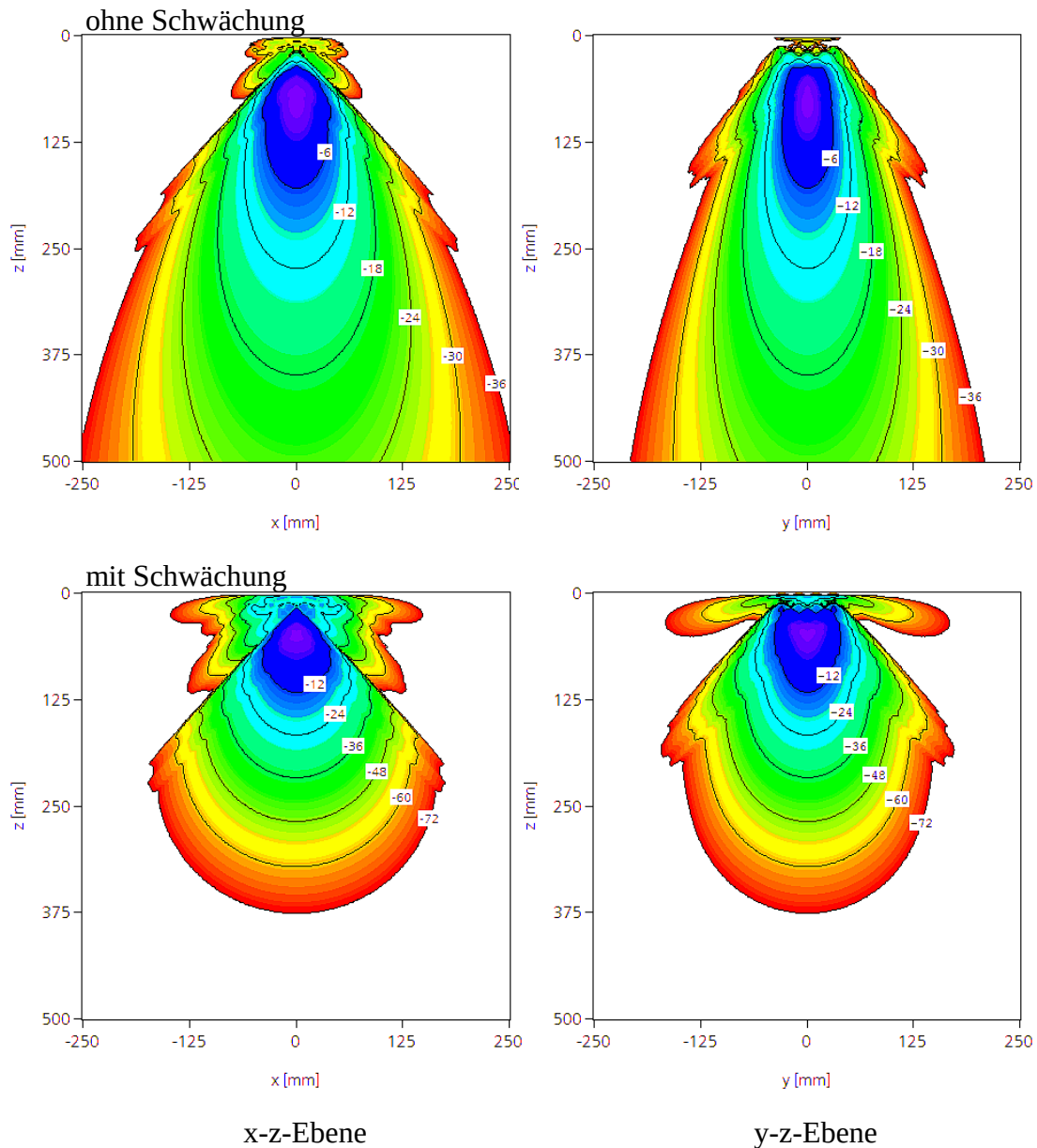


Abb. 6 Berechnete Schallfelder des A1220 Array-Prüfkopfes in der betrachteten Betonmischung. Im Fall ohne Schallschwächung sind die Amplituden im Bereich von 0 dB bis -36 dB dargestellt, im Fall mit Schallschwächung im Bereich von 0 dB bis -72 dB.

5. Zusammenfassung

Die repräsentativ ausgewählten Beispiele zeigen, dass die Schallschwächung zu dramatischen Veränderungen in der Schallfeldausbildung führt. Die Berücksichtigung der Schallschwächung im Rahmen der Simulation gibt zum einen Aufschluss über die wahren Gegebenheiten bei der Inspektion von schwer prüfbar Werkstoffen und erlaubt zum anderen die Auswahl geeigneter Sensoren oder die gezielte Optimierung von Sensoren bzw. Sensor-Array-Anordnungen. Darüber hinaus sind die Schallfeldinformationen im Hinblick auf die Messdateninterpretation zu beachten, aber auch im Hinblick auf die Anwendung von bildgebenden Verfahren wie beispielsweise der Synthetischen Apertur-Fokus-Technik SAFT [2].

Referenzen

- [1] 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)
- [2] M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer. Verbesserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) mittels SAFT bei der Ultraschallprüfung von schwer prüfbar Werkstoffen. In diesem Berichtsband, P39
- [3] J. Heerens, D. Hellmann. Ermittlung von Ermüdungsrisssausbreitungsschwellwerten für die Bewertung von Fehlstellen in Schiffspropellern aus Cu3 Bronzegusslegierungen. Schlussbericht ProRepaS, Forschungsvorhaben 03SX209F, GKSS Forschungszentrum, Geesthacht (2007)
- [4] H. Rieder et al. Schweißen und Prüfen statt Verschrotten – Zerstörungsfreie sicherheitstechnische Bewertung der Reparatur eines 100 Tonnen schweren Schiffspropellers. In diesem Berichtsband, P67
- [5] M. Spies, H. Rieder. Erste Ultraschall-Untersuchungen an UHPC-Testkörpern. Interner Bericht, Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern (2009)
- [6] M. Spies, H. Rieder. Dreidimensionale Ultraschall-Tomographie an schwer prüfbar strukturellen Werkstoffen. DGZfP Berichtsband 115-CD DGZfP Jahrestagung (2009), Mi.2.A.1
- [7] M. Spies. Semi-Analytical Elastic Wavefield Modeling Applied to Arbitrarily Oriented Orthotropic Media. J. Acoust. Soc. Am., 110, 68-79 (2001)
- [8] M. Spies. Efficient Optimization of Single and Multiple Element Transducers for the Inspection of Complex-Shaped Components. NDT&E International, 37, 455-459 (2004)
- [9] M. Spies. Kirchhoff Evaluation of Scattered Elastic Wavefields in Anisotropic Media. J. Acoust. Soc. Am. 107, 2755-2759 (2000)
- [10] F. Walte, W. Müller. Das Verhalten flächiger, rißartiger Reflektoren in fokussierten Ultraschallfeldern. Materialprüfung, 25, 155-158 (1983)
- [11] 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
- [12] B. Hosten, M. Deschamps, B.R. Tittmann. Inhomogeneous Wave Generation and Propagation in Lossy Anisotropic Solids. Application to the Characterization of Viscoelastic Composite Materials. J. Acoust. Soc. Am., 82, 1763-1770 (1987)
- [13] P.A. Gaydecki et al. The Propagation and Attenuation of Medium-Frequency Ultrasonic Waves in Concrete: A Signal Analytical Approach. Meas. Sci. Technol., 3, 126-134 (1992)
- [14] A.V. Kovalev et al. Instruments and Means for Reinforced Concrete Structures Inspection. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn458/idn458.htm> (2000)
- [15] <http://www.acsys.ru>