

Schallfeldbasierte Dämpfungsmessung

Anke Burkhardt, André Juhrig, Mario Wolf, Lukas Timmermann, Elfgard Kühnicke
 Institut für Festkörperelektronik, TU Dresden, 01069 Dresden, E-Mail: elfgard.kuehnicke@tu-dresden.de

Einleitung

Frequenzabhängige Dämpfung ist in der Ultraschallprüfung und medizinischen Diagnostik ein wichtiger akustischer Parameter. Er bestimmt zum einen die maximal mögliche Frequenz, mit der ein Material oder ein Organ durchschallt werden kann, und stellt zum anderen eine mögliche Messgröße dar, die z.B. zur Bestimmung der Viskosität genutzt werden kann. Konventionell wird der frequenzabhängige Dämpfungskoeffizient aus der Amplitudenabnahme in Abhängigkeit der Länge des Schalllaufweges mit einem Transmissionsverfahren bzw. mit einem Impuls-Echo-Verfahren bestimmt. Dazu werden entweder der Abstand zwischen Sender und Empfänger bzw. Sender und Reflektor geändert oder Mehrfach-Echos genutzt. Bei diesen Verfahren wird aus der Amplitudenabnahme in Abhängigkeit der Längenänderung des Laufweges der Dämpfungskoeffizient für eine ebene Welle bestimmt. Um den Effekt des Schallfeldes (Schallkopfcharakteristik) zu eliminieren, werden in neueren Arbeiten bei Fluiden Vergleichsmessungen zwischen „nicht-dämpfendem“ Kalibriermedium und zu untersuchendem Medium in einer Messzelle mit stark fokussierendem Schallkopf („substitution method“) durchgeführt [1, 2, 3] und der Unterschied in der Signalthöhe zwischen beiden Medien als Dämpfungseinfluss definiert. Im Folgenden wird gezeigt, dass das empfangene Signal stark von der Position des Reflektors bzw. Empfängers im Schallfeld abhängt und deshalb die konventionell bestimmten Dämpfungskoeffizienten keine Materialparameter sind, sondern extrem von der Messanordnung abhängen. Weiterhin wird untersucht, wie sich Schallgeschwindigkeit und Dämpfung auf das Schallfeld und insbesondere auf die Fokusslage auswirken.

Theorie

Zur Bestimmung eines Dämpfungskoeffizienten lässt sich für eine Flüssigkeit bei einer adiabatischen Zustandsänderung aus der Navier-Stoockschen Gleichung, der Zustandsgleichung und der Kontinuitätsgleichung eine modifizierte Wellengleichung (unter Vernachlässigung der Wärmeleitung und Volumenviskosität) bei Berücksichtigung der Dämpfung ableiten [4, 5]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{4\eta}{3\rho} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \right) p \quad (1)$$

p ist der Schalldruck, ρ die Dichte, c die Schallgeschwindigkeit und η die Scherviskosität.

Verwendet man $k^2 \approx \omega^2/c^2$ sowie den Ansatz:

$$p \approx Ae^{j\frac{\omega}{c}(x-ct)} \quad (2)$$

so ergibt sich eine Korrektur 1. Ordnung und für die Wellenzahl k folgt:

$$jk \approx \frac{\omega}{c} \left[j - \frac{2}{3} \frac{\omega}{c} \frac{1}{\rho c} \eta_s \right] = j \frac{\omega}{c} - \alpha \quad (3)$$

Damit lässt sich für die ebene Welle ein Dämpfungskoeffizient definieren:

$$p = Ae^{j\frac{\omega}{c}(x-ct) - \alpha x} \quad (4)$$

mit

$$\alpha \approx \frac{2}{3} \frac{\omega^2}{c^2 \rho c} \eta_s \quad (5)$$

Da im Folgenden das Schallfeld durch Summation über die Felder von Punktquellen bestimmt wird und diese einen Ausbreitungsterm $1/R e^{jkR}$ besitzen, ist ein Dämpfungskoeffizient für Kugelwellen erforderlich.

Für die ebenfalls eindimensionale Ausbreitung von Kugelwellen ergibt sich entsprechend:

$$p = \frac{1}{R} Ae^{j\frac{\omega}{c}(R-ct) - \alpha R} \quad (6)$$

wobei R der Abstand zwischen Quell- und Aufpunkt ist.

Schallfeldberechnungen

Abhängigkeit des Schallfeldes von der Schallgeschwindigkeit

Die in den folgenden Abbildungen gezeigten Schallfelder wurden mit Hilfe von genäherten harmonischen GREENSchen Funktionen für den Halbraum berechnet. Beispielhaft ist hier die GREENSche Funktion G_{zz} zur Berechnung der Spannung auf der Grenzfläche gegeben:

$$G_{zz}^m(r, z, k) \approx \frac{\cos\theta}{R} S^m(\theta) D_z^m(\theta) e^{jk_m R} \quad (7)$$

wobei m für Longitudinal- oder Transversalwelle steht, R ist der Abstand zwischen Quell- und Aufpunkt und θ der Winkel zwischen dem Vektor zwischen Quell- und Aufpunkt und der Flächennormalen im Quellpunkt. Die GREENSche Funktion enthält Quellterme (S) und Aufnehmerfunktionen (D), die die jeweiligen Randbedingungen erfüllen. Durch den Ausbreitungsterm $1/R e^{jkR}$ werden die Interferenzen erfasst. Für das dämpfende Medium ergibt sich:

$$G_{zz}^m(r, z, k) = \frac{\cos\theta}{R} S^m(\theta) D_z^m(\theta) e^{jk_m R} \cdot e^{-\alpha R} \quad (8)$$

Zur Berechnung des Feldes für den ausgedehnten Wandler wird die Wandlerfläche diskretisiert, mit Punktquellen belegt und über die Felder aller Punktquellen summiert (Punktquellensynthese). Die Berechnung der harmonischen Schallfelder für den Schallkopf mit Linse erfolgt mit Hilfe einer separaten Berechnung in den einzelnen Schichten, d.h. zuerst wird mit Hilfe der Punktquellensynthese die Spannungsverteilung auf der Grenzfläche zwischen Linse und Fluid berechnet. Ausgehend von, auf der Grenzfläche zwischen Linse und Fluid, berechneten Spannungsverteilung wird danach das Feld im Fluid bestimmt [6].

Abbildung 1 zeigt die Schallfelder eines kreisrunden, ebenen Schwingers der Frequenz 4 MHz in Flüssigkeiten unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit. Wie erwartet tritt Nah- und Fernfeld auf, das Schallfeld klingt nach dem natürlichen Fokus (Lage des Maximums bei unfokussiertem Schallkopf = Nahfeldlänge) langsam ab und hat die Form eines Schallbündels. Es wird deutlich, dass der natürliche Fokus mit wachsender Schallgeschwindigkeit näher zum Schallkopf rückt. Das stimmt mit wellentheoretischen Betrachtungen überein, die aussagen, dass die Nahfeldlänge umgekehrt proportional zur Schallgeschwindigkeit ist.

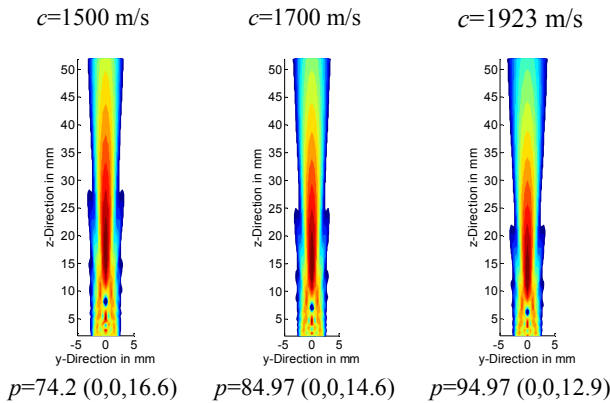


Abbildung 1: Fokuslage in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit - Längsschnitt des Schallfeldes für einen ebenen, runden Schwinger ($d=5 \text{ mm}$, $f=4 \text{ MHz}$) in verschiedenen Medien; p – normiertes Maximum des Schalldrucks einschließlich seiner Lage in (x, y, z) -Koordinaten

Durch Fokussierung mit Hilfe einer Linse ergibt sich ein Fokuspunkt vor dem natürlichen Fokus, wobei bei stärkerer Fokussierung das Schallbündel in eine ovale empfindliche Zone übergeht und außerhalb der Fokuszone der Schalldruck sehr schnell abfällt (Abb. 2). Bei Medien mit einer höheren Schallgeschwindigkeit entfernt sich der Fokus vom Schallkopf.

Abbildung 2 zeigt, dass sich bei einem Schallgeschwindigkeitsunterschied von ca. 100 m/s die Fokuslage für den hier berechneten Schallkopf um 0.6 mm ändert. Somit ergibt sich z.B. für eine Reflektorlage von $z=22 \text{ mm}$ ein Unterschied in der Amplitudenhöhe von 6 - 8 dB für zwei dämpfungsfreie Medien mit der angegebenen Schallgeschwindigkeitsdifferenz. Damit deuten die Schallfeldberechnungen für den fokussierenden Schallkopf darauf hin, dass auch die Bestimmung der Dämpfung mit Hilfe einer Messzelle [1, 2, 3] bei Schallgeschwindigkeiten des Kalibriermediums Wasser mit $c=1524 \text{ m/s}$ (bei 37°C) und des Untersuchungsmediums Blut während der Gerinnung von $c=1580\text{-}1615 \text{ m/s}$

(bei 37°C) keine vom Messsystem unabhängigen Dämpfungswerte liefert.

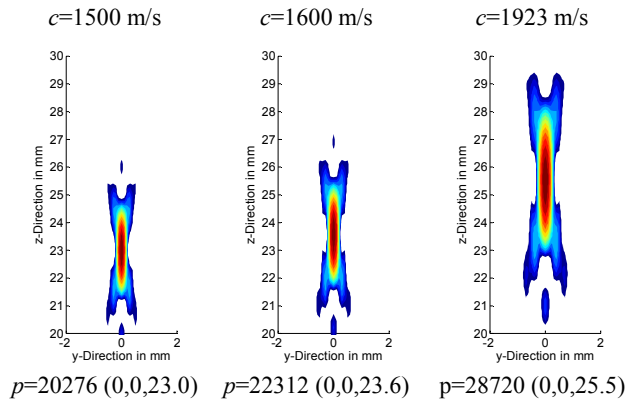


Abbildung 2: Fokuslage in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit - Längsschnitt des Schallfeldes für einen fokussierenden Schallkopf mit Makorlinse ($f=8 \text{ MHz}$) in verschiedenen Medien

Änderung des Schallfeldes durch Dämpfung

Bei den Berechnungen für die folgenden Abbildungen wurde in den GREENSchen Funktionen ein Dämpfungsterm $e^{-\alpha R}$ entsprechend Gleichung (8) eingefügt, wobei α frei gewählt wurde und vorerst mit keinem Materialmodell unterlegt ist. Abbildung 3 demonstriert den Einfluss der Dämpfung auf das Schallfeld für den gleichen unfokussierten Wandler, der für die Simulationsrechnungen in Abbildung 1 verwendet wurde. Für diese Rechnungen wurde die Schallgeschwindigkeit konstant auf $c=1500 \text{ m/s}$ gesetzt. Vergleicht man die Schallfelder bei den verschiedenen Dämpfungskoeffizienten, so sinkt die Intensität für $\alpha=0.02 \text{ mm}^{-1}$ (Abb. 3, links) gegenüber einem dämpfungsfreie Medium mit der gleichen Schallgeschwindigkeit (Abb. 1, links) auf 70% und der Fokus rückt um 1.7 mm näher an den Wandler, d.h. eine Erhöhung der Dämpfung oder der Geschwindigkeit wirkt sich in gleicher Weise auf die Fokuslage aus. Bei gleicher Geschwindigkeit ist der Fokusabstand im dämpfenden Medium geringer als im nichtdämpfenden. Weiterhin wird durch eine Zunahme der Dämpfung die Intensität mit zunehmendem Abstand vom Schallkopf vermindert, was zu einer Verstärkung der Nahfeldeigenschaften und zu einem schnelleren Abklingen des Schalldrucks auf der Achse führt.

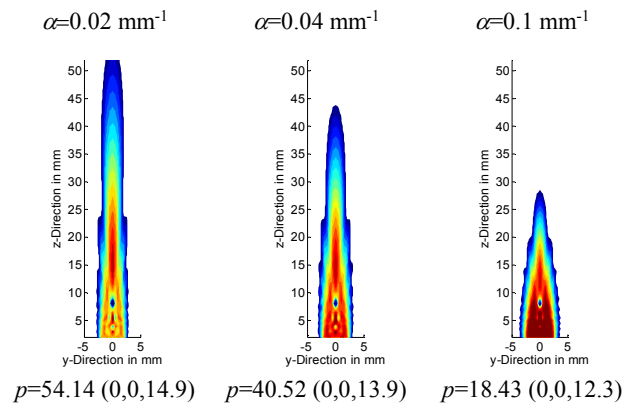


Abbildung 3: Fokuslage in Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten - Längsschnitt des Schallfeldes für einen ebenen, runden Schwinger ($d=5 \text{ mm}$, $f=4 \text{ MHz}$) in dämpfendem Fluid bei $c=1500 \text{ m/s}$

Bei einem stark fokussierenden Schallkopf wirkt sich die Fokusverschiebung durch Dämpfung nicht so stark aus (Abb. 4). Eine Verstärkung der Nahfeldeigenschaften bei höheren Dämpfungen kann allerdings auch hier verzeichnet werden.

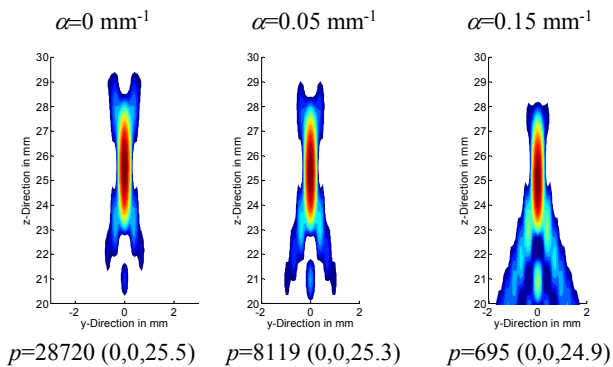


Abbildung 4: Fokuslage in Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten - Längsschnitt des Schallfeldes für einen fokussierenden Schallkopf in dämpfendem Fluid (Glycerin $c=1923 \text{ m/s}$)

Experimente

Mit Hilfe von Experimenten sollte der Einfluss der Schallgeschwindigkeit und der Dämpfung auf die Fokusverschiebung nachgewiesen werden. Durch Glycerin-Wasser-Mischungen konnte die viskose Dämpfung von Flüssigkeiten variiert werden. Da Glycerin bei Zimmertemperatur eine Schallgeschwindigkeit von $c=1920 \text{ m/s}$ und Wasser von $c=1480 \text{ m/s}$ besitzt, hängt die Schallgeschwindigkeit in diesem Gemisch auch vom Mischungsverhältnis ab und somit können Dämpfungswert und Schallgeschwindigkeit nicht unabhängig voneinander geändert werden. Annähernd dämpfungsfreie Medien mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten von $c=1537 \text{ m/s}$ bis $c=1719 \text{ m/s}$ wurden mit Hilfe von Kochsalzlösungen hergestellt. Für die experimentelle Bestimmung der Schallfeldform wurde ein unfokussierter Schallkopf verwendet, da entsprechend der Simulationsrechnungen die Fokusverschiebung durch Dämpfung wesentlich größer ist. Zur Ermittlung der Fokusposition wurde auf einen enorm aufwändigen Scan mit einem Punkreflektor verzichtet und nur ein 2D-Scan mit Hilfe eines Drahtes durchgeführt. Aus der Wandlerverschiebung und der Laufzeitänderung wurde die Schallgeschwindigkeit ermittelt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die gescannten Schallfelder für verschiedene Kochsalzlösungen. Der Fokus rückt mit zunehmender Schallgeschwindigkeit näher an den Schallkopf. Im Unterschied zu den Schallfeldberechnungen sind die Nahfeldeigenschaften kaum ausgeprägt, da eine transiente Anregung erfolgt.

Abbildung 6 zeigt gemessene Schallfelder in verschiedenen Glycerin-Wasser-Mischungen. Dabei ist zu beachten, dass sich durch die Erhöhung des Glycerinanteils gleichzeitig mit der Dämpfung auch die Schallgeschwindigkeit erhöht. Mit zunehmendem Glycerinanteil verschiebt sich der Fokus in Richtung Schallkopf und die Nahfeldeigenschaften sind trotz transienter Anregung stärker ausgeprägt.

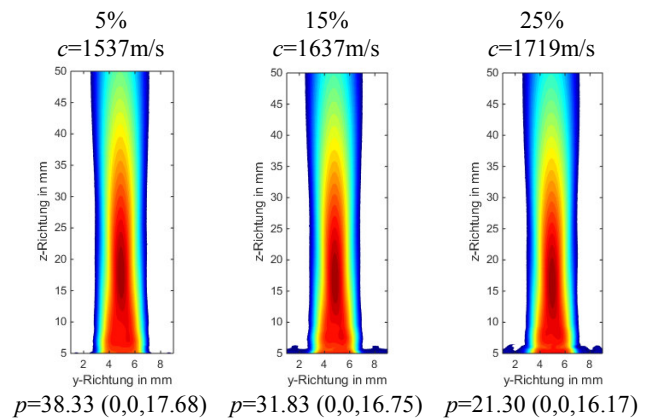


Abbildung 5: Fokuslage in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit - Schallfelder für einen ebenen, runden Schwinger ($d=5.14 \text{ mm}$, $f=4.14 \text{ MHz}$) im ungedämpften Medium (Kochsalzlösungen verschiedener Konzentrationen)

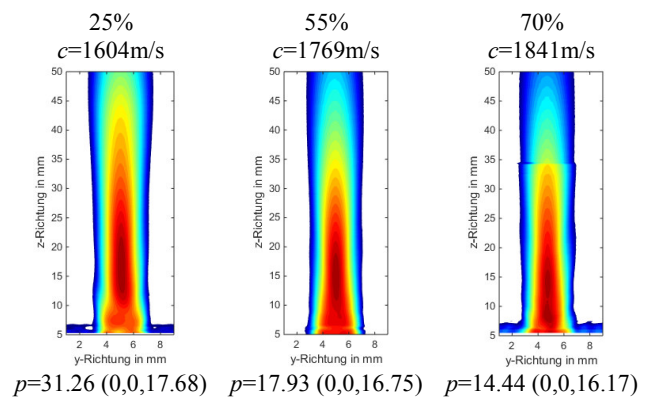


Abbildung 6: Fokuslage in Abhängigkeit von der viskosen Dämpfung - Schallfelder für einen ebenen, runden Schwinger ($d=5.14 \text{ mm}$, $f=4.14 \text{ MHz}$) im dämpfenden Medium (Glycerin-Wasser-Mischungen verschiedener Konzentrationen)

Aus den gemessenen Schallfeldern wurde die Fokuslage ermittelt und als Funktion der Schallgeschwindigkeit aufgetragen (Abb. 7). Um zu beurteilen, ob die Dämpfung eine zusätzliche Fokusverschiebung hervorruft, wurde die Fokuslage ebenfalls aus berechneten Schallfeldern für das dämpfungsfreie Medium (orange Kurve) und für einen Dämpfungskoeffizienten von $\alpha=0.02 \text{ mm}^{-1}$ (rote Kurve) bestimmt. Damit Messungen und Berechnungen vergleichbar sind, wurde für die Berechnungen die effektive Schwingergröße und die Mittenfrequenz des verwendeten unfokussierten Schallkopfs anhand von Messungen in reinem Wasser bei 20°C mit $d=5.14 \text{ mm}$, $f=4.14 \text{ MHz}$ ermittelt.

Wie bereits bei den obigen Schallfeldberechnungen vorausgesagt (vergl. Abb. 1 und Abb. 3), rückt der Fokus bei gleicher Schallgeschwindigkeit bei einem dämpfenden Medium dichter an den Schallkopf als beim dämpfungsfreien Medium. Die Messungen mit zunehmendem Glycerinanteil liegen immer unterhalb der berechneten Kurve für das dämpfungsfreie Medium und bestätigen somit diese Vorhersage. Die Fokuslagen für die Kochsalz-Wasser-Mischungen liegen wie erwartet um die Kurve für das dämpfungsfreie Medium verteilt. Damit weisen die Messungen den vorausgesagten Effekt nach.

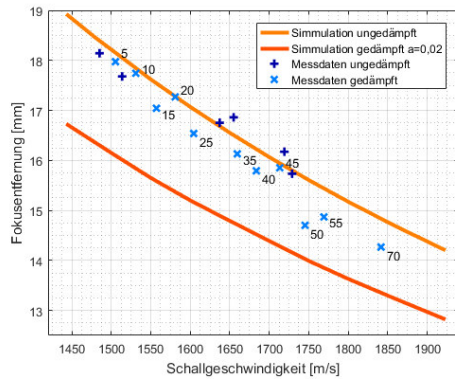


Abbildung 7: Fokussierung in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und Dämpfung für einen ebenen, runden Schwinger ($d=5.14$ mm, $f=4.14$ MHz); Ziffern an den Kreuzen geben den Glycerinanteil in Masseprozent an

Schlussfolgerungen für Dämpfungsmessungen

Konventionell wird die Dämpfung aus der Amplitudendifferenz bei zwei unterschiedlich langen Laufwegen im Impuls-Echo-Verfahren oder in Transmission mit einem unfokussierten Schallkopf bestimmt. Dabei wird von einem ebenen Wellenansatz mit ebenen Reflexionskoeffizienten ausgegangen. Abbildung 8 zeigt deutlich, dass die Echo-Amplitude von Reflektorgröße und -lage im Schallfeld abhängt. Deshalb ist der aus dem Amplitudenverhältnis ermittelte Dämpfungskoeffizient kein reiner Materialparameter, sondern immer von der Schallfeldform abhängig. Der Fehler wird kleiner, wenn sich beide Reflektoren weit im Fernfeld befinden.

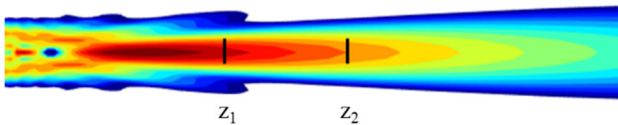


Abbildung 8: Exemplarisches Schallfeld mit Reflektoren an unterschiedlichen Positionen bei gleichbleibender Reflektorgröße, z_1 –Position 1, z_2 –Position 2

Da sich bei gleichbleibender Reflektorgröße und -lage das Schallfeld in Abhängigkeit vom Untersuchungsmedium, d.h. durch die Schallgeschwindigkeit (s. Abb. 1) und durch die Dämpfung (s. Abb. 3), ändert, lassen sich Schallfeldeffekte nicht einfach durch Schallfeldberechnungen für ungedämpfte Medien der gleichen Schallgeschwindigkeit „herausrechnen“.

Bei Messungen in der Messzelle mit einem stark fokussierenden Schallkopf ändert sich die Fokusposition in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit stark. Da das Schallfeld keine Bündelform mehr hat, macht sich die Position des Reflektors im Schallfeld besonders bemerkbar. Deshalb muss bei Vergleichsmessungen zwischen „nicht-dämpfendem“ Kalibriermedium und zu untersuchendem Medium in einer Messzelle unbedingt darauf geachtet werden, dass das Vergleichsmedium und Untersuchungsmedium die gleiche Schallgeschwindigkeit besitzen. Die Abhängigkeit der Fokusposition von der Dämpfung ist in diesem Falle klein im Vergleich zur Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit. Der Fehler bei Vergleichsmessungen in der Messzelle hängt somit hauptsächlich von dem Unterschied zwischen den Schallgeschwindigkeiten zwischen

Kalibrier- und Messmedium, der Änderung der Schallgeschwindigkeit während der Messung, z.B. bei Experimenten zur Blutgerinnung, und der Stärke der Fokussierung ab.

Zusammenfassung

Mit Hilfe von Schallfeldmodellierungen und Experimenten für dämpfende und nichtdämpfende Medien wurde festgestellt, dass sowohl Schallgeschwindigkeit als auch Dämpfung eine drastische Veränderung des Schallfeldes verursachen können. Deshalb werden mit konventionellen Dämpfungsmessungen nur messsystemabhängige Dämpfungswerte und keine Materialparameter bestimmt. Durch eine schallfeldbasierte Auswertung lassen sich Intensitätsverluste durch Reflexion/Transmission und Dämpfung voneinander trennen. Dies erfordert transiente Schallfeldberechnungen unter Berücksichtigung der Dämpfung und damit verbunden die Entwicklung eines Materialmodells. Die vorgestellten Simulationsrechnungen sind ein erster Schritt in diese Richtung. Eine simultane Bestimmung der Fokuslage mit einem unfokussierten und fokussierenden Schallkopf kann den Informationsgehalt bei Dämpfungsmessungen zusätzlich erhöhen und die Grundlage für ein neues Auswertekriterium liefern.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes: 239880265.

Literatur

- [1] Callé, R. C., Plag, F. Patat, F. Ossant: Interest of the attenuation coefficient in multiparametric high frequency ultrasound investigation of whole blood coagulation process. *J Acoust So Am* 125 (1), 530–538, (2009)
- [2] Calor-Filho, M. M., Machado, J. C.: Measurement of the ultrasonic attenuation coefficient of human blood plasma during clotting in the frequency range of 8 to 22 MHz. *Ultrasound Med Biol* 32 (7), 1055–1064, (2006)
- [3] Huang, C.-C., Wang, S.-H.: Characterization of blood properties from coagulating blood at different hematocrits using ultrasonic backscatter and attenuation. *Jpn J Appl Phys* 45 (9A), 7191–7196, (2006)
- [4] Morse, P. M., Ingard, K. U.: *Theoretical Acoustics*. New York: McGraw-Hill Book Co., (1968)
- [5] Wauer, J.: *Kontinuumschwingungen. Vom einfachen Strukturmodell zum komplexen Mehrfeldsystem*. 2. Auflage, Springer Vieweg Wiesbaden, (2014)
- [6] Kühnicke, E.: *Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen: Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen*. Schriftenreihe der TIMUG Technologie in Medizin und Gesundheitswesen e.V., Bonn, (2001)