

Dämpfung von Ultraschall in biologischem Gewebe

Ludwig Bahr, Barbara Kaltenbacher, Manfred Kaltenbacher, Reinhard Lerch

Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen-Nürnberg, 91052 Erlangen, Email: Ludwig.Bahr@lse.eei.uni-erlangen.de

Einleitung

Die Dämpfung von Ultraschall weist in biologischem Gewebe in dem für medizinische Anwendungen relevanten Frequenzbereich, d.h. 500 kHz bis 5 MHz, eine signifikante Frequenzabhängigkeit auf. Im Gegensatz zu Wasser, wo die Dämpfung proportional zur Frequenz im Quadrat ansteigt, kann für Gewebe die Dämpfung am besten mit einem Frequenz-Potenzgesetz angenähert werden, wobei der Exponent typischerweise zwischen 1,0 und 1,5 liegt. Außerdem tritt eine Frequenzabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit auf, was als Dispersion bezeichnet wird. Dämpfung und Dispersion können mit Hilfe der Kramers-Kronig Beziehungen vereinheitlichend beschrieben werden. Dafür wählt man für die Dämpfung α den mindestphasigen Ansatz

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 \cdot |\omega|^y, \quad (1)$$

mit den beiden Materialparametern α_0 und y . Waters [1] bewies, dass auch für $y \geq 1$ kausale Realisierungen für das System gefunden werden können und somit die Dispersion als die Hilberttransformierte der Dämpfung bestimmt werden kann. Die Transformation hängt allerdings von y ab. So nimmt die auf die Frequenz normierte und auf eine Bezugsfrequenz bezogene Wellenzahl für $y = 1$ die Form

$$\frac{1}{c(\omega)} - \frac{1}{c(\omega_0)} = -\frac{2\alpha_0}{\pi} \ln \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right|, \quad (2)$$

für $1 < y < 3$ die Form

$$\frac{1}{c(\omega)} - \frac{1}{c(\omega_0)} = -\alpha_0 \tan \left(\frac{y\pi}{2} \right) (|\omega|^{y-1} - |\omega_0|^{y-1}) \quad (3)$$

an.

Messaufbau und Datenerfassung

Ziel der Arbeit ist die messtechnische Erfassung des Dämpfungs- und Dispersionsverhalten des Gewebeersatzstoffes, im folgenden als TMM bezeichnet, bestehend aus Wasser, Glycerin, Agar, Aluminiumoxid, Siiziumkarbid und Benzalkoniumchlorid gemäß dem Rezept nach IEC 60601-2-37 Amd. 1. Zur Evaluierung des Messverfahrens wurden außerdem Plexiglas und Rizinusöl untersucht, da hierfür publizierte Messwerte bezüglich der Parameter α_0 und y vorlagen [2] [3]. Die Messungen wurden in einem Tauchbecken mit den Innenmaßen 110 cm \times 60 cm \times 60 cm im Durchschallungsmodus durchgeführt (Abb. 1). Wir verwendeten ein Ultraschallwandlerpaar von Krautkramer mit einem Durchmesser von 13 mm und einer Mittenfrequenz von 3,5 MHz, die vis-a-vis im Becken befestigt wurden. Ein Wandler wurde als Transmitter betrieben und mit einem breitbandigem Spannungspuls beaufschlagt. Dieser besitzt einen Punktfokus bei 82 mm

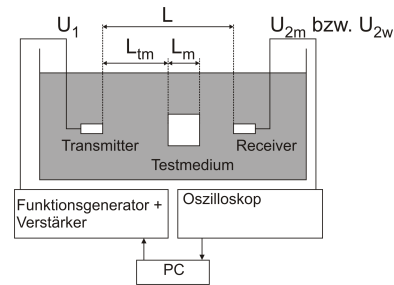


Abbildung 1: Messaufbau

(Modell 843-280). Der Receiver, mit dem das Drucksignal aufgezeichnet wurde, ist nicht fokussierend ausgeführt (Modell 843-300). Das zu untersuchende Medium wurde in ein Edelstahlrohr mit 8 cm Innendurchmesser und der Länge von 5 cm eingebracht und auf beiden Seiten mit einer 15 μ m dicken Mylarmembran verschlossen. Es konnte mittels eines Verfahrssystems aus dem Schallweg des Transmitters herausgefahren werden. Der Abstand L_{tm} zwischen Transmitter und Medium betrug 10 cm und war damit jenseits der Nahfeldlänge der Wandler [4], der Abstand L zwischen den beiden Wählern 19 cm. In einem Durchgang werden zwei Messungen durchgeführt: Eine Messung mit Medium, bei der die Rotationsachsen der Wandler und des Rohres übereinstimmen, und eine Referenzmessung, bei der sich nur Wasser zwischen Transmitter und Receiver befindet.

Auswertung

Wir wenden ein Breitband-Spektroskopieverfahren an und werten Betrag und Phase des Spektrums von Messpuls und Referenzpuls aus. Geht man von ebener Wellenausbreitung aus, ergibt sich die Dämpfung α_m im Medium aus den Betragsspektren A_m (mit Testmedium) und A_w (Referenzmessung mit Wasser) zu

$$\alpha_m(\omega) = \alpha_w(\omega) + \frac{1}{L_m} \ln \left(\frac{T A_w(\omega)}{A_m(\omega)} \right), \quad (4)$$

wobei α_w die Dämpfung im Referenzmedium Wasser, L_m die Länge der Testkammer und T den Transmissionkoeffizienten für die beiden Übergänge Wasser-Medium und Medium-Wasser beschreibt. Die Größen α_0 und y werden aus Näherungskurven, die durch die Gleichungen (1) bis (3) beschrieben werden, durch Minimierung der Summe der Fehlerquadrate an den diskreten Frequenzpunkten ermittelt.

Die Größen α_w und T gehen zunächst als Unbekannte in die Messung ein und treten in der Darstellung der Dämpfung über der Frequenz als Verschiebung in Ordinateurichtung auf. Verglichen mit Gewebeersatzstoffen

erhält man in Wasser eine um Größenordnungen kleinere Dämpfung. Nimmt man desweiteren an, dass der Trans-

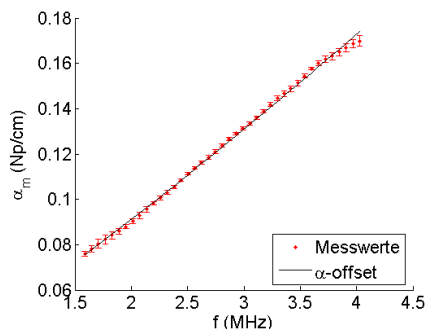


Abbildung 2: Fit an das Dämpfungsspektrum.

missionskoeffizient T frequenzunabhängig ist, können beide Größen als Konstante in der Näherungsfunktion beschrieben werden (siehe Abb. 2). Diese Näherung soll im folgenden als (α -offset) bezeichnet werden.

Alternativ können zur Auswertung sowohl bei der

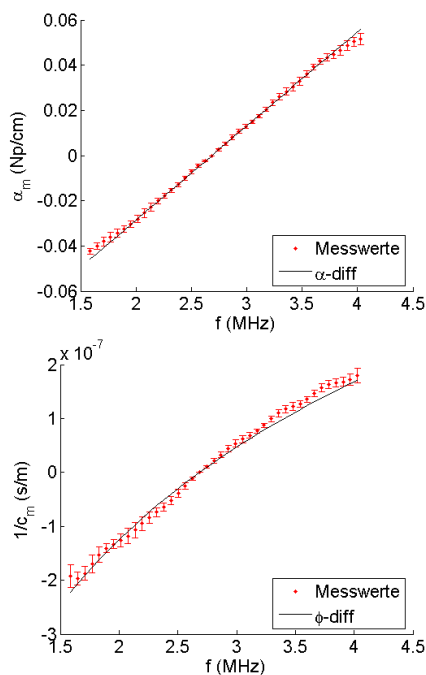


Abbildung 3: Fit an Dämpfungs- und Phasenspektrum für $f_0 = 2,7 \text{ MHz}$.

Dämpfung als auch der Phase Differenzen zu einer wählbaren Bezugsfrequenz f_0 herangezogen werden, wodurch sich der Einfluß von α_w und T herauskürzt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass gleichzeitig bei Dämpfung und Phase Näherungen bezüglich der Modellfunktionen durchgeführt werden können (Bezeichnet als (α -diff) und (ϕ -diff); siehe Abb. 3). Da der Parameter y nahe bei 1 liegt, wurde der Einfluß der verschiedenen Dispersionsbeschreibungen auf die Qualität des Kurvenfits an die Messwerte untersucht. Der Näherung (ϕ -diff) in Abb. 4 liegt die Modellfunktion (3), der Näherung

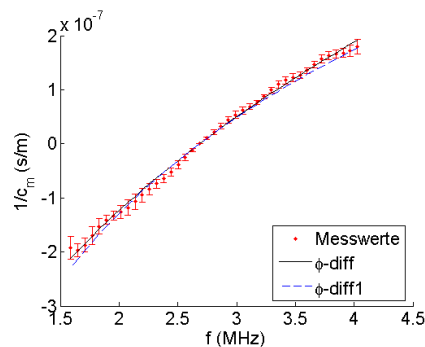


Abbildung 4: Fit an das Phasenspektrum für $f_0 = 2,7 \text{ MHz}$.

(ϕ -diff1) die Modellfunktion (2) zugrunde. Da die Standardabweichung für letzteres Verfahren nur geringfügig kleiner ausfällt, kann man sich in der Praxis auf eine Näherung (ϕ -diff) beschränken. Tabelle 1 faßt die verschiedenen Näherungsverfahren für die Messung am TMM zusammen. Als Qualitätsmaß soll die relative Standardabweichung der gewonnenen Parameter dienen.

| Näherung von | α_m | | y | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|------|---------------|
| | mw in $\frac{Np}{cm \cdot MHz^y}$ | rel. std in % | mw | rel. std in % |
| α -offset | 0,0301 | 0,66 | 1,15 | 0,373 |
| α -diff & ϕ -diff | 0,0414 | 2,40 | 1,01 | 1,02 |
| ϕ -diff | 0,0354 | 4,98 | 1,35 | 11,5 |
| ϕ -diff1 | 0,0431 | 2,73 | - | - |

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Näherungsverfahren zur Bestimmung von α_0 und y bezüglich Mittelwert(mw) und relative Standardabweichung(std).

Zusammenfassung

Mit den beiden Materialparametern α_0 und y kann für die untersuchten Stoffe Dämpfung und Dispersion vereineheitlichend beschrieben werden. Die genaueste Näherung liefert ein Fit an das Dämpfungsspektrum.

Literatur

- [1] K. R. Waters, M. S. Hughes, J. Mobley, G. H. Brandenburger, J. G. Miller, On the applicability of Kramers-Krönig relations for ultrasonic attenuation obeying a frequency power law. J. Acoust. Soc. Am. **108** (2), 2000, 556-563
- [2] P. He, Determination of Ultrasonic Parameters Based on Attenuation and Dispersion Measurements. Ultrasonic Imaging **20**, 1998, 275-287
- [3] C. R. Hill, J. C. Bamber, G. R. ter Haar, Physical Principles of Medical Ultrasonics. John Wiley & Sons, Ltd., 2004, 2nd Edition
- [4] B. Zeqiri, Errors in attenuation measurements due to nonlinear propagation effects. J. Acoust. Soc. Am. **91** (2), 1992, 2585-2593