Hochschule Merseburg

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

Masterarbeit

Ing. Ralf Breyer

Studiengang Mechatronik–, Industrie– und Physiktechnik

Vertiefungsrichtung: Physiktechnik

Thema: Untersuchung kommerzieller piezoelektrischer Materialien für die Anwendung in einem scannenden Luftschallsystem zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung von Kompositwerkstoffen

1.Betreuer Herr Prof. Dr. Klaus Vitold Jenderka
2.Betreuer Herr Dr. Sebastian Brand

Merseburg, den 25. Juli 2013

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

_____

Ralf Breyer Merseburg, den 25. Juli 2013

Abstract

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Entwicklung von Ultraschallwandlern für den Einsatz ohne flüssiges Koppelmedium. Eine besondere Herausforderung bestand in der Minimierung der Reflexion und somit der Verluste beim Schallübertritt vom Schallwandler zur Luft. Hierzu wurden verschiedene Ansätze für eine akustische Anpassung untersucht und bewertet. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich interessante Entwicklungsansätze auf Basis einer deutlichen Verbesserung der Ankopplung.

Vorwort

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung von Luftultraschallwandlern für ein scannendes System zur Untersuchung von Kompositwerkstoffen. In einem vorangegangenen Projekt sind die Möglichkeiten für den Einsatz von Ultraschall durch Luftankopplung untersucht worden. Hierfür wurde ein statischer Aufbau verwendet. Aufgrund vielversprechender Ergebnisse, wurde das Projekt um einen Scanner zur automatisierten Positionierung erweitert. Dessen Aufbau und Programmierung spielen in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle, finden aber aufgrund der Notwendigkeit in einigen Abschnitten Erwähnung. Die Einkopplung des Ultraschalls in Luft stellt besondere Anforderungen an Luftschallwandler. Die geringe akustische Impedanz von Luft führt an den Grenzflächen zwischen Luft und Festkörper zu einer Reflektion von über 99 %. Die große Reflektivität an den Feststoff-Gas-Grenzflächen lässt sich nicht in jedem Falle vermeiden. Eine Möglichkeit besteht darin die Grenzfläche von Schallwandler zu Luft bzgl. des Reflektiongrades zu optimieren. Zu diesem Zweck werden die piezoelektrischen Keramiken mit speziellen Anpassschichten versehen. Ein weiterer Nachteil ist im Vergleich zu herkömmlichen Koppelmedien, wie zum Beispiel Wasser, die erhöhte akustische Dämpfung. Da die Dämpfung exponentiell zur Frequenz steigt, sollte in Luft mit möglichst niedrigen Frequenzen gearbeitet werden. Während man bei der Werkstoffprüfung häufig Frequenzen im MHz- bis hin zum GHz-Bereich vorfindet, wird beim Luftultraschall mit Frequenzen im kHz-Bereich gearbeitet. Hieraus resultiert theoretisch ein geringeres laterales Auflösungsvermögen. Die Fokussierung in Luft ist jedoch stärker als in Wasser und erlaubt dadurch eine Erhöhung des lateralen Auflösungsvermögens. In dieser Arbeit wird ein Schall-

wandlerpaar unter Verwendung kommerzieller Werkstoffe entwickelt, welches diesen Anforderungen entspricht.

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen **9**
1.1. Schallausbreitung 9
1.2. Piezoelektrischer Effekt 19
1.3. Aufbau von Ultraschallwandlern 25
1.4. Charakterisierung und Bewertung von Ultraschallwandlern 27

2. Material und Methoden **29**
2.1. Verwendete Materialien 29
2.2. Scanner 33
2.3. Ultraschallwandlerentwicklung 35
2.4. Verwendete Proben 43

3. Ergebnisse **45**
3.1. Ultraschallwandler 45
3.2. Gegenüberstellung der Ultraschallwandler 54

4. Diskussion **57**

5. Zusammenfassung Ausblick **59**

A. Fokusvermessung **67**

B. elektr. Charakterisierung **69**

C. Software Scanner **73**

D. Charakterisierungssoftware **77**

E. CAN-Bus Steuerung **81**

F. Fileheader **85**

1. Grundlagen

1.1. Schallausbreitung

Schall ist eine Materiewelle. Seine Ausbreitung ist die Folge der Variation von Druck und Dichte.

Wellen werden in zwei grundsätzliche Moden unterschieden (siehe Abb. 1.1): Longitudinal- und Transversalwellen. Bei Longitudinalwellen sind Teilchenbewegung und Energieausbreitungsrichtung gleichgerichtet, während die Teilchen bei Transversalwellen senkrecht zur Energieausbreitungsrichtung schwingen. Folgt man der Skalar-Theorie, lässt sich die eindimensionale Ausbreitung von Transversalwellen nach BRIGGS wie folgt herleiten.[1] Es gilt das 3. Newtonsche Gesetz:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_s}{\partial x} \tag{1.1}$$

wobei

ρ - Dichte
ξ - Auslenkung senkrecht zur Ausbreitung
σ - Spannung

Solange es sich um ein lineares System handelt, ergibt sich die Spannung σ_s nach dem Hooke'schen Gesetz:

$$\sigma_s = \mu \frac{\partial \xi}{\partial x} \tag{1.2}$$

mit

μ - Schermodul

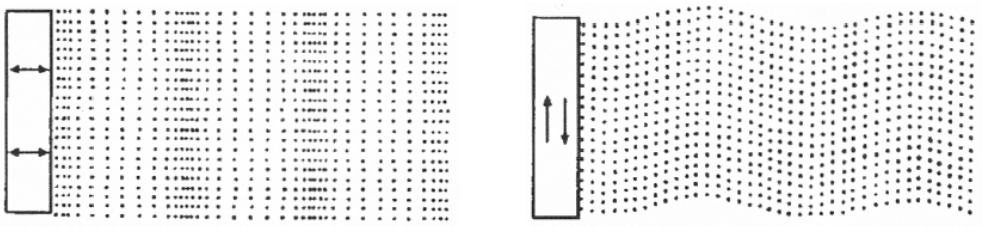


Abbildung 1.1.: **Teilchenbewegung in den Wellenmoden, longitudinale (links) und transversale Welle [6]**

Aus 1.1 und 1.2 ergibt sich die Wellengleichung:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{1.3}$$

Es wird nun folgende Substitution vorgenommen. Für die Auslenkung ξ gilt bei einem harmonischen Ansatz zur Lösung der Differentialgleichung:

$$\xi = \xi_0 e^{i(\omega t \pm kx)} \tag{1.4}$$

Somit ergibt sich aus 1.3:

$$\rho \omega^2 = \mu k^2 \tag{1.5}$$

Durch eine weitere Substitution in Form von $v_{phase} = \frac{\omega}{k}$, ergeben sich die Wellengeschwindigkeiten wie folgt.
Es ergibt sich für die Scherwellengeschwindigkeit

$$v_s = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} \tag{1.6}$$

analog findet man für die Longitudinalwellengeschwindigkeit

$$v_l = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}} \tag{1.7}$$

mit

c_{11} - Kompressionsmodul / E-Modul
c_{44} - Schubmodul

Alle Gase und fast alle Flüssigkeiten übertragen keine Scherwellen. Ausnahmen bilden hier Flüssigkeiten mit einem Schermodul $\mu > 0$. Es können also nur Longitudinalwellen übertragen werden. Zur Berechnung in Flüssigkeiten und Gasen tritt das Kompressionsmodul an die Stelle des Schermoduls. Da das Kompressionsmodul für diese Materialien isotrop ist, kann der Laplaceoperator in die Gleichung 1.3 eingesetzt werden. Des Weiteren wird die Auslenkung durch den Druck ersetzt, so dass sich folgende Gleichung ergibt:

$$\rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = B \Delta p \tag{1.8}$$

mit

$$p = p_0 e^{i(\omega t \pm kx)} \tag{1.9}$$

Aus 1.7 ergibt sich Schallgeschwindigkeit, entsprechend der Erklärung, wie folgt:

$$v_0 = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{1.10}$$

Des Weiteren ergibt sich aus 1.8 durch folgende Substitutionen

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2 \qquad \frac{\omega}{k} = v_0 \qquad B = v_0^2 \rho \tag{1.11}$$

die Helmholtzgleichung 1.12, welche meist als Ausgangspunkt für die theoretische Betrachtung der Akustik in Flüssigkeiten dient.

$$(\nabla^2 + k^2) p = 0 \tag{1.12}$$

Somit lässt sich nun die Ausbreitung der Schallwellen beschreiben. Im Nachfolgenden wird das Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen beschrieben.
An der Grenzflächen zwischen zwei nicht identischen Materialien wird die Schallwelle teilweise reflektiert und transmitiert. Der Reflektionsgrad lässt sich durch Betrachtung der akustischen Impedanzen beschreiben. Die Impedanz ist definiert als das Verhältnis von Spannung zu Auslenkungsgeschwindigkeit der Partikel [2].

$$Z = -\frac{\sigma_t}{\partial_u / \partial_r} \qquad [Rayl] \tag{1.13}$$

Eine weitere Form der Darstellung der akustischen Impedanz ist das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit.

$$Z = \rho v \tag{1.14}$$

Die auf 1 normierten Spannungsamplituden von reflektierter und transmittierter Welle sind R und T. Aufgrund der Spannungskontinuität gilt:

$$1 + R = T \tag{1.15}$$

Es gilt weiterhin die Kontinuität der Auslenkungsgeschwindigkeit, so dass sich der Ausdruck 1.15 wie folgt erweitert:

$$\frac{1+R}{Z_1} = \frac{T}{Z_2} \tag{1.16}$$

Wobei Z_1 und Z_2 die Impedanzen der Medien an den Grenzflächen sind. Nach Kombination von 1.15 und 1.16 ergibt sich für den Fall einer senkrecht einfallenden Welle:

$$\frac{1-R}{Z_1} = \frac{1+R}{Z_2} \tag{1.17}$$

Der Vorzeichenwechsel des Reflektionskoeffizienten ergibt sich aus der Umkehr der Ausbreitungsrichtung der reflektierten Welle. Nach Umformung von 1.17 ergibt sich der Reflektionskoeffizient in Abhängigkeit der Impedanzen zu:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{1.18}$$

Analog 1.18 ergibt sich der Transmissionskoeffizient in Abhängigkeit der Impedanzen.

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{1.19}$$

Diese Koeffizienten gelten für den senkrechten Einfall der Schallwelle zur Grenzfläche. Der Energiefluss ist das Skalarprodukt aus Auslenkungsgeschwindigkeit und Spannung. In einem isotropen Medium sind diese parallel zueinander, so dass sich der Hauptenergiefluss wie folgt ergibt:

$$\langle P \rangle = \left\langle \frac{\partial u}{\partial t} \sigma_T \right\rangle = Z \left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{Z} \langle \sigma_T^2 \rangle \tag{1.20}$$

aus 1.18, 1.19 und 1.20 folgt für die transmittierte $\langle P_T \rangle$ und reflektierte $\langle P_R \rangle$ Energie

$$\begin{aligned} \langle P_R \rangle &= \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \frac{Z_2^2 - 2Z_2Z_1 + Z_1^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \\ \langle P_T \rangle &= \frac{Z_1}{Z_2} \left(\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \end{aligned} \tag{1.21}$$

Sofern eine Welle nicht senkrecht auf eine Grenzfläche auftrifft gilt das Snell'sche Gesetz.

$$\frac{\sin(\Theta_1)}{\sin(\Theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} \tag{1.22}$$

Aus dem Snell'schen Gesetz lässt sich die Notwendigkeit beschreiben, dass der tangentiale Anteil (|| zur Grenzfläche) des Wellenvektors über die Grenzfläche hinaus erhalten bleibt. Daraus folgt der Ausdruck $k_1 \sin(\theta_1) = k_2 \sin(\theta_2)$. Für eine nicht senkrecht einfallende Welle ist die akustische Impedanz der Grenzfläche:

$$Z' = \frac{\sigma_t}{\partial u_z / \partial t} = \frac{\rho v}{\cos \Theta} \tag{1.23}$$

Die Kontinuitätsbedingung der Normalimpedanz Z' ergibt sich direkt aus den Kontinuitätsbedingungen von Spannung und Auslenkung.

Erklärung der Indizes und Bezeichnungen.

i	- einfallende (incident) Welle
r	- reflektierte Welle
l	- longitudinale Welle
s	- Scherwelle
ϕ	- Skalarpotential
ψ	- Vektorpotential
α	- z - Komponente der Wellenvektoren negativ zur Ausbreitungsrichtung
β	- x - Komponente der Wellenvektoren senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
ρ_0	- Dichte des Fluids
ρ_1	- Dichte des Festkörpers

Wenn eines oder beide Medien, einer Grenzfläche Festkörper sind, ergibt jede einfallende Welle eine longitudinale und mindestens eine transversale Welle.

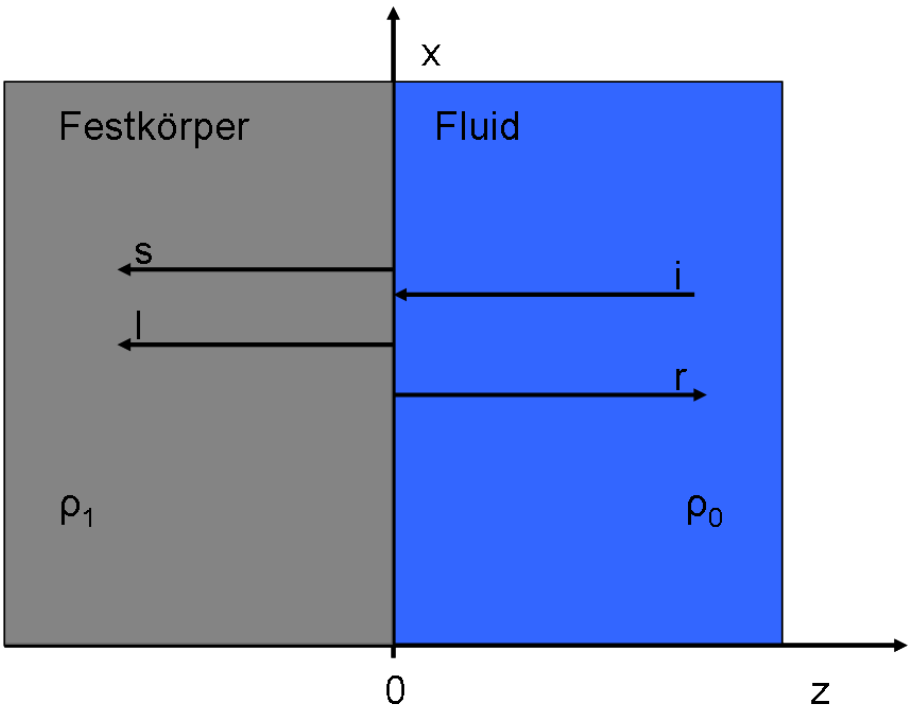


Abbildung 1.2.: **Schema der Festkörper-Fluid Grenzfläche**

Abbildung 1.2 zeigt ein konkretes Beispiel für den Schallübertritt an einer Grenzfläche. Anhand dieses Beispiels wird im Folgenden eine komplexere Analyse des Reflektions- und Transmissionsverhaltens von Schallwellen durchgeführt. Im Normalfall existieren an einer solchen Grenzfläche 6 Freiheitsgrade, welche sich aus 3 Komponenten der Auslenkung, sowie 3 Komponenten der Spannung zusammensetzen. Durch die Vereinfachung im zweidimensionalen Raum entfallen alle Auslenkungen und Spannungen in y-Richtung (vgl. Koordinatensystem in Abbildung 1.2). Eine weitere Komponente (Auslenkung in x-Richtung) entfällt auf der fluidseitig, da Fluide nur Longitudinalwellen übertragen können. Es folgt, dass lediglich die Auslenkung und Spannung senkrecht zur Oberfläche, sowie die Nullspannung parallel zur Oberfläche betrachtet werden müssen. Hierfür werden folgende Randbedingungen aufgestellt.

$$\begin{aligned} z \geq 0 \qquad & \phi_0 = \phi_i e^{(i\alpha_0 z)} + \phi_r e^{-i\alpha_0 z} \\ z \leq 0 \qquad & \phi_1 = \phi_l e^{(i\alpha_l z)} \\ & \psi_1 = \psi_s e^{(i\alpha_s z)} \end{aligned} \tag{1.24}$$

Für $z = 0$ auf der Seite des Fluids gilt:

$$\begin{aligned}
&\text{Auslenkung} && u_0 = f(u_{0x}, u_{0z}) = i(\beta, \alpha_0)\phi_i - i(\beta, \alpha_0)\phi_r \\
&\text{Dehnung} && \varepsilon_0 = -(\beta^2 + \alpha_0^2)(\phi_i + \phi_r) = -k_0^2(\phi_i + \phi_r) \\
&\text{Spannung} && \sigma_{0zz} = -Bk_0^2(\phi_i + \phi_r) \quad \text{B} \ldots \text{Kompressionsmodul} \\
& && \sigma_{0xz} = 0
\end{aligned} \tag{1.25}$$

Für $z = 0$ auf der Festkörperseite gilt:

$$\begin{aligned}
&\text{Auslenkung} && u_1 = f(u_{1x}, u_{1z}) = i(\beta, \alpha_l)\phi_l + i(\alpha_s, -\beta)\psi_s \\
&\text{Dehnung} && \varepsilon_1 = -(\beta^2 + \alpha_l^2)\phi_l = -k_l^2\phi_l \\
&\text{Spannung} && \sigma_{1zz} = -2c_{44}(\alpha_l^2\phi_l - \alpha_s\beta\psi_s) - (c_{11} - c_{44})k_l^2\phi_l \\
& && \qquad = c_{44}[(\beta^2 - \alpha_s^2)\phi_l - 2\alpha_s\beta\psi_s] \\
& && \sigma_{1xz} = c_{44}[-2\alpha_l\beta\phi_l - (\beta^2 - \alpha_s^2)\psi_s]
\end{aligned} \tag{1.26}$$

An diesem Punkt werden nun folgende Substitutionen eingeführt:

$$B = \rho_0\frac{\omega^2}{k_0^2}, \qquad c_{44} = \rho_1\frac{\omega^2}{k_s^2}, \qquad p \equiv \frac{(\beta^2 - \frac{1}{2}k_s^2)}{\beta} = \frac{\beta^2 - \alpha_s^2}{2\beta} \tag{1.27}$$

Im nächsten Schritt werden die Randbedingungen eingesetzt und ω^2 eliminiert. Somit ergeben sich die folgenden drei Gleichungen:

$$\begin{aligned}
&\rho_0(\phi_i + \phi_r) + \frac{\rho_1}{k_s^2}[(\beta^2 - \alpha_s^2)\phi_l + 2\alpha_s\beta\psi_s] \\
&= \rho_0(\phi_i + \phi_r) + \frac{2\rho_1\beta}{k_s^2}(p\phi_l + \alpha_s\psi_s) = 0
\end{aligned} \tag{1.28}$$

$$\alpha_0(\phi_i - \phi_r) - (\alpha_l\phi_l - \beta\psi_s) = \alpha_0(\phi_i - \phi_r) - \left(\frac{k_s^2}{2\beta}\right)\psi_s = 0 \tag{1.29}$$

$$\alpha_l\phi_l + \frac{(\beta^2 - \alpha_s^2)\psi_s}{2\beta} = \alpha_l\phi_l + p\psi_s = 0 \tag{1.30}$$

Weiterhin gilt für den Reflektionskoeffizient (R) und die Transmissionskoeffizienten (T_l, T_s):

$$R = \frac{\phi_r}{\phi_i} \qquad T_l = \left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)\frac{\phi_l}{\phi_i} \qquad T_s = \left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)\frac{\psi_s}{\phi_i}$$

Aus den obigen Gleichungen ergeben sich für diese Koeffizienten folgende Ausdrücke:

$$\begin{aligned} R &= \frac{4\alpha_0\beta^2(\alpha_l\alpha_s + p^2)\frac{\rho_1}{\rho_0} - \alpha_l k_s^4}{4\alpha_0\beta^2(\alpha_l\alpha_s + p^2)\frac{\rho_1}{\rho_0} + \alpha_l k_s^4}, \\ T_l &= \frac{-4\alpha_0 p\beta k_l^2}{4\alpha_0\beta^2(\alpha_l\alpha_s + p^2) + \alpha_l k_s^4 \frac{\rho_0}{\rho_1}}, \\ T_s &= \frac{\alpha_l}{p} T_l \end{aligned} \tag{1.31}$$

In Gleichung 1.24 bis Gleichung 1.31 wurde nur der senkrechte Einfall der Schallwelle betrachtet. Für die Betrachtung der Winkelabhängigkeit der Reflektions- und Transmissionskoeffizienten, wird wieder vom Snell'schen Gesetz ausgegangen. Es gilt:

$$\beta = k\sin\Theta = k_l\sin\Theta_l = k_s\sin\Theta_s \tag{1.32}$$

Aufgrund der Winkelbeziehungen ergibt sich:

$$\begin{aligned} &\alpha_0 = k\cos\Theta \qquad \alpha_l = k_l\cos\Theta_l \qquad \alpha_s = k_s\cos\Theta_s \\ &p = -k_s\frac{\cos(2\Theta_s)}{\omega\sin\Theta_s} \end{aligned} \tag{1.33}$$

Entsprechend der Definition von Z' aus Gleichung 1.23 ergeben sich für die akustischen Impedanzen folgende Ausdrücke:

$$Z = \frac{\rho_0 v_0}{\cos\Theta}, \qquad Z_l = \frac{\rho_1 v_l}{\cos\Theta_l}, \qquad Z_s = \frac{\rho_1 v_s}{\cos\Theta_s} \tag{1.34}$$

Somit ergeben sich für die Reflektions- und Transmissionskoeffizienten:

$$\begin{aligned} R(\Theta) &= \frac{Z_l\cos^2(2\Theta_s) + Z_s\sin^2(2\Theta_s) - Z}{Z_l\cos^2(2\Theta_s) + Z_s\sin^2(2\Theta_s) + Z} \\ T_l(\Theta) &= \frac{2Z_l\cos(2\Theta_s)}{Z_l\cos^2(2\Theta_s) + Z_s\sin^2(2\Theta_s) + Z} \\ T_s(\Theta) &= -T_l(\Theta) \end{aligned} \tag{1.35}$$

Durch die Einführung der Substitution von

$$Z_{tot} = Z_l\cos^2(2\Theta_s) + Z_s\sin^2(2\Theta_s) \tag{1.36}$$

lässt sich die Reflektanzfunktion wie folgt vereinfachen

$$R(\Theta) = \frac{Z_{tot} - Z}{Z_{tot} + Z} \tag{1.37}$$

und entspricht somit wieder der Grundform aus 1.18.

Diese Koeffizienten setzen die Druckamplitude der reflektierten Welle und die Amplituden der Spannungskomponenten jeder transmittierten Welle in Relation zur Druckamplitude der einfallenden Welle. Da es sich bei der Druckamplitude, im Gegensatz zur Amplitude der Auslenkung, um einen skalaren Wert handelt, lässt sich mit diesem Parameter effektiv arbeiten.

Abschließend noch die Gleichungen für den Energiefluss in Abhängigkeit des Einfallswinkels.

$$\begin{aligned} &\text{reflektiert} && \frac{E_r}{E} = |R(\Theta)|^2 \\ &\text{transmittiert longitudinal} && \frac{E_l}{E} = \frac{\rho_0 \tan\Theta}{\rho_1 \tan\Theta_l}|T_l(\Theta)|^2 \\ &\text{transmittiert scher} && \frac{E_s}{E} = \frac{\rho_0 \tan\Theta}{\rho_1 \tan\Theta_s}|T_s(\Theta)|^2 \end{aligned} \tag{1.38}$$

Aufgrund der Winkelabhängigkeit ergeben sich verschiedene Grenzfälle:

1. $\Theta >$ kritischer Longitudinalwinkel $\rightarrow \Theta_l$ imaginär $\rightarrow$ keine Energieübertragung in Form einer Longitudinalwelle

2. Θ kritische Scherwinkel $\rightarrow \Theta_s$ imaginär $\rightarrow$ keine Energieübertragung in Form einer Scherwelle

3. aus 1. und 2. $\rightarrow$ R=1 $\rightarrow$ Energieeintrag nur in Oberfläche

Zum Verständnis der Funktion von Anpassschichten zur Minimierung der Reflektion muss die Impedanz der Grenzfläche komplex betrachtet werden. Nach [3] lässt sich die komplexe Impedanz wie folgt herleiten. Auf die in Abbildung 1.2 gezeigte Grenzfläche wird eine weitere Schicht aufgebracht. Analog zu Gleichung 1.24 für $z \geq 0$ gilt für die Spannung σ_0 und die Auslenkungsgeschwindigkeit v_0:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma_i e^{i\alpha_0 z} + \sigma_r e^{-i\alpha_0 z} \\ v_0 &= v_i e^{i\alpha_0 z} + v_r e^{-i\alpha_0 z} \end{aligned} \tag{1.39}$$

Es gilt weiterhin für den Reflektionskoeffizienten

$$R = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \tag{1.40}$$

Setzt man nun 1.40 in 1.39 ein erhält man

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma_i(e^{i\alpha_0 z} + Re^{-i\alpha_0 z}) \\ v_0 &= -\frac{\sigma_i}{Z_0}(e^{i\alpha_0 z} - Re^{-i\alpha_0 z}) \end{aligned} \tag{1.41}$$

Wie oben erwähnt wird eine endliche Schicht der Dicke l bei $z = 0$ mit der Impedanz Z_0 aufgebracht. Wobei Z_{in} die Eingangsimpedanz der Schicht mit der Dicke l ist. Entsprechend der Gleichung 1.23 ergibt sich durch einsetzen von 1.41

$$Z_{in} = Z_0 \frac{e^{i\alpha l} + Re^{-i\alpha l}}{e^{i\alpha l} - Re^{-i\alpha l}} \tag{1.42}$$

Durch einsetzen der Gleichung 1.42 in 1.18, wobei $Z_2 = Z_l$, erhält man folgenden Ausdruck

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_l \cos(\alpha l) + iZ_0 \sin(\alpha l)}{Z_0 \cos(\alpha l) + iZ_l \sin(\alpha l)} \tag{1.43}$$

Somit ergibt sich, dass das Aufbringen einer Anpassschicht zu einer Änderung der Impedanz der Grenzschicht führt. Für eine Anpassschicht der Dicke $\frac{\lambda}{4}$ ($\alpha l = \frac{\pi}{2}$) vereinfacht sich die Gleichung 1.43 zu

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_l} \tag{1.44}$$

Bei bekannten Impedanzen von Keramik (Z_l) und Ausbreitungsmedium (Z_in) ergibt sich die für eine Anpassschicht benötigte akustische Impedanz Z_0:

$$Z_0 = \sqrt{Z_l * Z_{in}} \tag{1.45}$$

Die Anpassung kann zwischen Medien unterschiedlichster Impedanzen geschehen, wobei eine Anpassung nur für eine Frequenz ideal ist, bedingt durch $d = \frac{\lambda}{4}$.

1.2. Piezoelektrischer Effekt

Der Piezoelektrischer Effekt beschreibt die Änderung der Polarisation eines Körpers unter elastischer Verformung, welche eine elektrische Spannung hervorruft. Dieser Effekt lässt sich auch umkehren, so dass sich ein Körper aufgrund eines äußeren elektrischen Spannungsfeldes verformt.

Der piezoelektrische Effekt wurde zuerst an natürlichen Kristallen entdeckt und erforscht. Beispiele hierfür sind Turmalin und Quarz.

Piezoelektrizität begründet sich durch die Kristallstruktur der Materialien. Alle Kristalle weisen eine Perowskitstruktur auf. Eine entscheidende Eigenschaft ist das fehlende Symmetriezentrum. Bei allen piezoelektrische Kristallen und Keramiken bildet sich unterhalb der Curietemperatur ein Dipol aus. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 1.3. Bei Kristallen bildet sich der Dipol aufgrund der Gitterverzerrung. Unterhalb der Curietemperatur verlässt, bei den technisch wichtigen PZT[1]-Keramiken, das Titanmolekül das Gitterzentrum.

Durch das fehlende Symmetriezentrum sind alle Materialien anisotrop. Um das piezoelektrische Verhalten zu beschreiben existieren insgesamt 18 unabhängige piezoelektrische Konstanten, 12 Elastizitätskonstanten und 6 dielektrische Konstanten. Mit steigender Symmetrie verringert sich die Anzahl der unabhängigen Konstanten drastisch, so dass viele von ihnen entfallen. Technisch wichtige Kristalle und Keramiken weisen eine hohe Symmetrie auf. Zur mathematischen Beschreibung der Piezoelektrizität gibt es 4 Paare linearer Gleichungen, je nach Wahl der unabhängigen Parameter[4].

- elektrische Feldstärke E und Dehnung S
- mech. Spannung T und elektr. Feldstärke E
- mech. Spannung T und Ladungsdichte D
- Dehnung S und Ladungsdichte D

Aus technischer Sicht interessieren die ersten zwei Varianten. Zur Beschreibung longitudinaler Moden mit transversalem elektr. Feld dient die Form S und D als

[1] Blei-Zirkonat-Titanat

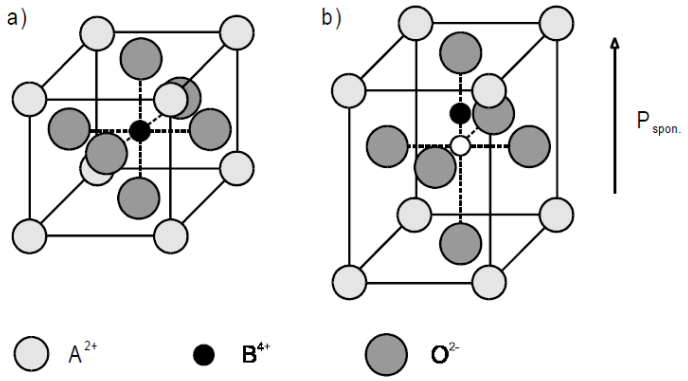


Abbildung 1.3.: **Schema der Perowskitstruktur a)Oberhalb der Curietemperatur b) Unterhalb der Curietemperatur mit spontaner Polarisation P** [5]

Funktion von T und E.[2]

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \\ D_m &= d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \end{aligned} \tag{1.46}$$

Für Dickenmoden dient die Form von T und D als Funktion von S und E.

$$\begin{aligned} T_i &= c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m \\ D_m &= e_{mi} S_i + \varepsilon_{mk}^S E_k \end{aligned} \tag{1.47}$$

Für Longitudinalmoden mit parallelem elektr. Feld wird die Form von S und E als Funktion von T und D genutzt.

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij}^D T_j + g_{mi} D_m \\ E_m &= -g_{mi} T_i + \beta_{mk}^T D_k \end{aligned} \tag{1.48}$$

Das letzte Funktionenpaar wird hier nur der Vollständigkeit halber angegeben.

$$\begin{aligned} T_i &= c_{ij}^D S_j - h_{mi} D_m \\ E_m &= -h_{mi} S_i + \beta_{mk}^S D_k \end{aligned} \tag{1.49}$$

[2] $i, j = 1 \ldots 6; \qquad m, k = 1 \ldots 3$

Die Definition der piezoelektrischen Konstanten folgt direkt aus den Gleichungen 1.46 - 1.49, beispielsweise:

$$e = \left(- \frac{\partial T}{\partial E} \right)_S = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E \tag{1.50}$$

Die piezoelektrischen Konstanten stehen folgendermaßen zueinander:

$$\begin{aligned} d_{mi} &= \varepsilon^T_{nm} g_{ni} = e_{mj} s^E_{ji} \\ g_{mi} &= \beta^T_{nm} d_{ni} = h_{mj} s^D_{ji} \\ e_{mi} &= \varepsilon^S_{nm} h_{ni} = d_{mj} c^E_{ji} \\ h_{mi} &= \beta^S_{nm} e_{ni} = g_{mj} c^D_{ji} \end{aligned} \tag{1.51}$$

wobei:

- ϵ_{mk} - Permitivitätszahl (T=0 „freie“Permitivität, S=0 „geklemmte“Permitivität)
- d_{mi} - piezoelektr. Ladungskonstante
- g_{mi} - piezoelektr. Spannungskonstante
- s_{ij} - Elastische Nachgiebigkeit (E=0 Kurzschluss, D=0 Leerlauf)
- β_{mk} - dielektrische Impermeabilität
- c_{ij} - Steifigkeit
- e_{mi} - elektr. Ladungsdichte
- h_{mi} - elektr. Feldstärke

Für die Anwendung als Ultraschallwandler ist die wichtigste Eigenschaft piezoelektrischer Materialien der Kopplungsfaktor k. Mithilfe des Kopplungsfaktors lassen sich verschiedene Materialien direkt vergleichen. Definiert wird der Kopplungsfaktor als Wurzel aus dem Verhältnis von elektrischer (mech.) Arbeit unter idealen Bedingungen, zur gesamten gespeicherten Energie. Der Kopplungsfaktor k_{mat} unterscheidet sich vom effektiven Kopplungsfaktor, da im Resonanzfall eine andere räumliche Verteilung von elastischer und dielektrischer Energie auftritt [4]. Abbildung 1.4 zeigt eine Spannungs-Dehnungskurve und ein dazugehöriges Schema. Auf einen Piezoelement wird eine Spannung T_3 aufgebracht. Das Element kann sich senkrecht zur Spannung frei ausdehnen, so dass T_3 die einzige Spannungskomponente ist. Das Element ist kurzgeschlossen. Die gesamte gespeicherte Energie ist gegeben durch $\sum \int T_i dS_i = \int T_3 dS_3$. Der Anstieg

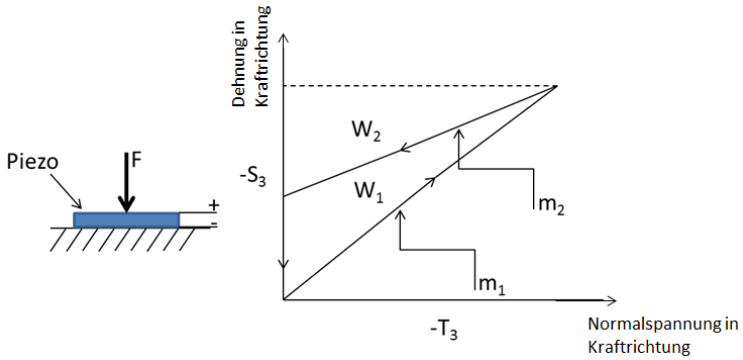


Abbildung 1.4.: **Illustration des piezoelektrischen Kopplungsfaktors** [4]

der Dehnungs-Spannungskurve während der Kompression ist $m_1 = s_{33}^E$. Bevor die Kraft entfernt wird, wird der elektrische Anschluss des Elements geöffnet. Während der Reduktion der Kraft F kehrt das Element in den Ausgangszustand zurück. Der Anstieg der Spannungs-Dehnungskurve entspricht jetzt $m_2 = s_{33}^D$. Um den Kreislauf abzuschließen wird eine elektrische Last an das Element angeschlossen. Unter idealisierten Bedingungen entspricht W_1 der Arbeit, welche an der elektrischen Last umgesetzt wurde. W_2 entspricht der in der Kompression gespeicherten Energie die der elektrischen Last nicht zur Verfügung stand. Der Kopplungsfaktor ergibt sich in diesem Fall aus

$$(k_{33}^l)^2 = \frac{W_1}{W_1 + W_2} = \frac{s_{33}^E - s_{33}^D}{s_{33}^E} \tag{1.52}$$

Aus den zwei Gleichungen 1.46 kann s_{33}^D, durch einen Ausdruck von d_{33} und ε_{33} ersetzt werden. In der zweiten Gleichung wird $D_3 = 0$ gesetzt und nach E_3 aufgelöst. Setzt man das Ergebnis in die erste Gleichung ein erhält man:

$$\left(\frac{S_3}{T_3}\right)_{D=0} = s_{33}^D = s_{33}^E - \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T} = s_{33}^E \left(1 - \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \varepsilon_{33}^T}\right) \tag{1.53}$$

Durch umstellen der Gleichung 1.52 nach s_{33}^D ergibt sich

$$s_{33}^D = (1 - (k_{33}^l)^2) s_{33}^E \tag{1.54}$$

Tabelle 1.1.: **Wichtige Kopplungsfaktoren piezoelektrischer Keramiken oder Kristallen der Klasse „6mm“ in Abhängigkeit der Randbedingungen** [4]

Kopplungsfaktor	elastische Randbedingungen
$k_{31}^{l} = \frac{d_{31}}{\sqrt{s_{11}^{E}\varepsilon_{33}^{T}}}$	alle Spannungen null, außer T_1
$k_{33}^{l} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^{E}\varepsilon_{33}^{T}}}$	alle Spannungen null, außer T_3
$k_p = k_{31}\sqrt{\frac{2}{1-\sigma_p^E}}$	alle Spannungen null, außer $T_1 = T_2$
$k_{31}^{\omega} = \left(\frac{k_{31}}{\sqrt{1-k_{31}^2}}\right)\left(\frac{1+\sigma_p^E}{1-\sigma_p^E}\right)$	T_3 und S_2 sind null
$k_{33}^{\omega} = \frac{(k_{33}+\sigma_m^E k_{31})}{\sqrt{(1-(\sigma_m^E)^2)(1-k_{31}^2)}}$	T_2 und S_1 sind null
$k_{33}^{t} = \frac{e_{33}}{\sqrt{c_{33}^{D}\varepsilon_{33}^{S}}}$	alle Dehnungen null, außer S_3
$k_{15} = \frac{e_{15}}{\sqrt{c_{44}^{D}\varepsilon_{33}^{S}}}$	alle Dehnungen null, außer S_5

σ_m und σ_p entsprechen der ebenen und der meridionalen Querkontraktionszahl

Somit ergibt sich für den Kopplungsfaktor aus 1.53

$$(k_{33}^{l})^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^{E}\varepsilon_{33}^{T}} \tag{1.55}$$

Im umgekehrten Fall, in dem elektrische in mechanische Energie umgewandelt wird, führt die Lösung des Gleichungssystems zum gleichen Ergebnis. Je nach Randbedingung ergeben sich verschiedene Kopplungsfaktoren (Vgl. Tabelle 1.1). Der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} wird als Bewertungsmaßstab herangezogen, sofern keine eindeutigen Randbedingungen gegeben sind. Durch Kenntnis der Serienresonanz f_s und der Parallelresonanz f_p lässt sich der effektive Kopplungs-

faktor berechnen.

$$k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \tag{1.56}$$

Der effektive Kopplungsfaktor entspricht dem Kopplungsfaktor nur für den Fall der symmetrischen Schwingungsmoden, da in den anderen Moden stehende Wellen existieren, wodurch elastische und dielektrische Energie nicht konstant gekoppelt sind [4]. Allgemein gilt für den Kopplungsfaktor in Abhängigkeit der Resonanzfrequenzen

$$k_{mat}^2 = \frac{\pi f_s}{2 f_p} \tan\left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_p}\right) \tag{1.57}$$

Für sehr kleine $\frac{\Delta f}{f_p}$, lässt sich die obige Gleichung wie folgt vereinfachen

$$k_{mat}^2 \sim \frac{\pi^2 \Delta f}{4 f_p} \tag{1.58}$$

Auch Gleichung 1.56 lässt sich vereinfachen zu

$$k_{eff}^2 \sim 2\frac{\Delta f}{f_p} \tag{1.59}$$

Für kleine k gilt dann:

$$k_{mat}^2 \sim \frac{\pi^2}{8} k_{eff}^2 \tag{1.60}$$

1.3. Aufbau von Ultraschallwandlern

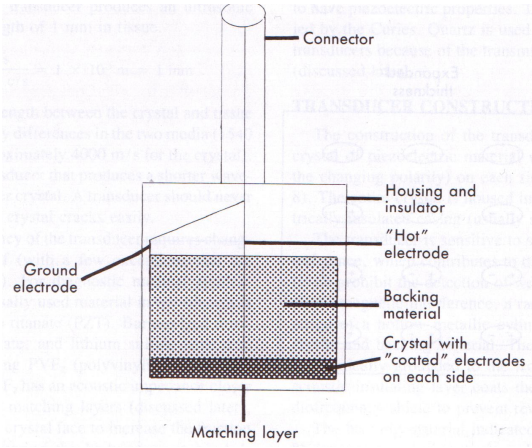


Abbildung 1.5.: **Schema Ultraschallwandler [10]**

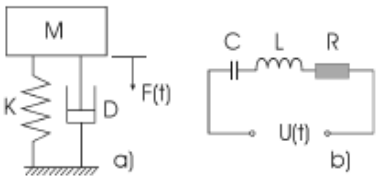


Abbildung 1.6.: **Analogie von mechanischem und elektromagnetischem Schwingungsverhalten [8]**

Ein Ultraschallwandler besteht aus passiven und aktiven Komponenten. Diese werden in Abbildung 1.5 gezeigt. Hauptbestandteil eines Ultraschallwandler ist der Aktuator, in dieser Arbeit eine Keramik. Dieser wandelt elektrische in mechanische Schwingungen und umgekehrt. Das Verhalten des Aktuators kann mittels eines elektrischen Ersatzschaltbildes (vgl. Abb. 1.6b)), bzw. eines mechanischen Modells (vgl. Abb. 1.6a)) beschrieben werden. Die Ersatzschaltbilder dienen der Beschreibung der Resonanzstellen und können in dieser Form immer nur für einen Resonanzfall dimensioniert werden.

Die Parameter des mechanischen und des elektrischen Modells der in Abbildung 1.6 gezeigten Analogien stehen im folgendem Zusammenhang.

- Induktivität L $\triangleq$ träge Aktuatormasse M
- Kapazität C $\triangleq$ Steifigkeit K

- Widerstand R $\triangleq$ Dämpfung D

Im elektrischen Ersatzschaltbild ist eine weitere Kapazität (C_0) enthalten. Diese beschreibt die statische Kapazität des piezoelektrischen Materials mit seiner spezifischen Dielektrizitätskonstante. Bei der Entwicklung von Ultraschallwandlern ist zu beachten, dass sich die Resonanzfrequenz in jedem Fertigungsschritt ändert. Begründen lässt sich dies mit dem mechanischem Modell. Sowohl das Vergießen als auch das Aufbringen von Anpassschichten haben Einfluss auf die träge Masse und somit auf die Resonanzfrequenz.

Aufgrund der Schwingungscharakteristik eines Aktuators ist in den meisten Fällen ein Backing notwendig. Um die Ausschwingzeit zu verkürzen, wird der Aktuator durch das Backing bedämpft, zusätzlich müssen Reflektionen an der Rückseite des Aktors verhindert werden. Ähnlich wie die Anpassschicht muss die Impedanz des Backings an die des Aktuators angepasst werden.

Um möglichst viel Energie in die gewünschte Richtung auszukoppeln, muss die akustische Impedanz des Aktuators mittels einer Anpassschicht an die Impedanz eas Koppelmediums angepasst werden. Die Anpassung erfolgt durch $\frac{\lambda}{4}$–Schichten mit entsprechender akustischer Impedanz (vgl. Abschnitt 1.1). Aus Gleichung 1.45 ergibt sich die Impedanz einer Anpassschicht $Z_{Anp} = 0,11\ MRayl$ für eine Ankopplung an Luft, bei $Z_{Luft} = 0,00041\ MRayl$ und $Z_{Aktuator} = 29,6\ MRayl$

1.4. Charakterisierung und Bewertung von Ultraschallwandlern

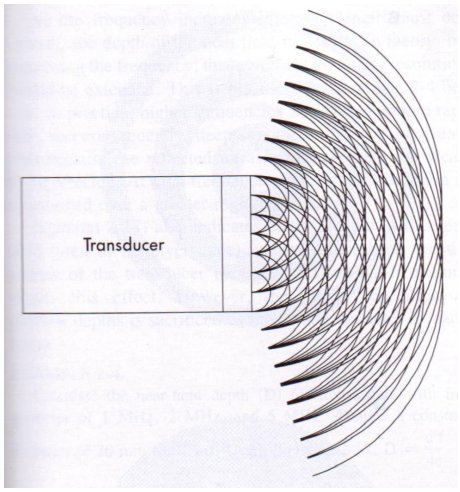


Abbildung 1.7.: **Schema der Ausbildung des Nahfeldes nach [10]**

Zur Charakterisierung eines Schallwandlers dient das von ihm abgestrahlte Schallfeld. Es wird in Nah- und Fernfeld unterteilt. Beim Nahfeld handelt es sich um den Bereich unmittelbar vor dem Schallwandler. Das Nahfeld zeichnet sich durch ein unregelmäßiges Strahlprofil aus. Begründen lässt sich die Inhomogenität durch konstruktive und destruktive Interferenzen von Schallwellen. Große Schallquellen verhalten sich wie mehrere einzelne kleine Schallquellen mit dem Durchmesser einer Wellenlänge, so dass sich eine komplexe Wellenfront ausbildet. Unregelmäßigkeiten in den Kristallen verursachen noch komplexere Muster [10] (siehe Abb. 1.7).

Das Fernfeld zeichnet sich durch ein homogenes Strahlprofil aus. Es beginnt mit dem letzten Druckmaximum im Schallfeld. Nach diesem sinkt der Schalldruck stetig, gleichzeitig divergiert das Schallfeld auseinander. Für einen unfokussierten Ultraschallwandler mit dem Durchmesser d lässt sich die Nahfeldlänge wie folgt berechnen:

$$D = \frac{d^2 f}{4c} = \frac{d^2}{4\lambda} = \frac{r^2}{\lambda} \tag{1.61}$$

Die Divergenz ϕ lässt sich ebenfalls für den unfokussierten Schallwandler berechnen:

$$\sin\phi = \frac{0,61\lambda}{r} = \frac{1,22\lambda}{d} = \frac{1.22c}{df} \tag{1.62}$$

Die größte laterale Auflösung eines Schallwandlers liegt bei Übergang von Nahfeld in Fernfeld, bzw. im Fokus eines Schallfeldes, daher sind die Fokusbreite und Fokuslänge wichtige Kriterien bei der Charakterisierung des Ultraschallwandlers. Je kleiner die Fokusbreite, desto größer ist die laterale Auflösung. Als Fokusbereich wird der Bereich angegeben in dem die Intensität um 3 dB des Maximums abgeklungen ist [10]. Ein weiteres Kriterium für den Vergleich von Schallfeldern ist der max. Schalldruck. Für den Vergleich von Anpassschichten lässt dieser einen direkten Vergleich ihrer Güte zu. In dieser Arbeit werden die gemessenen Amplituden normiert, um Unterschiede besser zu verdeutlichen. Zu diesem Zweck wird eine Referenzmessung aller Schallwandler ohne akustische Anpassung vorgenommen. Die so ermittelte maximale Amplitude dient als Referenzwert. Alle gemessenen Amplituden werden mit folgender Gleichung normiert.

$$U = 10 * lg(\frac{U}{U_{ref}}) \tag{1.63}$$

Um Schallfelder aufzuzeichnen gibt es verschiedenste Methoden. Bekannt aus der Wasserankopplung ist die Vermessung mittels Hydrophon, bei der entweder das Hydrophon oder der Ultraschallwandler 2-(xz,yz) oder 3-Dimensional (xyz) verfahren wird. Beim Hydrophon handelt es sich ebenfalls um ein piezoaktives Element, welches als Punktwandler angenommen werden kann. Das aufgezeichnete Amplitudenbild, kann mittels Eichung des Hydrophones in Schalldrücke umgerechnet werden. Ein weiteres Verfahren ist die Nutzung eines Reflektors. Für einen 2-Dimensionalen Scan wird meist ein dünner Draht verwendet. Bei diesem Verfahren dient der Schallwandler sowohl als Sender als auch als Empfänger. Eine Umrechnung der gemessenen Amplituden in Schalldruck ist durch eine Messung mit einem bekannten Schallwandler möglich.

2. Material und Methoden

2.1. Verwendete Materialien

Wie bereits aus Abschnitt 1.3 entnommen werden kann, besteht ein Ultraschallwandler in seinem grundsätzlichen Aufbau aus folgenden Komponenten:

- piezoelektrisches Material
- Backing
- Anpassschicht
- ggf. akustische Linse

Für diese Bestandteile standen die nachfolgend beschriebene Materialien zur Verfügung.

Die verwendeten piezoelektrischen Materialien mussten aufgrund der Konzeption als Luftschallwandler bestimmte Anforderungen erfüllen. Als wichtigste Eigenschaft ist die Resonanzfrequenz einzustufen, wobei diese einen Kompromiss aus Auflösung und Dämpfung bildet. Da die akustische Dämpfung mit steigender Frequenz zunimmt, ist eine möglichst niedrige Frequenz zu wählen. Dem entgegen steht das Auflösungsvermögen, da dieses proportional zur Frequenz ist. Ein Frequenzbereich zwischen 100 – 300 kHz ($\lambda_{Luft} = 3,83 - 1,27mm$)stellt einen guten Kompromiss dar. Stellvertretend für diesen Frequenzbereich wurden Keramiken mit den Frequenzen 100, 200 und 300 kHz ausgewählt. Bei den Keramiken handelt es sich um PZT-Keramiken der Firma "PI Ceramic"(Lederhose, Deutschland), welche als Radialschwinger ausgeführt sind. Die Verwendung von Radialschwingern ergibt sich aus den für das spätere Wandlerdesign günstigen Abmessungen. Liste der Eigenschaften wird in Tabelle 2.1 dargestellt.

Die Elektretfolie (Emfit LTD, Vaajakoski, Finnland) wurde stellvertretend für ein nicht-keramisches piezoelektrisches Material ausgewählt und untersucht. Die

Tabelle 2.1.: **Liste der Keramiken**

Hersteller	Bezeichnung	Material	Resonanzfreq.	Abmess. d x h
PI	disc c151 o20 t2 wAg	PIC 151	100 kHz	20 x 2 mm
PI	disc c255 o10 t2 eAg	PIC 255	200 kHz	10 x 2 mm
PI	disc c255 o6 t2 eAg	PIC 255	300 kHz	6,6 x 2 mm
Ceramtec	Standardscheibe	Sonox P5	200 kHz	10 x 1 mm

Tabelle 2.2.: **physikalische Eigenschaften der Elektretfolie** [7]

Parameter	Wert
Dichte ρ $[kg/m^3]$	330
Koppelfaktor k_{33}	0,06
Schallgeschwindigkeit $[m/s]$	85
akust. Impedanz $[MRayl]$	0,028

Folie besteht aus mehreren Polyolefin-Lagen, die durch Einbringung von kleinen Partikeln bei der Mischung des Materials, während der biaxialen Orientierung kleine linsenförmige Kavitäten bilden. Durch Gasinjektion wird die Folie extrudiert, so dass sie eine Dicke von ca. 65 - 70 μm erreicht. Aufgrund des hohen Gasanteils hat die Folie eine sehr geringe Impedanz und könnte sich daher ohne eine akustische Anpassung als Luftschallwandler eignen (Vergl. Tabelle 2.2).

Als Backingmaterial diente ein mit Wolfram gemischtes Epoxid, in Form von Specifix-40 (Struers GmbH, Willich, Deutschland). Je nach Mischungsverhältnis kann die Impedanz des Backingmaterials eingestellt werden. Da es bis zu 12 Stunden dauert bis es aushärtet, setzt sich das Wolframpulver teilweise ab. Alternative, schnell aushärtende Epoxide haben den Nachteil, dass sie sich stark zusammenziehen und dabei hohe Temperaturen erzeugen. Dies würde zu einer Vorspannung der Keramik führen, welche die Empfindlichkeit der Keramik beeinträchtigt. Durch den Ablagerungsprozess des Wolframpulvers entsteht ein Gradient, welcher erst eine gute Einkopplung der Welle ermöglicht und danach durch eine höhere Dämpfung im reinen Epoxid starke Reflektionen auslöscht. Was die gewünschten Anforderungen, der Vermeidung von starken Reflektionen, an das Backing erfüllt. Abbildung 2.1 verdeutlicht nochmals den Effekt des Absetzens

Abbildung 2.1.: **Epoxid-Wolfram-Testkörper**

an einem extremen Beispiel (Verhältnis 1:1). Das finale Backing enthielt ein Mischungsmassenverhältnis von 1:2 (Epoxid : Wolfram).

Den Abschluss des Aufbaus der Schallwandler bildeten die Anpassschichten. Wie bereits aus Abschnitt 1.3 bekannt, unterliegen diese speziellen Anforderungen (Dicke, Impedanz). Der entscheidende Kennwert ist die akustische Impedanz der Anpassschicht und zu gleich die größte Herausforderung bei der Auswahl geeigneter Materialien. Die akustischen Impedanz der Anpassschichten für Luft ist deutlich geringer als die Impedanz der meisten Festkörper, weshalb zumeist Schäume verwendet werden. Stellvertretend hierfür wurde ein organischer Schaum getestet, welcher in Abbildung 2.3 zu sehen ist. Es handelt sich um einen geschlossen-porigen duroplastischer Hartschaum auf Basis von Pflanzenöl. Zur Herstellung dient ein Zweikomponentensystem aus epoxidiertem Leinöl und einem Anhydridvernetzer.

Ein weitere Ansatz wurde in Form von Gradientenschichten aus der Optik übernommen. Zu diesem Zweck wurden Gitterstrukturen, mit einer Gitterkonstante von $G = 1\ mm$, in Epoxidblöcke gesägt. Hierzu diente eine Drahtsäge vom Typ Weller 6234 (Weller Tools GmbH, Besigheim, Deutschland). Die Gitterkonstante lag somit deutlich unter der Wellenlänge von ca. 2 cm in Epoxid bei einer Frequenz von 100 kHz. Auch die Wellenlänge in Luft ist mit einem Faktor von 3 größer als die Gitterkonstante G. In der Optik gilt für die Ausbreitung der Welle am Gitter, dass bei einer Gitterkonstanten kleiner der Wellenlänge der einfallenden Welle, sich nur wenige Beugungsordnungen sowohl in Transmission als auch in Reflektion ausbreiten können. Ist $\lambda \ll G$ so kann sich nur die 0. Beugungsordnung ausbreiten, wodurch die einfallende Welle wie durch eine planare Grenzfläche tritt. Daraus ergibt sich, dass das Gebiet als homogen betrachtet und mit einer effektiven Brechzahl beschrieben werden kann[9]. Zusätzlich wurde Wolfram in verschiedenen Konzentrationen (K1 2:1, K2 1:1, Epo:W) in die Schichten eingemischt um die bereits beschriebene Ausbildung eines Gradienten durch absetzen des Wolframs zu erreichen. Dies soll eine bessere Ankopplung der

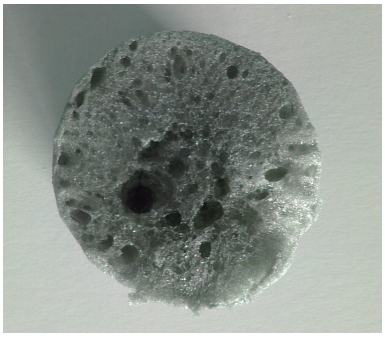


Abbildung 2.2.: **Montageschaumkörper**

Abbildung 2.3.: **duroplastischer Hartschaum auf Pflanzenölbasis**

Anpassschicht an die Keramik bewirken. In Abbildung 2.4 werden die verschiedenen Epoxidblöcke vor ihrer Bearbeitung dargestellt und in Abbildung 2.5 nach dem Sägen des Rasters.

Ein weiterer Ansatz ist Montageschaum auf Polyurethan-Basis, welcher ebenfalls geschlossenzellig aufschäumt. Der hohe Luftanteil im Montageschaum (siehe Abb. 2.2) lässt auf eine geringe Impedanz schließen, so dass sich dieses Material als akustische Anpassschicht eignen könnte. Zur Herstellung der Montageschaumprobekörper, wurde dieser in ein Kunststoffrohr appliziert und nach dem Aushärten aus diesem ausgelöst. Die erhaltenen Körper wiesen im mittleren Teil eine annähernd homogene Schicht auf, welche zu weiteren Untersuchungen präpariert wurde. Aus den Materialeigenschaften der bereits als Aktor erwähnten Elektretfolie lässt sich ableiten, dass eine $\frac{\lambda}{4}$-Schicht eine Dicke von ca. 70 μm bei einer Frequenz von 300 kHz haben müsste. In diesem Falle könnte man die Elektretfolie direkt als Anpassschicht verwenden, da Ihre Impedanz bei 0,028 MRayl (Vgl. Tabelle 2.2) liegt und somit die Anforderungen für die Ankopplung an Luft erfüllt.

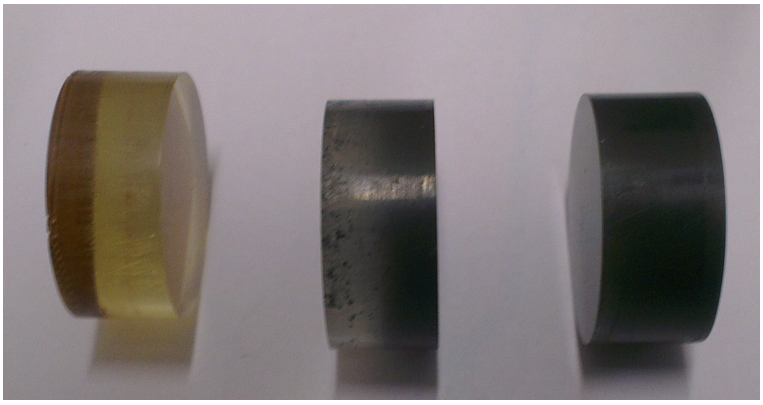


Abbildung 2.4.: **Epoxidblöcke ohne Wolfram, mit geringer Wolframkonzentration und mit hoher Wolframkonzentration (v.l.n.r.)**

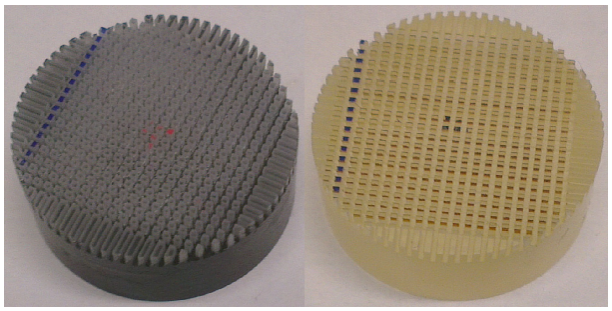


Abbildung 2.5.: **Epoxidblöcke mit gesägtem Raster (l: ohne Wolfram, r: wenig Wolfram)**

2.2. Scanner

Bei dem verwendeten Messplatz handelt es sich um einen Zweiachsenmessplatz (Isel Germany AG, Sinsheim, Deutschland) mit einem maximalen Scanbereich von 400 x 400 mm. Die Abbildung 2.6 zeigt den verwendeten Messaufbau. Wie in der Abbildung zu erkennen, besteht der Scanner aus 4 Achsen, von denen jeweils 2 parallel angeordnet sind. Die parallelen Achsen arbeiten im Gantry-Modus, so das eine Achse als Master und die korrespondierende als Slave definiert wird. Die Slave-Achse folgt nun automatisch den Bewegungen der Master-Achse. Bei den Antrieben der Achsen handelt es sich um Motoren vom Typ EC60 (Isel Germany AG, Sinsheim, Deutschland), welche durch Controller des Typs iMD20 (Isel Germany AG, Sinsheim, Deutschland) gesteuert werden. Die Kommunikation mit dem PC erfolgt über eine CAN-Bus-Schnittstelle. Der dargestellte

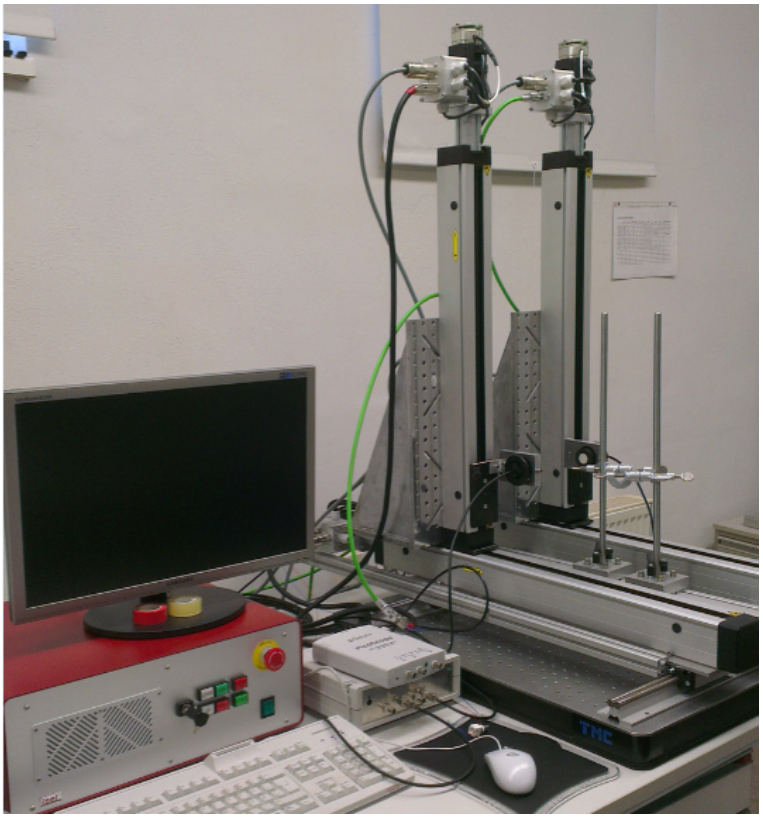


Abbildung 2.6.: **AirUS-Scanner**

Messaufbau verfügte nicht über ein Triggerinterface zur positionsabhängigen Datenaufnahme. Um einen positionsabhängigen Trigger zu ermöglichen, wurde der Messplatz um einen Inkrementzähler zu erweitern, welcher über einen seriellen Anschluss gesteuert werden kann. Mithilfe des Inkrementalzählers ist es möglich relative und äquidistante Triggerpositionen zu bestimmen und ein Triggersignal auszulösen. Dieses Triggersignal steuert sowohl die Datenakquise als auch die elektrische Anregung der Ultraschallwandler. Der elektrischen Anregung diente für erste Untersuchungen das kommerzielle Airmar-Developmentkit-T1 (Airmar Technology Corporation, Massachusetts, USA), welches später durch eine Eigenentwicklung ersetzt werden soll, da die maximale Ausgangsspannung von 300 V_{pp} des Airmar-Kits für die geplanten Messzwecke zu gering ist. Des Weiteren verfügt das Airmar-Kit über eine zu grobe Frequenzeinstellung, so dass die Ultraschallwandler nicht in jedem Fall in Resonanz betrieben werden können. Bei der geplanten Entwicklung soll ein Frequenzgenerator zum Einsatz kommen, mit dem eine exakte Frequenzeinstellung möglich wird. Der bereits auf dem Airmar-Kit

enthaltene Empfangsverstärker wurde hingegen übernommen. Es handelt sich um eine OPV-Schaltung (Kaskade) mit deren Hilfe die Eingangssignale wahlweise um die Faktoren 10, 100, 1000 verstärkt werden. Als ADC dient ein USB-Oszilloskop vom Typ PicoScope 3206 mit einer maximalen Samplerate von 20 MS/s, wodurch eine Überabtastung für den geforderten Frequenzbereich von 100 - 300 kHz gewährleistet wird. Bei der Datenakquise muss das PicoScope im Polling-Modus abgefragt werden, was in Matlab (MathWorks Inc.) zu einer erhöhten Prozesslast der Software führen würde. Aus diesem Grund wurde ein von MathWorks bereitgestellter Softwareadapter (C++) verwendet, welcher den Anforderungen entsprechend modifiziert wurde. Er übernimmt die Kommunikation zwischen der ADC und Matlab, was eine Event-gesteuerte Datenakquise unter Verwendung von Matlab ermöglicht. Zur Steuerung des gesamten Systems dient eine unter Matlab geschrieben Software, welche in Kapitel C näher beschrieben wird. Matlab eignet sich in diesem Falle besonders, da für die Datenanalyse auf ein breites Spektrum von Routinen zugegriffen werden kann.

2.3. Ultraschallwandlerentwicklung

Wie bereits in Abschnitt 1.3 dargestellt, besteht ein Ultraschallwandler aus mehreren Komponenten. Die Basis jedes Ultraschallwandlers bildet das aktive Element, beispielsweise in Form einer piezoelektrischen Keramik. Den ersten Schritt der Entwicklung bildete die Untersuchung des Frequenzganges der piezoelektr. Elemente. Hierzu diente ein Impedanz-Analysator, welcher mittels eines Wechselspannungssignals mit einer steigenden Frequenz über einen Frequenzbereich von (20 kHz - 10 MHz) den frequenzabhängigen Leitwert der Elemente bestimmt. Die Resonanzfrequenzen werden anhand einer Überhöhung des Leitwertes ersichtlich. Abbildung 2.7 zeigt ein Beispiel für eine solche Messung.

Der Graph in Abbildung 2.7 zeigt in äquidistanten Abständen Resonanzen (harmonische Oberwellen), die mit den Abmaßen der Keramik zusammenhängen. Während die ersten Resonanzen unter 1 MHz sich auf den Radius der Keramik beziehen (Radialschwingungen), handelt es sich bei den höheren Resonanzfrequenzen um Dickenschwingungen. Für die elektrische Analyse der Keramik wird nun eine geeignete Resonanzstelle ausgewählt und der zu messende Frequenzbereich auf die direkte Umgebung eingeschränkt. Diese Einschränkung ist nötig, da

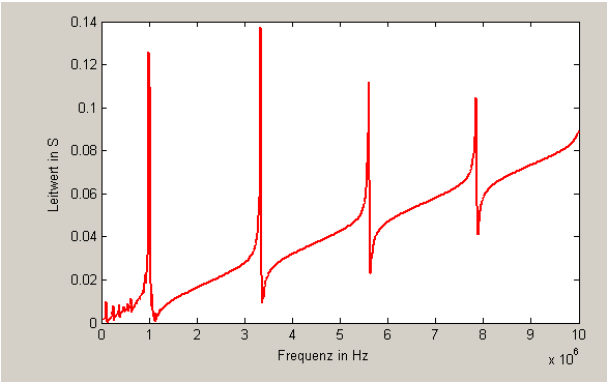


Abbildung 2.7.: **Frequenzgang einer 100 kHz Keramik mit Resonanzen der Radial-moden unter 1 Mhz und Resonanzen der Dickenmoden über 1 MHz**

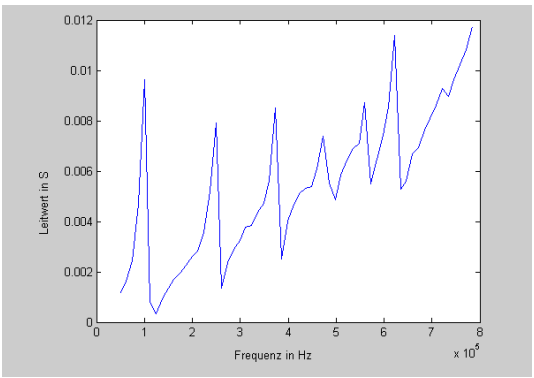


Abbildung 2.8.: **Frequenzgang einer 100 kHz Keramik begrenzt auf den Frequenzbereich der Radialmoden**

dass elektrische Ersatzschaltbild der Keramik nur für den Resonanzfall Gültigkeit besitzt und für eine elektrische Anpassung verwendbare Werte liefert. Die Vergrößerung auf den Frequenzbereich der Radialmoden wird in Abbildung 2.8 dargestellt. Aus diesem wird nun die größte Resonanzüberhöhung ausgewählt, wie oben beschrieben der Frequenzbereich eingeschränkt und Anhand des Beispiels in Abbildung 2.9 veranschaulicht.

Nun kann das Ersatzschaltbild aus Abschnitt 1.3 angepasst werden. Die errechneten Werte für das Ersatzschaltbild liefern die grüne Kurve in Abbildung 2.9, womit die Keramik nun ausreichend charakterisiert ist. Diese Messungen wurden für alle Keramiken durchgeführt, die im Vorfeld nach Größe sortiert und nummeriert wurden, so dass anschließend eine Tabelle (s. Tab. 2.3) mit den Resonanzfrequenzen aufgestellt werden konnte. Da sich die Resonanzfrequenzen

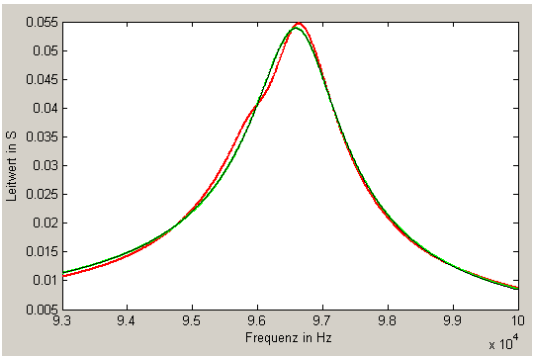


Abbildung 2.9.: **Frequenzgang einer PI Keramik mit Resonanz bei 96.623 kHZ(rot: gemessene Kurve; grün: gefittete Kurve)**

nach dem Vergießen der Keramiken und dem Aufbringen der Anpassschichten ändern, dienen diese Messwerte lediglich der Orientierung.

Begründen lässt sich diese Frequenzverschiebung mit dem mechanischen Ersatzschaltbild eines Ultraschallwandlers, da sich z.B. durch Aufbringen einer Anpassschicht die bewegte Masse ändert. Eine Änderung der externen Beschaltung durch einen Sendeverstärker kann ebenfalls zu einer Änderung der Resonanzfrequenz beitragen. Diese Umstände führten dazu, dass auf eine elektrische Anpassung in Form einer gewickelten Spule während der Untersuchungsphase der Anpassschichten weitestgehend verzichtet wurde. Sollte sich der Induktionswert durch die einzelnen Bearbeitungsschritte so stark ändern, dass sich diese nicht mehr durch den Spulenkern kompensieren lässt, würde dies eine erneute Anpassung der Spule nach sich ziehen.

Im weiteren Verlauf wurden zwei Gehäuseformen verwendet. Für die Keramiken mit einem Durchmesser von 20 mm diente ein PVC-Rohr als Gehäuse, in dem die Keramik durch einen Schaum gehalten wird, welcher einen passenden Innendurchmesser aufwies. Da der Schaum seitlich eingeschnitten war und an dieser Stelle das Vergußmaterial herausläuft, musste er an dieser Stelle verklebt werden. Der Schaum soll zugleich die Funktion des seitlichen Schwingungsdämpfers übernehmen. Abbildung 2.10 zeigt den Ultraschallwandler unvergossen und ohne Anpassschicht, mit erkennbarer Verklebung am Rand des Schaumes. Für die anderen Keramiken diente ein Twinax-Stecker als Gehäuse. Die Keramik wurde hierzu in der oberen Schraubhülse vergossen. Abbildung 2.11 zeigt den fertigen Schallwandler mit einer 300 kHz Keramik. Da die Keramik kleiner ist als die Aussparung in der Hülse muss auch hier das Herauslaufen des Vergußmittels

Tabelle 2.3.: **Resonanzfrequenzen der Keramiken vgl. Tabelle 2.1**

Nummer	Resonanzfrequenz [kHz]
1	96,623
2	96,981
3	96,640
4	96,640
5	96,561
6	195,850
7	194,975
8	194,950
9	195,0
10	195,450
11	314,737
12	314,887
13	314,887
14	315,075
15	314,513

während der Aushärtungsphase verhindert werden. Dazu wird die Keramik mittels einer Kontaktierungsflüssigkeit auf Kohlenstoffbasis mit der Anpassschicht verklebt. Durch die gleichzeitige Verklebung der mit Gold beschichteten Anpassschicht wird die Vorderseite der Keramik mit dem Gehäuse elektrisch kontaktiert. Der elektrische Massekontakt wird somit über das Gehäuse hergestellt. Für die Untersuchung der Folien als Aktor wurde ein spezielles Gehäuse verwendet. Es handelt sich um einen gedrehten hohlen Kunststoffzylinder, welcher rückseitig mit einem Deckel verschlossen wird. An der Vorderseite befindet sich eine Schallöffnung, durch die die Schallwelle austreten kann. Die Folie wird im Inneren rückseitig durch eine Kupferplatte kontaktiert, welche mittels einer Feder auf die Folie gepresst wird. Die Kontaktierung auf der Vorderseite erfolgt mittels einer Lochscheibe. Aufgrund der Goldbeschichtung der Folie auf der Vorderseite ist diese flächig kontaktiert. Die Feder übernimmt die Zuleitung vom BNC-Stecker zur Kupferplatte, da diese auf dem Rand des BNC-Steckers im inneren des Gehäuses aufliegt. Hierdurch muss der Signalleiter an der Vorderseite der Folie angeschlossen werden. Der Ultraschallwandler wird im verschlossenen Zustand in Abbildung 2.12 gezeigt.

Im nachfolgenden Schritt wurde das Backing der Schallwandler gefertigt. In

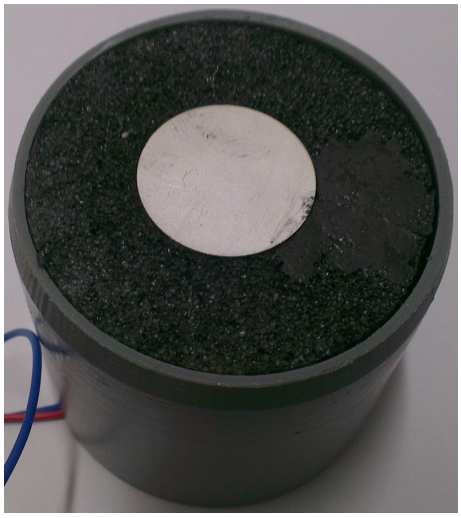


Abbildung 2.10.: **100 kHz Keramik in PVC-Rohr mit verklebtem seitlichen Schwingungsdämpfer**

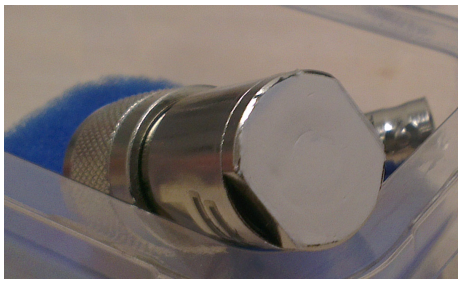


Abbildung 2.11.: **260 kHz Schallwandler mit Elektretfolie als Anpassschicht**

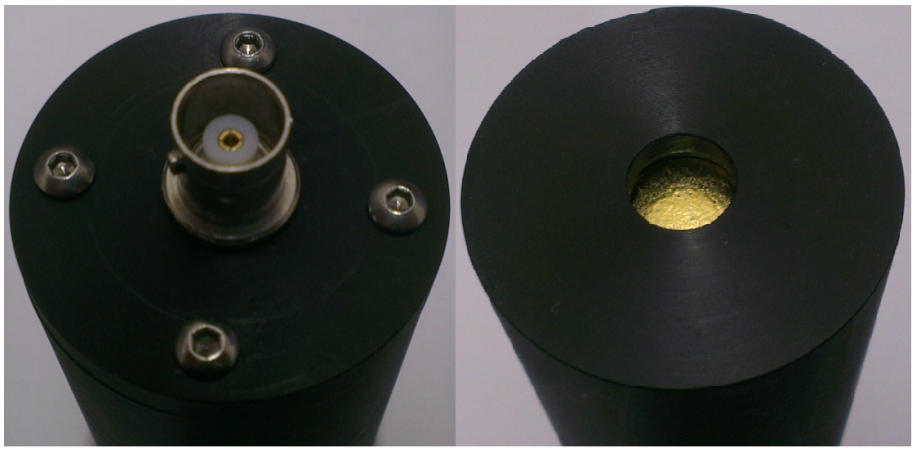


Abbildung 2.12.: **gedrehtes Gehäuse für Elektretfolie Rück- und Vorderansicht**

allen Fällen wurden die Keramiken mit dem Backingmaterial vergossen. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass keine zusätzliche Schicht zwischen Backing und Keramik in Form eines Klebers benötigt wird, um eine gute Ankopplung zu ermöglichen. Des Weiteren vereinfacht sich das Design des Schallwandlers. Bei Verzicht einer Klebeschicht müsste eine Pressung mittels einer Feder realisiert werden. Als Vergußmaterial diente Specifix. Beim Anmischen wurde Wolframpulver (Wolfram Bergbau und Hütten AG, Salzburg, Deutschland) hinzugegeben. Dadurch wurde eine Erhöhung der akustischen Impedanz erreicht. Durch das bereits in Abschnitt 2.1 erwähnte absinken des Wolframs während der Aushärtungsphase entsteht ein Gradient im Backing. Dies hat den Vorteil einer hohen akustischen Impedanz in der Nähe der Keramik, was zu einem guten Energieabfluss in das Backingmaterial führt. Einzig der Schallwandler mit Elektretfolie als Aktor besitzt kein Backing in dieser Form.

Im letzten Schritt wurden die Anpassschichten aufgebracht. Im Fall der Gradientenschichten musste darauf geachtet werden, dass die Aufbringung reversible sein muss. Für die Untersuchung verschiedener Dicken der Anpassschichten mussten diese nachträglich in definierten Schritten abgedünnt werden. Um jedoch ein erneutes Sägen der Gradientenschichten zu vermeiden, sollte die Rückseite der Anpassschichten abgedünnt werden. Um die Epoxidkörper wieder lösen zu können, kommen verschiedene Szenarien in Frage. Zum einen könnte das Aufbringen mittels acetonlöslichem Epoxid geschehen, welches in einer dünnen Schicht aufgetragen wird. Das Verkleben würde in diesem Fall nur wenige Minuten, aber das Lösen mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Verwendung von Sekundenkleber, welcher sich in einer Seifenlauge im temperierten Ultraschallbecken schnell löst. Bei einer Prüfung in einer Seifenlaugenlösung dauerte es ca. 10 min bis sich die Anpassschicht von der Keramik löste. Der Kleber löste sich dabei Rückstandslos von der Keramik. Diese Variante stellte sich als schnellste und effektivste Lösung für die reversible Anbringung der Epoxidanpassschichten dar. Beim der Untersuchung der Schallwandler mit dem Bio-Schaum konnte auf die reversible Verbindung verzichtet werden, da das Abschleifen des Bio-Schaums sich auch nach dem Aufbringen realisieren ließ. Sowohl beim Bio-Schaum, als auch bei den Epoxidblöcken, wurde das Schallfeld der Ultraschallwandler mit 3 Dicken der Anpassschichten gemessen. Die Messungen dienten zur Verifizierung der Zieldicken, mit denen dann identische Schallwand-

lerpaare aufzubauen waren.

Für die Vermessung der Schallfelder wurde im ersten Schritt ein Metallstab mit einem Durchmesser von 10 mm als Reflektor verwendet. Dieser wurde senkrecht zur Messrichtung im Scanfeld platziert (vgl. Abb 2.14). In einem späteren Schritt wurden die Schallfelder mittels eines Empfängers vermessen. Hierzu wurde eine Keramik mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Resonanzfrequenz von 330 kHz auf einen Metallstab aufgeklebt und kontaktiert. Die gemessenen Schallwandler mit der höchsten Frequenz lagen somit ca. 70 kHz unter der Resonanzfrequenz des Empfängers, so dass ein Betrieb des Empfängers in Resonanz ausgeschlossen werden konnte. Der Empfänger ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Einige Ultraschallwandler konnten allerdings nicht mit diesem Empfänger getestet werden, da dass Signal-Rausch-Verhältnis (0 dB) zu schwach war. Daher diente auch der Referenzwandler für einige Messungen als Empfänger. Hierbei handelt es sich um einen 125 kHz Schallwandler vom Typ SONOSCALE (SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle, Deutschland). Alle Messung die mittels eines Empfängers aufgezeichnet wurden nachfolgend mit „Transmission Empfänger “gekennzeichnet.

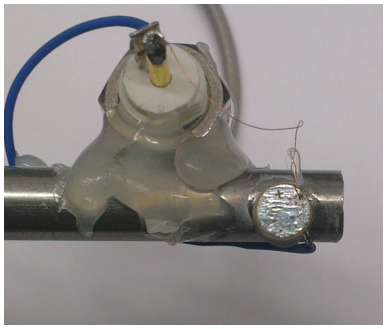


Abbildung 2.13.: **gebaute Empfängersonde für die Vermessung der Schallfelder**

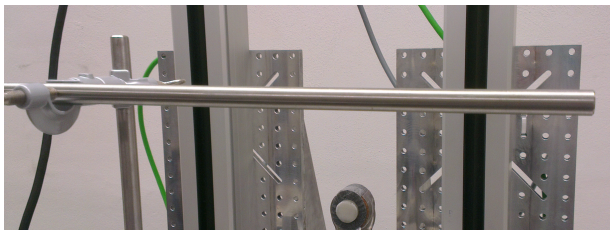


Abbildung 2.14.: **Messaufbau mit eingebauter Metallstab als Reflektor**

Tabelle 2.4.: **Liste der Kurzbezeichnungen der Schallwandler**

Kurzbezeichnung	Bedeutung
96kRef	Schallwandler f=96 kHz, Ohne Anpassschicht
96kEpo104K1R	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=10,4 mm, Wolframkonzentration 1, Raster
96kEpo83K1R	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=8,3 mm, Wolframkonzentration 1, Raster
96kEpo55K1R	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=5,5 mm, Wolframkonzentration 1, Raster
96kEpo55OWOR	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=5,5 mm, ohne Raster
96kEpo55K2R	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=5,5 mm, Wolframkonzentration 2, Raster
96kEpo104OWR	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=10,4 mm, ohne Wolfram, Raster
96kEpo83OWR	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=8,3 mm, ohne Wolfram, Raster
96kEpo55OWR	Schallwandler f=96 kHz, Epoxid d=5,5 mm, ohne Wolfram, Raster
96kBio2	Schalwandler f=96 kHz, Bio-Schaum 2 mm
Emfit250	Schallwandler f=250 kHz, Aktor Elektretfolie
260kEmf1	Schallwandler 1 f=260 kHz, Anpasssung Elektretfolie
260kEmf2	Schallwandler 2 f=260 kHz, Anpasssung Elektretfolie
330kSonde	Sonde 330 kHz ohne Anpassung (vgl. Abb. 2.13)

Zur späteren Identifizierung der Schallwandler wurden den verschiedenen Versuchsschallwandlern Kurzbezeichnungen zugeordnet, welche der Tabelle entnommen werden können.

2.4. Verwendete Proben

Zur Überprüfung der Tauglichkeit der Schallwandler für den geplanten Einsatz standen verschiedene Proben zur Verfügung. Probe 1 ist in Abbildung 2.15 zu sehen. Hierbei handelt es sich um ein vierschichtiges Laminat, in das Teflonfolien eingebracht wurden. Die Teflonfolien führen zu einer definierten Delamination. Wie man der Abbildung 2.15 entnehmen kann sind drei verschiedene Größen von Folien in die Probe eingelassen und ermöglichen erste Auflösungsuntersuchungen. Die gleichen Fehlerstrukturen sind in unterschiedlichen Tiefen eingebracht. Hieraus soll untersucht werden ob sich ein Unterschied erkennen lässt, welcher Rückschlüsse auf die axiale Defektdetektion zulässt. Probe 2 ist ein Schaumkern, der von einer Seite mit einer Laminat-Deckschicht versehen ist. Diese Probe ist zum einen wesentlich Dicker als Probe 1, zum anderen liegt hier ein anderer Defekt zugrunde. Wie man in Abbildung 2.16 erkennen kann, befindet sich in der Mitte der Probe ein Einschuss, welcher zu einer Verformung des Laminats sowie zu einer Zerstörung der Wabenstruktur führt. Dieser hinterlässt einen sichtbaren Defekt, der jedoch optisch kleiner erscheint als seine tatsächliche Größe im Inneren.

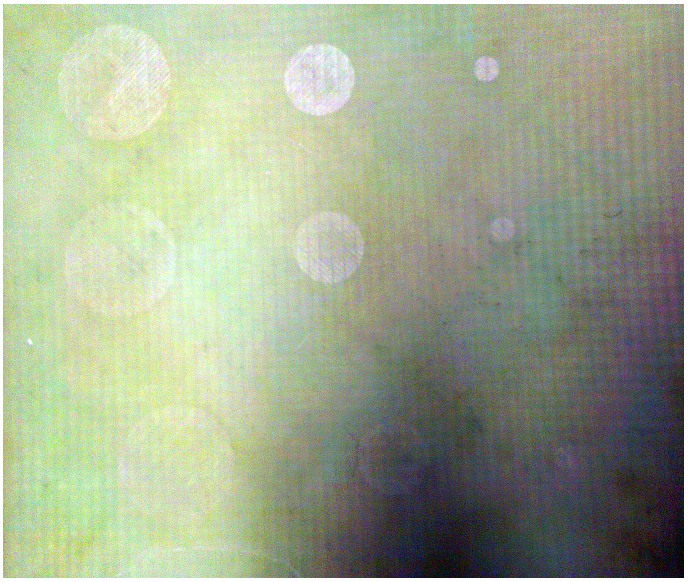


Abbildung 2.15.: **Probe aus 4 Laminatschichten mit eingebrachten Teflonfolien zur Erzeugung von Delaminationen**

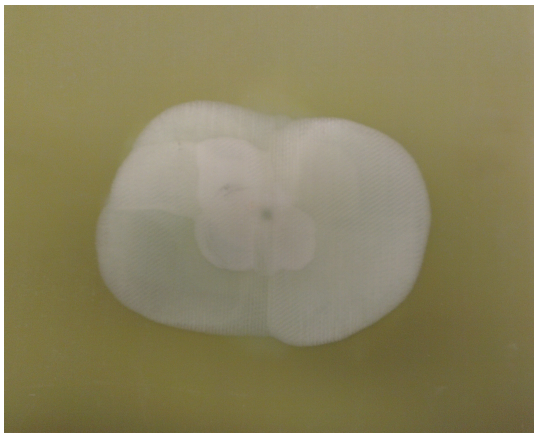


Abbildung 2.16.: **Probe aus Laminatdeckschichten mit Wabenkern und Einschussdefekt**

3. Ergebnisse

3.1. Ultraschallwandler

Zur Charakterisierung der Ultraschallwandler wurden die Schallfelder vermessen. Hierzu wurden die Schallfelder mit einem Detektor aufgenommen. Einzig das als Referenz der Bewertung dienende Schallfeld des kommerziellen Schallwandlers mit einer Frequenz von 125 kHz und einer Anpassung für Luft wurde im Impuls-Echo-Verfahren gemessen. Abbildung 3.1 zeigt das so aufgenommene Schallfeld des Referenzwandlers.

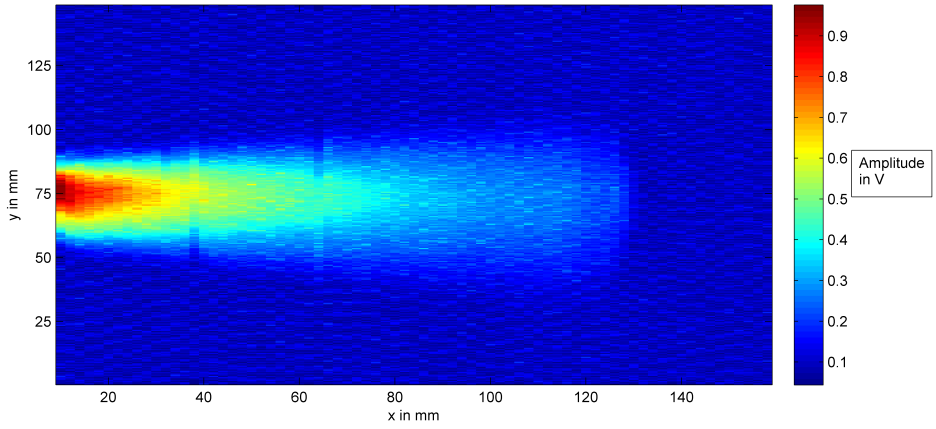


Abbildung 3.1.: **Schallfeld des kommerziellen 125 kHz Schallwandlers gemessen mit Reflektor (Metallstab)**

Die Untersuchung der Ultraschallwandler mit der Elektretfolie als Anpassschicht(260kEmf1, 260kEmf2) führt in Impuls-Echo Messung mit dem Metallstab als Reflektor zu keinem verwertbaren Ergebnis. Durch ein extrem langes Nachschwingen des Schallwandlers war es nicht möglich das Schallfeld auf diese Weise zu vermessen. Das Echo war durch eine Überlagerung mit dem Sendesignal zu erkennen, eine Trennung war allerdings nicht möglich. Daher wurde der in Ab-

schnitt 1.4 beschriebene Empfänger 330kSonde zur Vermessung der Schallfelder verwendet. Um die Anpassung charakterisieren zu können, wurde das Schallfeld von Schallwandler 260kEmf1 ohne Anpassschicht aufgezeichnet, es war jedoch nicht möglich die gemessenen Amplituden trotz Empfänger klar vom Rauschen zu trennen. Daher wurde ein einzelner Messpunkt im Schallfeld aufgezeichnet. Hierzu wurde der Schallwandler so ausgerichtet, dass die gemessene Amplitude maximal wurde. Diese Messung diente dann zur Normierung der mit Anpassung gemessenen Schallfelder. Die in Transmission gemessenen Schallfelder der Ultraschallwandler mit akustischer Anpassung sind in den Abbildungen 3.2 und 3.3 zu sehen. In einer weiteren Messung wurde entsprechend der gemessenen Resonanzkurve eine Spule angefertigt. Diese diente der elektrischen Anpassung von Schallwandler 260kEmf2. Die anschließende Messung ergab das in Abbildung 3.4 gezeigte Schallfeld. Die Untersuchung des Schallwandlers Emfit250 ergab in ei-

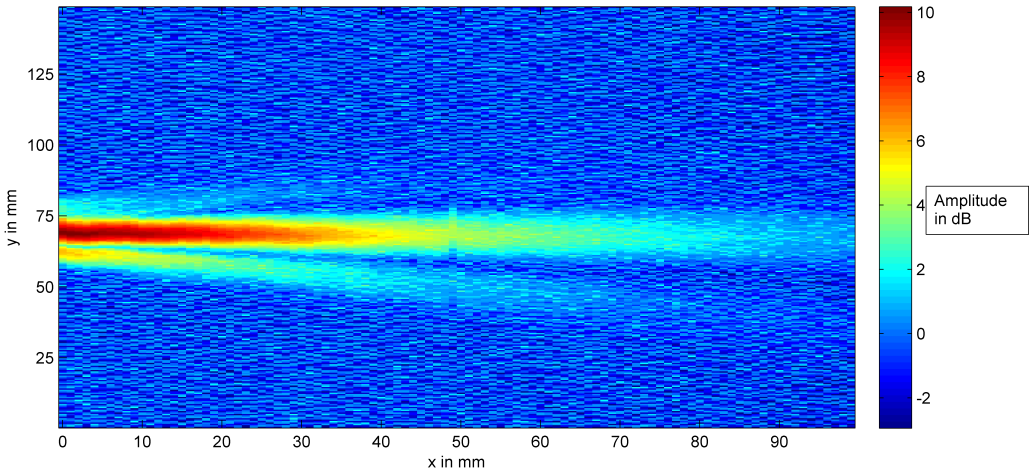


Abbildung 3.2.: **Schallfeld Schallwandler 260kEmf1 gemessen in Transmission mit 330kSonde**

ner ersten Messung das in Abbildung 3.5 gezeigte Schallfeld. Da das Schallfeld von Emfit250 mit dem selben Empfänger gemessen und der Schallwandler bei einer ähnlichen Frequenz ($f = 250\ kHz$) betrieben wurde wie die Schallwandler 260kEmf1 und 260kEmf2, wurde es auf die mit Schallwandler 260kEmf1 ohne Anpassung gemessene Amplitude normiert.

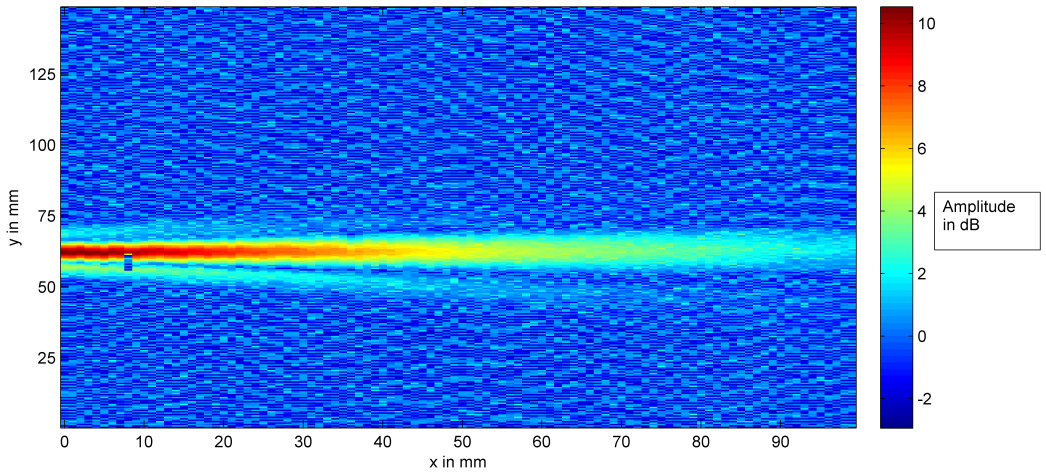


Abbildung 3.3.: **Schallfeld 260kEmf2 gemessen in Transmission mit 330kSonde**

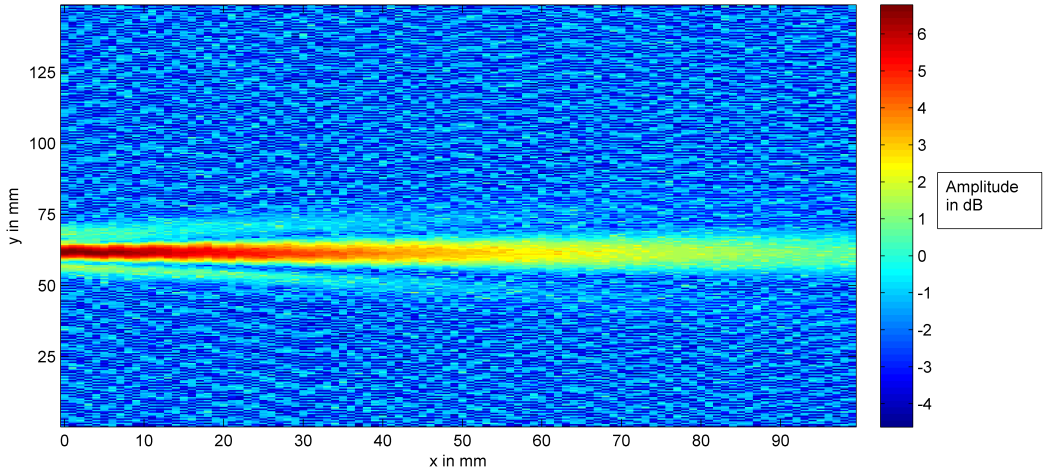


Abbildung 3.4.: **Schallfeld Schallwandler 260kEmf1 mit elektr. Anpassung gemessen in Transmission mit 330kSonde**

Die Analyse des Ultraschallwandlers Emfit250 zeigte ein Luftkissen zwischen Folie und Rückkontakt, so dass sie für eine Kontrollmessung angeklebt wurde (siehe Abb.). Für die Messungen von 96kBio2 wurde zunächst der Schallwandler ohne Anpassschicht gemessen. Die so gemessene Maximalamplitude dient als Referenzwert (s.Abb. 3.7) für die Charakterisierung. Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit des Bio-Schaums ergab $c_{Bio} = 680\ m/s$, so dass für eine $\frac{\lambda}{4}$–Schicht eine Dicke von $d \approx 2\ mm$ benötigt wird. Zu Vergleichszwecken wurden noch die

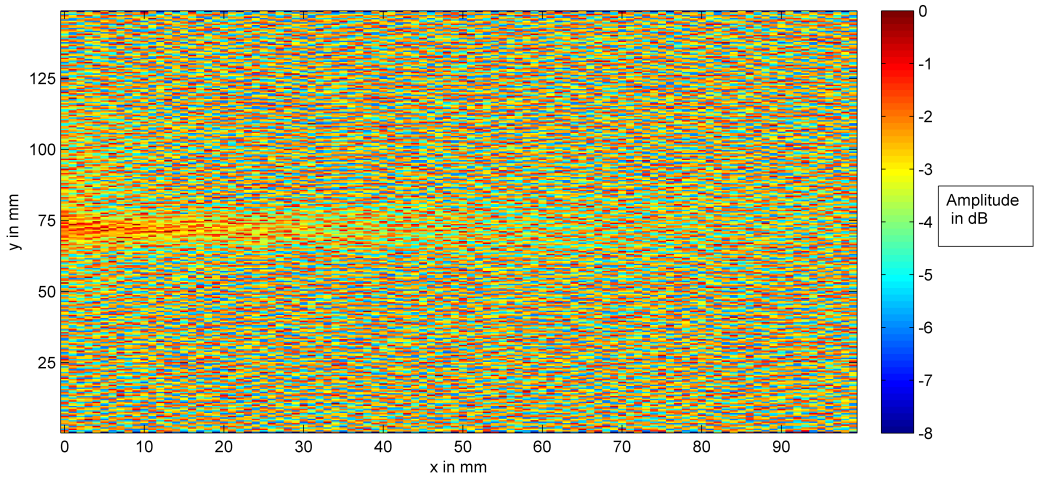


Abbildung 3.5.: **Schallfeld Emfit250 in Transmission mit 330kSonde**

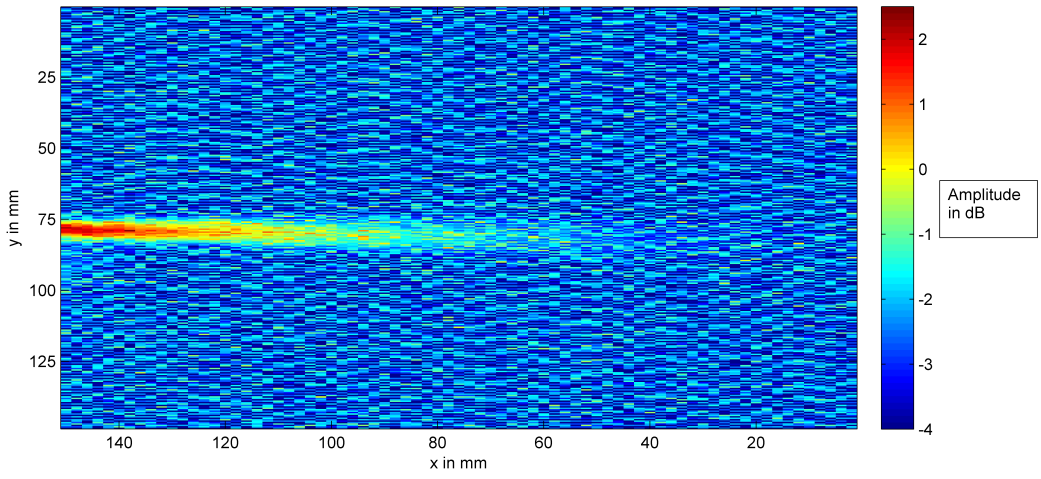


Abbildung 3.6.: **Schallfeld Emfit250 verklebt in Transmission mit 330kSonde**

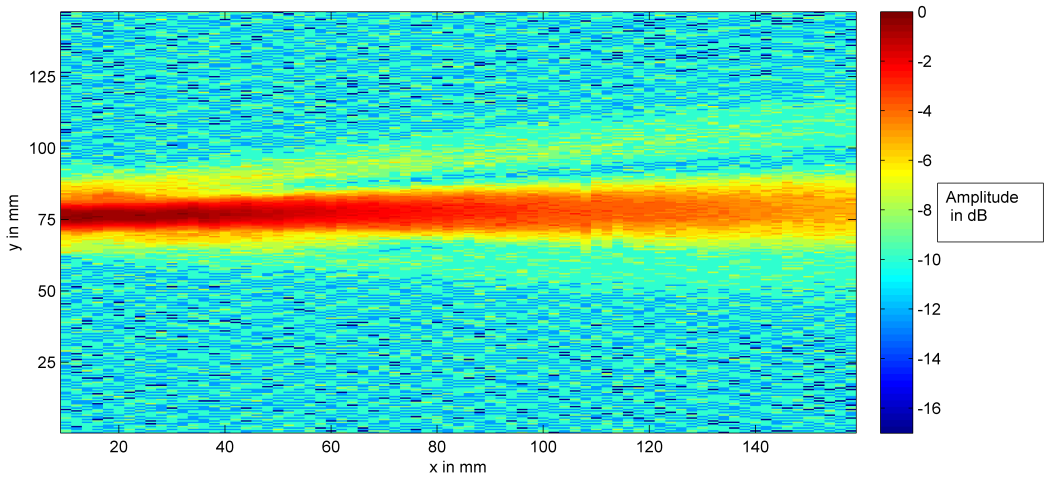


Abbildung 3.7.: **Schallfeld 96kRef (Referenz) in Transmission mit Referenzwandler**

Dicken $d = 5\ mm$ und $d = 10\ mm$ gemessen werden. Diese Dicken führten allerdings nicht zu einem verwertbaren Ergebnis, so dass in Abbildung 3.8 lediglich das Schallfeld des Ultraschallwandlers 96kBio2 mit der berechneten Zieldicke des Bio-Schaumes von 2 mm zeigt.

Wie bei den Untersuchungen von 96kBio2, wurde auch für die Untersuchung der Epoxidschichten die Schallfelder auf die Messung des Schallwandlers 96kRef referenziert. Im ersten Schritt wurden die Epoxidschicht mit der Wolframkonzentration K2 gemessen. Anschließend wurde mittels einer Drahtsäge ein 3 mm tiefes Raster in die Epoxidvorlaufstrecke gesägt. Die so entstandene Anpassschicht wurde in den Dicken $d = 11\ mm$, $d = 8,3\ mm$ und $d = 5,5\ mm$ gemessen. Die experimentell ermittelte Schallgeschwindigkeit von Specifix liegt bei $c_{Spezi} = 2300\ m/s$. Somit ergab sich die errechnete Zieldicke von 5,5 mm. Abbildung 3.9 zeigt das Schallfeld des Schallwandlers 96kEpo55K2R.

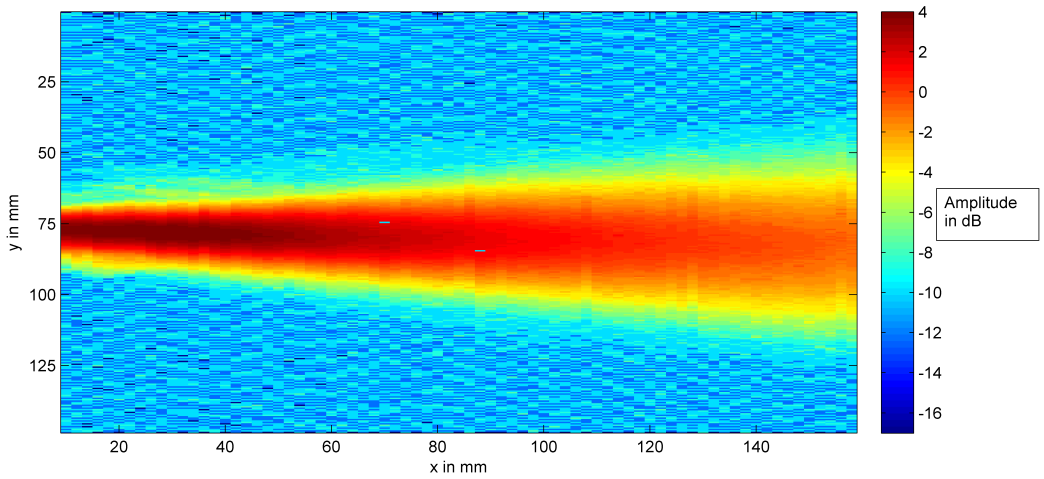


Abbildung 3.8.: **Schallfeld Schallwandler 96kBio2 in Transmission**

Zum Vergleich wurde zusätzlich ein reiner Epoxidblock der Dicke $d = 5,5\ mm$ als Anpassschicht verwendet. Das so gemessene Schallfeld des Ultraschallwandlers 96kEpo55OWOR ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

Im nächsten Schritt wurde eine Epoxidschicht mit der Wolframkonzentration K2 als Anpassschicht verwendet. Diese wurde in den Dicken $d = 10,4\ mm$, $d = 8,3\ mm$ und $d = 5,5\ mm$ präpariert. Die nachträglich gesägte Gitterstruktur hatte eine Tiefe von 2 mm. Die Abbildungen 3.11–3.13 zeigen die Schallfelder der Schallwandler 96kEpo104K1R, 96kEpo83K1R und 96kEpo55K1R.

Den Abschluss der Untersuchung von den verschiedenen Epoxidschichten mit gesägtem Gradienten bildet eine Epoxidschicht ohne Wolfram. In diese Schicht wurde ein 1.5 mm tiefes Raster gesägt. Wie bei den 2 Epoxidschichten mit Wolfram wurden auch hier 3 Dicken untersucht (10,4 mm, 8,3 mm, 5,5 mm). Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.14 – 3.15 zu sehen.

Bei den Untersuchungen mit Montageschaum zeigte sich nach Aufschneiden, der als annähernd homogen geltenden Bereiche, eine starke Varianz der Porengröße. Daher wurde der Schaum für einen Einsatz als unbrauchbar eingestuft. Die bereits in Abbildung 2.2 gezeigten Poren wiederholen sich im inneren des Körpers mehrfach in diesen Ausmaßen.

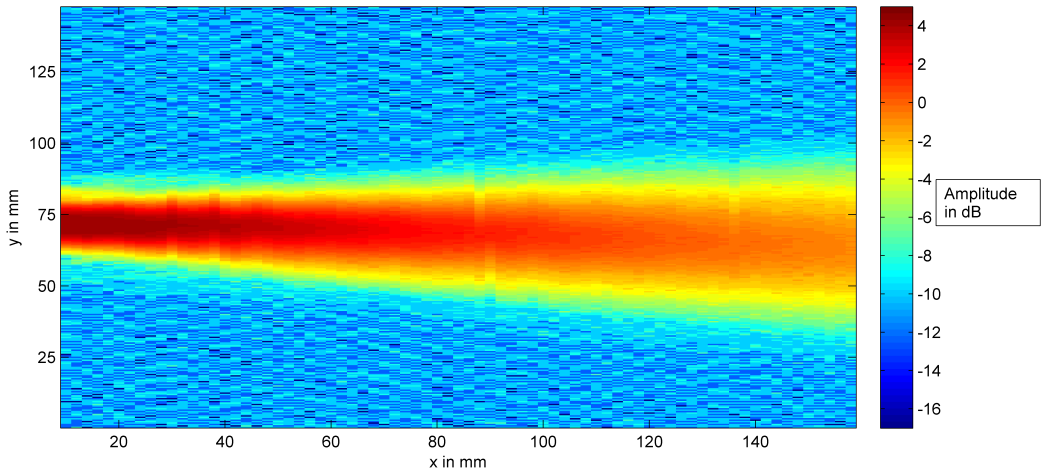


Abbildung 3.9.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo55K2R in Transmission Referenzwandler**

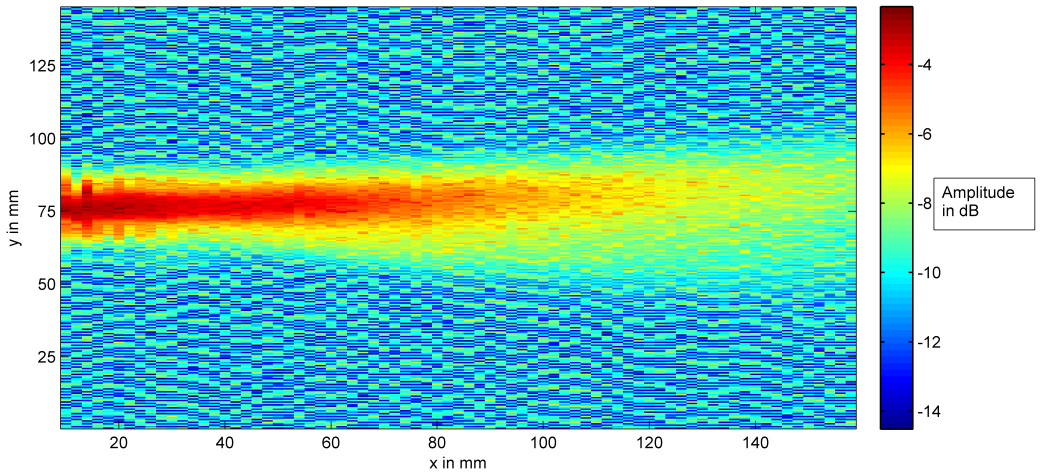


Abbildung 3.10.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo55OWOR in Transmission Referenzwandler**

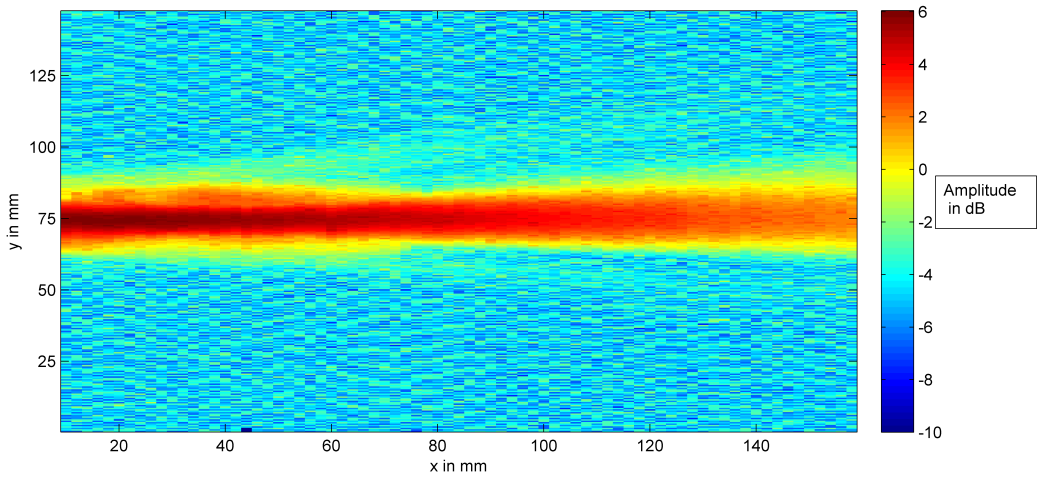


Abbildung 3.11.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo104K1R in Transmission Referenzwandler**

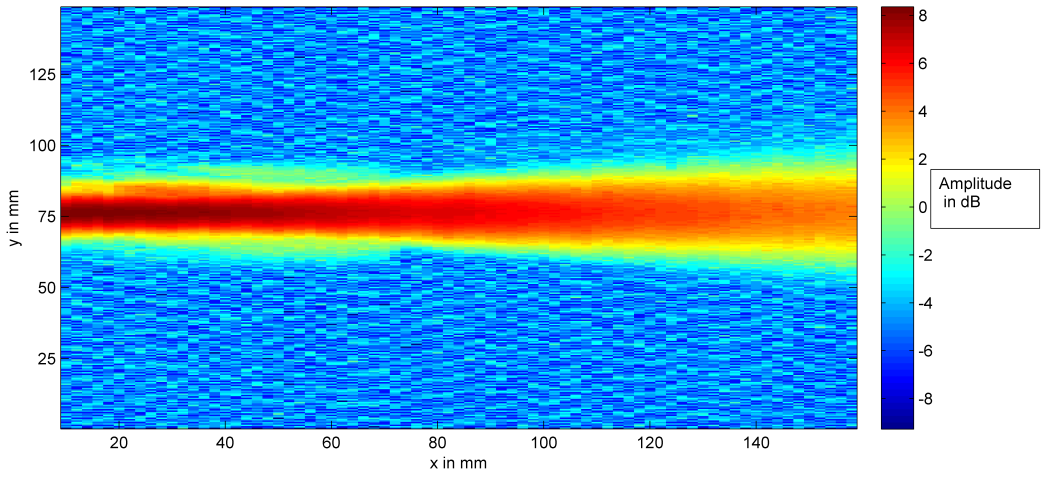


Abbildung 3.12.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo83K1R in Transmission Referenzwandler**

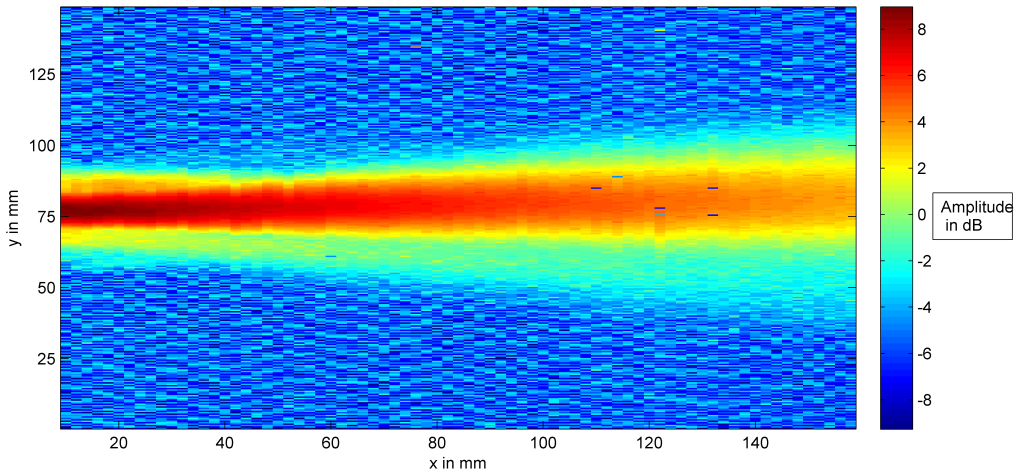


Abbildung 3.13.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo55K2R in Transmission Referenzwandler**

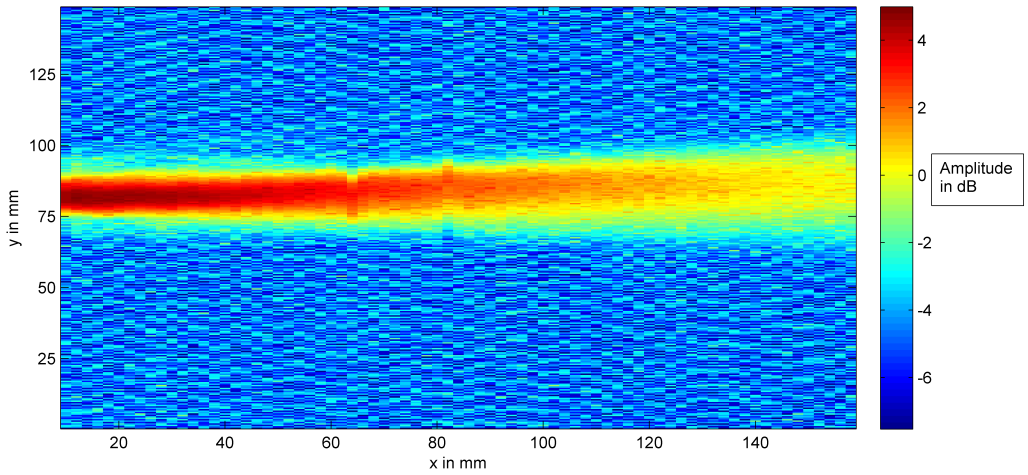


Abbildung 3.14.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo83OWR in Transmission Referenzwandler**

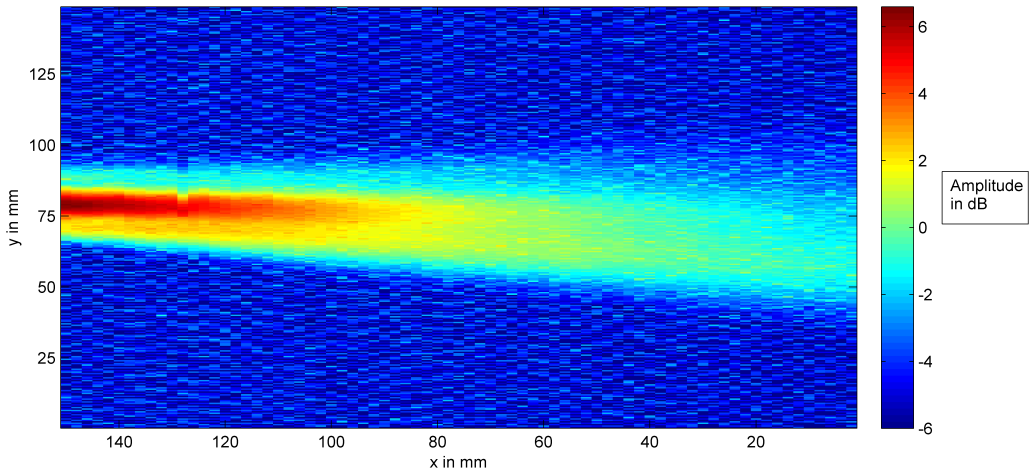


Abbildung 3.15.: **Schallfeld Schallwandler 96kEpo83OWR in Transmission Referenzwandler**

3.2. Gegenüberstellung der Ultraschallwandler

Die im vorhergehenden Abschnitt gezeigten Schallfelder zeigen eine deutlich Erhöhung der Amplitude durch die gewählten Anpassungen. In Abbildung 3.16 werden nochmals alle Ergebnisse grafisch dargestellt.

Die Ultraschallwandler 260kEmf1 und 260kEmf2 zeigen mit akustischer Anpassschicht eine Verstärkung von über 10 dB gegenüber der Referenzmessung ohne Anpassung.

Bei den Ultraschallwandlern mit den Epoxidschichten (96kEpo. . .) ist eine steigende Tendenz mit Annäherung an die Zieldicke zu verzeichnen. Die Epoxidschicht mit der Wolframkonzentration K1 zeigt hier die besten Ergebnisse mit einem Verstärkung von maximal ca. 9 dB gegenüber 6,8 dB ohne Wolfram und 4 dB bei Wolframkonzentration K2. Dem gegenüber zeigt die Messung von 96kEpo55OWOR eine Abschwächung um 2,3 dB im Vergleich zur Referenz.

Die Messungen des Ultraschallwandlers 96kBio2 führt ebenfalls zu einer Verstärkung von ca. 4 dB. Im Vergleich mit der Anpassung durch die Epoxidschichten weist der Bio-Schaum allerdings eine deutlich geringere Verstärkung auf.

Der Schallwandler Emfit250 zeigt in der zweiten Messung eine Verstärkung gegenüber der ersten Messung, ist jedoch im Vergleich zu den Keramik-Schallwandlern deutlich Schwächer. Bei gleicher elektrischer Anregungsspannung und vergleichbarer Frequenz wie bei den Messungen von 260kEmf1 und 2 ergibt sich eine

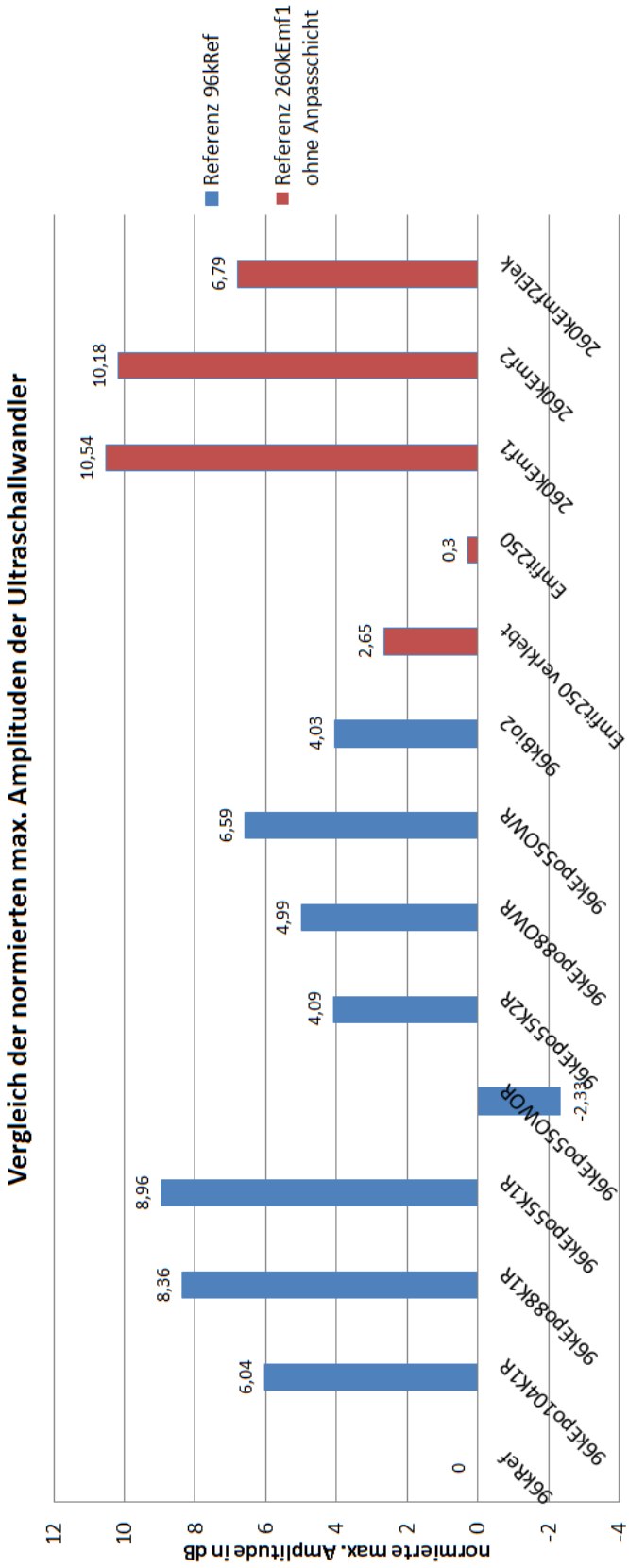


Abbildung 3.16.: **Vergleich der normierten max. Amplituden**

Differenz zur Messung von Emfit250 von annähernd 8dB.

Bei allen durchgeführten Messungen wird bei der Betrachtung der Schallfelder deutlich, dass die aufgezeichneten Schallfelder größtenteils das Fernfeld der Schallwandler zeigen. Dies wird bedingt durch die Messelektronik, da der Sendepuls zu einer Rückkopplung auf den Empfangsverstärker führt. Die Rückkopplung wurde durch einen Tiefpass in der Spannungsregelung des Verstärkers minimiert, war aber dennoch zu groß um an dieser Stelle verwertbare Messungen vorzunehmen, da es zu Überlagerungen des Empfangssignals mit der Rückkopplung kommt. Dadurch war ein Mindestabstand von ca. 1,5-2 cm einzuhalten. Bei einer Frequenz von 96 kHz, einer Schallgeschwindigkeit in Luft von 383 m/s und einem Aktordurchmesser von 20 mm ergibt sich nach Gleichung 1.61 eine Nahfeldlänge von 2,5 cm, so dass eine Vermessung des Schallfeldes im Nahfeldbereich nicht möglich war.

4. Diskussion

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen die Verstärkung der Amplituden mit einer geeigneten Impedanzanpassung an Luft. Die akustische Anpassung mit der größten Verstärkung gegenüber der Referenzmessung, erfolgte durch die Elektretfolie. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Impedanz der Elektretfolie dem Optimum der Impedanz einer Anpassschicht für Luft am nähesten kommt. Das dass Ergebnis nicht deutlicher ausfällt als bei den Epoxidschichten, begründet sich in der Fehlanpassung bezüglich der Dicke der Anpassschicht. Optimal wäre die ca. 60–70 μm dicke Folie für einen Schallwandler mit 296 – 350 kHz. Der eingesetzte Ultraschallwandler hatte jedoch eine Resonanzfrequenz von 260 kHz, so dass eine Dicke von 81,7 μm benötigt worden wäre. Somit weicht die Dicke um 14 % ab. Durch die Verwendung eines Aktors mit einer Resonanzfrequenz aus dem genannten Frequenzbereich sollte der Transmissionsgrad der Grenze Schallwandler-Koppelmedium noch weiter steigen. Die Abschwächung der Amplitude von 260kEmf1, durch die elektrische Anpassung lässt sich auf die Veränderung der Charakteristik des Schallwandlers zurückführen. Eine elektrische Anpassung führt zum Anstieg der Bandbreite der Übertragungsfunktion des Schallwandler, was zu einem kürzeren Puls und einem homogeneren Nahfeld führt. Die erhöhte Bandbreite führt allerdings zu einer Verteilung der Energie auf mehrere Wellenlängen, so dass das Schallfeld geschwächt wird.

Die Maximalamplitude des Schallfeldes von Schallwandler Emfit250 war geringer, als die der Schallfelder der Ultraschallwandler mit Keramiken. Aufgrund ihrer niedrigen akustischen Impedanz ist eine Anpassung zwar unnötig, was einen Vorteil gegenüber den klassischen Materialien darstellt, allerdings ist ihr Koppelfaktor deutlich kleiner. Es wird also weniger elektrische Energie in mechanische Schwingung umgesetzt bzw. umgekehrt als das beispielsweise bei Keramiken der Fall ist.

Die mit einem Raster versehenen Epoxidschichten führten zu einem vergleichs-

weise guten Ergebnis. Die Erzeugung eines zusätzlichen Gradienten mittels Wolfram führte zu keiner besseren Ankopplung. Aufgrund der Präparation mit der Drahtsäge ergaben sich unterschiedliche Rastertiefen von 3 mm, 2 mm und 1,5 mm. In der Drahtsäge läuft der Draht aufgrund der Vorspannung des Drahtes nicht parallel zum Sägestück, so dass sich trotz Einspannung aller 3 Epoxidschichten in einem Sägevorgang unterschiedlichen Sägetiefen ausbildeten. Geht man davon aus, dass sich bei erreichen der Zieldicke das Mischungsverhältnis von Epoxid zu Wolfram so stark abgeschwächt hat, dass es eine untergeordnete Rolle spielt, lassen sich die unterschiedlichen Ergebnisse der Messungen der 96kEpo...–Schallwandler auf die Rastertiefe zurückführen. Somit ergibt sich die am besten geeignete Rastertiefe für die Anwendung als Anpassschicht bei 2 mm. Die Messung mit einer reinen Epoxidschicht ohne Raster verdeutlicht den Nutzen des Rasters für eine akustische Anpassung, da die Amplitude deutlich schwächer war als bei den Schallwandlern mit gerasterten Vorlaufstrecken.

Eine Anpassung durch den Bio-Schaum ergab einen Amplitudenanstieg von 4 dB. Im Vergleich mit den anderen Vorlaufstrecken ist dieser schwächer. Eine Erklärung hierfür ist der große Homogenitätsunterschied des Bio-Schaums. Die Porengröße ist sehr unterschiedlich und könnte an diesen Stellen zu einer Fehlanpassung führen. Eine andere Begründung könnte in einer ungeeigneten akustischen Impedanz liegen. Zusammenfassend eignet sich der Bio-Schaum für den Einsatz als Vorlaufstrecke in der vorliegenden Form nur bedingt.

Bei allen Schallwandlern zeigen sich hohe Ausschwingzeiten. Denkbar ist hier ein falsch angepasstes Backing der Schallwandler. Eine genauere Aussage bedingt jedoch weitere vergleichende Messungen mit verschiedene Backingmaterialien/Backinglängen. Jedoch könnte auch ein Echo von der Vorderseite der Anpassschicht für das Nachschwingen verantwortlich sein. In jedem Fall ist das lange Nachschwingen für Messungen im Impuls-Echo-Verfahren hinderlich, so dass keiner der getesteten Schallwandler für Oberflächenmessungen im Impuls-Echo-Modus genutzt werden kann.

Für die Messungen an den Proben wurden die 260kEmf Schallwandler ausgewählt, da die Messung hier das größte Potential vermuten ließen. Allerdings war es mit diesen Wandlern weder möglich ein Echo von der Oberfläche der Proben zu detektieren, noch eine Durchschallung der Proben zu realisieren.

5. Zusammenfassung Ausblick

Die Messungen der Schallfelder zeigen, dass sowohl die Anpassung mittels Elektretfolie als auch die Anpassung mit den Epoxidschichten eine deutliche Verstärkung der Amplituden von bis zu 10 dB nach sich zieht. Der Schallwandler 96kBio2 zeigt zwar auch eine Steigerung der Amplitude durch die Nutzung des Bio-Schaums als Vorlaufstrecke, allerdings ist die Steigerung deutlich schwächer ausgeprägt. Ein Vergleich von 96kBio2 und 96kEpo55K1R zeigt eine Differenz von 5 dB. Mit keinem Ultraschallwandler war es möglich tatsächlich Proben zu messen, so dass weitere Optimierungen der elektrischen Anpassung und der Sendeelektronik nötig sind.

Bezüglich der akustischen Anpassschichten lassen sich zwei Ansätze verfolgen. Eine vermeintliche Fehlanpassung der Schallwandler 260kEmf durch eine zu dünne Anpassschicht führte dennoch zu einer deutlichen Steigerung der Schallamplitude. Die Dicke der Vorlaufstrecke würde besser zu einer Keramik mit einer Resonanzfrequenz von 300–350 kHz passen. Somit sollte eine weitere Steigerung der Schallfeldamplitude möglich sein.

Die Gradientenschichten aus Epoxid mit gesägtem Raster brachten ein ähnlich gutes Ergebnis wie die Elektretfolie hinsichtlich der Verstärkung der Schallamplitude. Das dies auf das Raster zurückzuführen ist, zeigt der Vergleich der Schallfelder von 96kEpo55K1R und 96kEpoOWOR sehr deutlich. Es wäre also zu überlegen ein, wie im Falle des Schallwandlers 96kEpo55K1R, das Raster auf bekannte Vorlaufstrecken zu adaptieren bzw. für Epoxid zu optimieren. Eine Optimierung des Rasters hinsichtlich möglicher Gitterkonstanten, Tiefen und Anstiegswinkeln könnte zu einer weiteren Steigerung des Transmissionskoeffizienten der Schallwandler-Luft-Grenzfläche führen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung auf eine mehrschichtige Vorlaufstrecke. Dies würde möglicherweise die Bandbreite des Schallwandlers erhöhen. Die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Materialien könnten hierbei durch ein geeignetes Raster als fließend

angesehen werden. Zur Ermittlung möglicher Abmessungen wäre eine Simulation der Vorlaufstrecke mit geeigneter Software nötig.

Nach Analyse der Ergebnisse wird deutlich, dass das Ausschwingverhalten aller Schallwandler zu optimieren ist. Zu diesem Zweck sollten noch vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Materialien bzw. unterschiedlichen Backingdicken vorgenommen werden. Für eine effektivere Bedämpfung könnte eine Erhöhung der Dicke des Backingmaterials auf mehrere Wellenlängen sorgen. Der Einsatz von Materialien mit gleicher akustischer Impedanz wie die der Keramik könnte zu destruktiver Interferenz der Reflektion des Backings mit der entgegen der gewünschten Abstrahlrichtung laufenden Welle führen. Hierzu müsste das Backingmaterial eine definierte Länge von $\frac{\lambda}{2}$ haben und am Ende des Backings sollte sich ein akustisch weicheres Material befinden, um einen Phasensprung zu erzwingen. Somit löschen sich die Reflektionen im Backingmaterial aus, was eine Verkürzung des Sendepulses ermöglichen könnte.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Teilchenbewegung in den Wellenmoden 10
1.2. Schema der Festkörper-Fluid Grenzfläche 14
1.3. Schema der Perowskitstruktur 20
1.4. Illustration des piezoelektrischen Kopplungsfaktors 22
1.5. Schema Ultraschallwandler 25
1.6. Analogie von mechanischem und elektromagnetischem Schwingungsverhalten 25
1.7. Schema der Ausbildung des Nahfeldes 27

2.1. Epoxid-Wolfram-Testkörper 31
2.2. Montageschaumkörper 32
2.3. duroplastischer Hartschaum auf Pflanzenölbasis 32
2.4. Epoxidblöcke 33
2.5. Epoxidblöcke mit gesägtem Raster 33
2.6. Aufbau Scanner 34
2.7. Frequenzgang Keramik von 0–10 MHz 36
2.8. Frequenzgang Keramik 40–800 kHz 36
2.9. Frequenzgang Keramik von 93–100 kHz 37
2.10. 100 kHz Keramik in PVC-Gehäuse 39
2.11. 260 kHz Schallwandler 39
2.12. gedrehtes Gehäuse für Elektretfolie 39
2.13. gebaute Empfängersonde 41
2.14. Messaufbau mit Reflektor 41
2.15. Probe aus 4 Laminatschichten mit eingebrachten Defekten 44
2.16. Probe mit Einschuss 44

3.1. Schallfeld des kommerziellen 125 kHz Schallwandlers 45
3.2. Schallfeld Schallwandler 260kEmf1 46

3.3. Schallfeld Schallwandler 260kEmf2 47
3.4. Schallfeld Schallwandler 260kEmf2 mit elektr. Anpassung 47
3.5. Schallfeld Emfit250 48
3.6. Schallfeld Emfit250 verklebt 48
3.7. Schallfeld Schallwandler 96kRef (Referenz) 49
3.8. Schallfeld Schallwandler 96kBio2 50
3.9. Schallfeld Schallwandler 96kEpo55K2R 51
3.10. Schallfeld Schallwandler 96kEpo55OWOR 51
3.11. Schallfeld Schallwandler 96kEpo104K1R 52
3.12. Schallfeld Schallwandler 96kEpo83K1R 52
3.13. Schallfeld Schallwandler 96kEpo55K1R 53
3.14. Schallfeld Schallwandler 96kEpo83OWR 53
3.15. Schallfeld Schallwandler 96kEpo83OWR 54
3.16. Vergleich der normierten max. Amplituden 55

A.1. Fokusbereich 96Epo55K1R 67
A.2. Fokusbereich 260kEmf1 68
A.3. Fokusbereich Emfit250 68
A.4. Fokusbereich Referenzwandler 68

B.1. gemessener Leitwert der Keramiken 1 und 2 an der Resonanzstelle 70
B.2. gemessener Leitwert der Keramiken 3 und 4 an der Resonanzstelle 70
B.3. gemessener Leitwert der Keramiken 5 und 6 an der Resonanzstelle 70
B.4. gemessener Leitwert der Keramiken 7 und 8 an der Resonanzstelle 71
B.5. gemessener Leitwert der Keramiken 9 und 10 an der Resonanzstelle 71
B.6. gemessener Leitwert der Keramiken 11 und 12 an der Resonanzstelle 72
B.7. gemessener Leitwert der Keramiken 13 und 14 an der Resonanzstelle 72
B.8. gemessener Leitwert der Keramiken 15 an der Resonanzstelle . . . 72

C.1. ScannerGUI 74

D.1. CharakterGUI 79

Tabellenverzeichnis

1.1. Wichtige Kopplungsfaktoren piezoelektrischer Keramiken oder Kristallen der Klasse „6mm“ in Abhängigkeit der Randbedingungen [4] 23

2.1. Liste der Keramiken 30
2.2. physikalische Eigenschaften der Elektretfolie [7] 30
2.3. Resonanzfrequenzen der Keramiken 38
2.4. Liste der Kurzbezeichnungen der Schallwandler 42

B.1. elektrische Parameter der Keramiken 69

C.1. Liste der Einstellungen der Scanner-Software 76

E.1. Liste der Strukturen für die CAN-Steuerung 81
E.2. Liste der verwendeten Befehle für die CAN-Steuerung 82

F.1. Aufbau des Fileheader 85
F.1. Fortgeführt: Aufbau des Fileheader 86
F.1. Fortgeführt: Aufbau des Fileheader 87

Literaturverzeichnis

[1] Andrew Briggs: *Acoustic Microscopy*, Oxford: Clarendon Press, 1992, Seite 74 ff

[2] Andrew Briggs: *Acoustic Microscopy*, Oxford: Clarendon Press, 1992, Seite 89 ff

[3] Gordon S. Kino: *Acoustic Waves: Devices,imaging and analog signal processing*, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1987

[4] O.E. Mattiat: *Ultrasonic Transducer Materials*, New York: Plenum Press, 1971

[5] Ralf Hansch *Optimierung des PbO-Haushaltes in undotierten und SKN-substituierten PZT-Fasern: Gefüge und Eigenschaften*, Dissertation, Würzburg, 2003

[6] Daniel Döring *Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*, Dissertation, Stuttgart, 2011

[7] Viktor Bovtun et.al. *EMFIT Ferroelectret Film Transducers for Non-Contact Ultrasonic Testing*, ECNDT 2006 – Tu.1.7.1,

[8] Tobias Melz *Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kryokühlern*, Dissertation, TU Darmstadt, 2002

[9] A. Gombert et.al. *Subwavelength-structured antireflective surfaces on glass*, Thin Solid Films 351, S. 73-78, 1999

[10] David Hykes et. al. *Ultrasound Physics And Instrumentation*, Mosby Year Book, 1992

A. Fokusvermessung

Da die Anpassschichten in diesem Falle keinen Einfluss auf den Fokus haben, werden an dieser Stelle nur vergleichende Messungen der unterschiedlichen Schallwandler gezeigt. Bei unfokussierten Ultraschallwandlern ergibt sich die Nahfeldlänge aus der Frequenz und dem Wandlerdurchmesser, so dass auch die Fokusierung bei allen Ultraschallwandlern, mit gleicher Resonanzfrequenz, ähnlich ist. Stellvertretend für die Messungen der 96k. . . Schallwandler dient Abbildung A.1. Die Abbildung A.1. lässt auf eine Fokuslänge von über 60 mm schließen, die Fokusbreite liegt bei ca. 9 mm.

Im Vergleich hierzu zeigt Abbildung den Fokusbereich Schallwandlers 260kEmf1. Erwartungsgemäß ergibt sich für die höherfrequenten Schallwandler eine niedrigere Fokusbreite von 6 mm. Gleichermaßen ergab die Messung eine kürzere Fokuslänge, aufgrund der erhöhten Dämpfung gegenüber niederfrequenteren Schallwandlern, von 25 mm. Die Messung des Schallfeldes von Emfit250 ergab eine Fokuslänge von 40 mm und eine Fokusbreite von 7 mm, zu sehen in Abbildung A.3.

Abschließend wurde noch das Schallfeld des Referenzwandlers hinsichtlich des Fokusbreichs ausgewertet. Abbildung zeigt das Ergebnis der Auswertung, wie

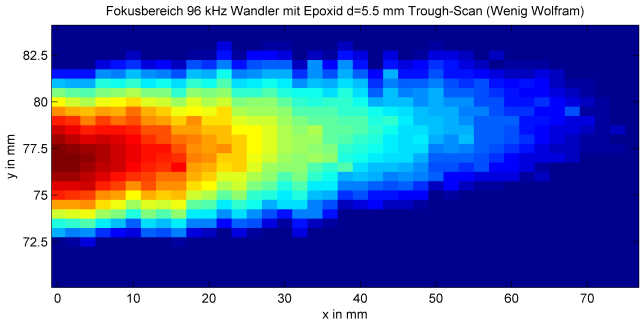


Abbildung A.1.: **Fokusbereich 96Epo55K1R**
Fokusbereich 96Epo55K1R

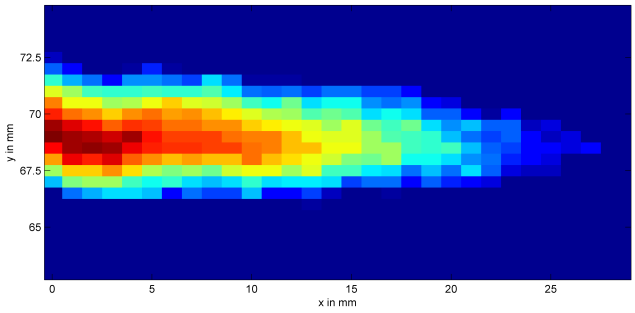


Abbildung A.2.: **Fokusbereich 260kEmf1**

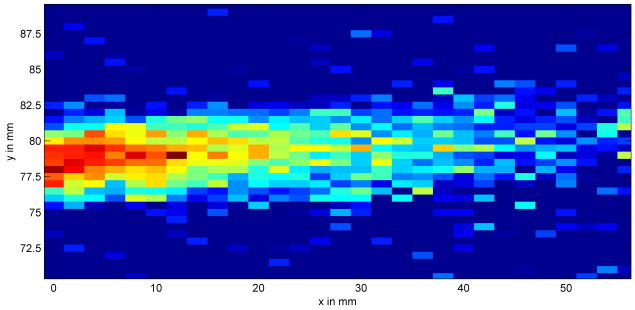


Abbildung A.3.: **Fokusbereich Emfit250**

erkennbar handelt es sich um eine Fokuslänge von 30 mm und eine Fokusbreite von 20 mm.

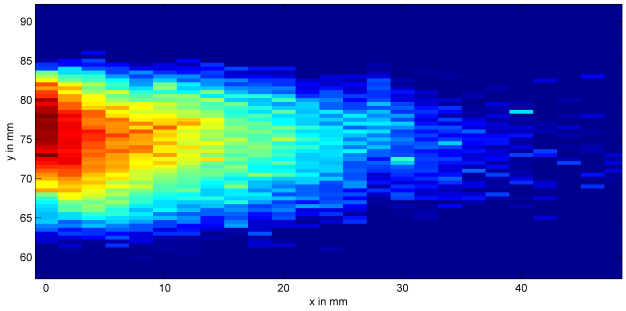


Abbildung A.4.: **Fokusbereich Referenzwandler**

B. elektr. Charakterisierung

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben wurden die Keramiken mit einem Impedanz-Analysator vermessen. Die Ergebnisse dieser Messungen, sowie deren elektrische Analyse, werden im folgenden dargestellt. Die folgenden Grafiken zeigen die Untersuchungen der Keramiken aus Tabelle 2.3. Die Parameter des Ersatzschaltbildes sind in Tabelle dargestellt.

Tabelle B.1.: **elektrische Parameter der Keramiken**

#	f_{res} in kHz	C_1 in nF	L_1 in mH	R_1 in Ohm	C_0 in nF	L_0 in mH
1	96,62	1,21	2,24	18,6	3,3	32,47
2	96,98	1,2	2,25	18,04	2,54	41,81
3	96,64	1,19	2,29	17,93	2,22	48,15
4	96,64	1,18	2,3	17,34	2,57	41,66
5	96,56	1,21	2,25	18,51	2,28	47,1
6	195,85	0,2	3,32	55,98	0,29	88,82
7	194,97	0,2	3,37	54,72	0,3	87,99
8	194,95	0,2	3,4	55,74	0,33	80,64
9	195	0,2	3,37	55,99	0,34	77,41
10	195,45	0,2	3,32	54,6	0,32	81,48
11	314,74	0,08	3,19	94,17	0,13	75
12	314,89	0,08	3,16	92,97	0,13	78,89
13	314,89	0,08	3,21	98,74	0,14	72,33
14	315,08	0,08	3,18	94,98	0,16	63,97
15	314,51	0,08	3,20	92,45	0,12	84,46

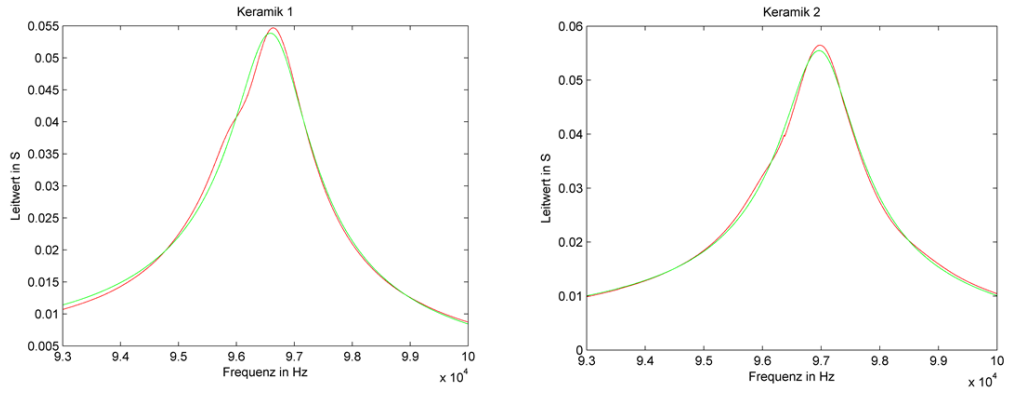


Abbildung B.1.: **gemessener Leitwert der Keramiken 1 und 2 an der Resonanzstelle**

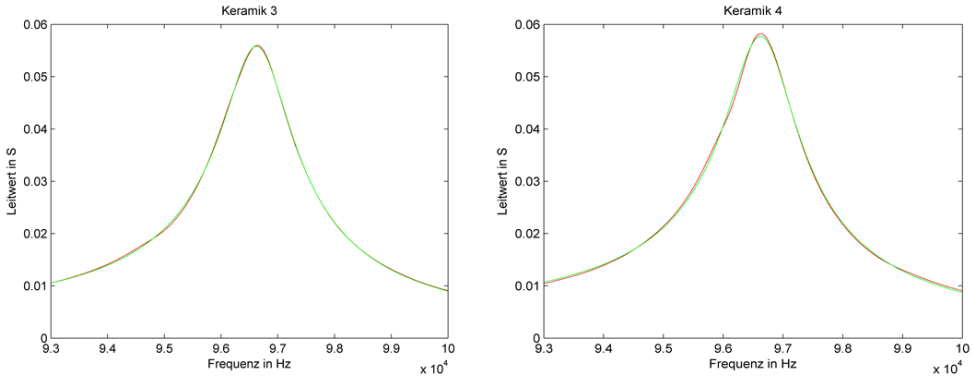


Abbildung B.2.: **gemessener Leitwert der Keramiken 3 und 4 an der Resonanzstelle**

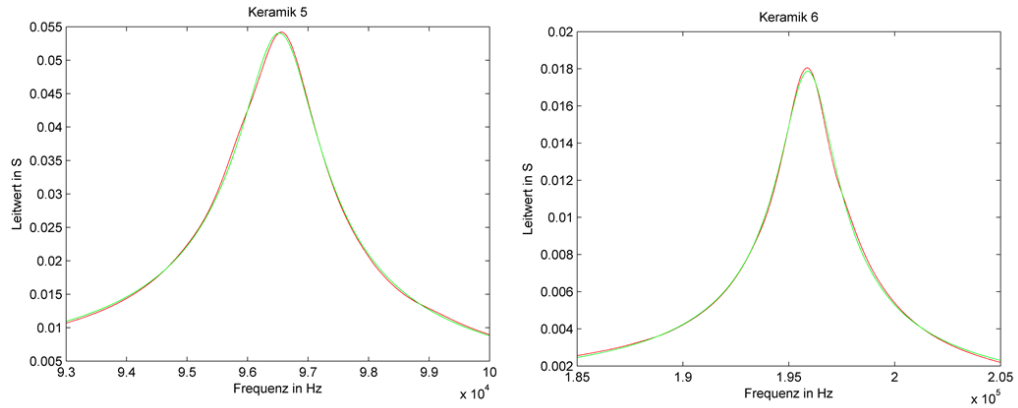


Abbildung B.3.: **gemessener Leitwert der Keramiken 5 und 6 an der Resonanzstelle**

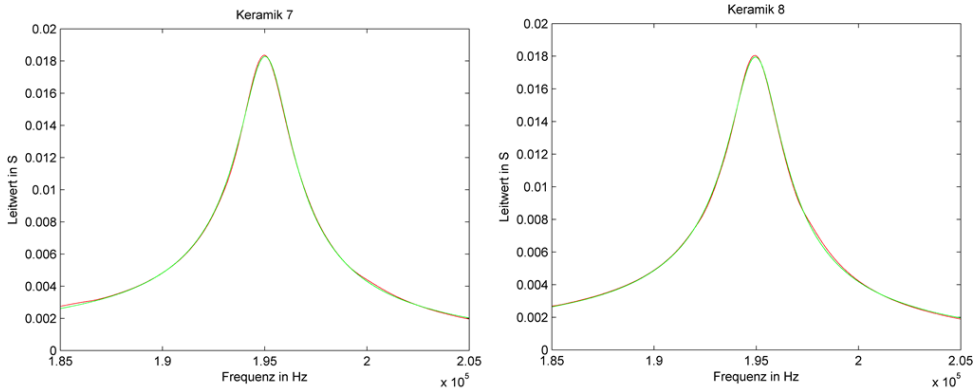


Abbildung B.4.: **gemessener Leitwert der Keramiken 7 und 8 an der Resonanzstelle**

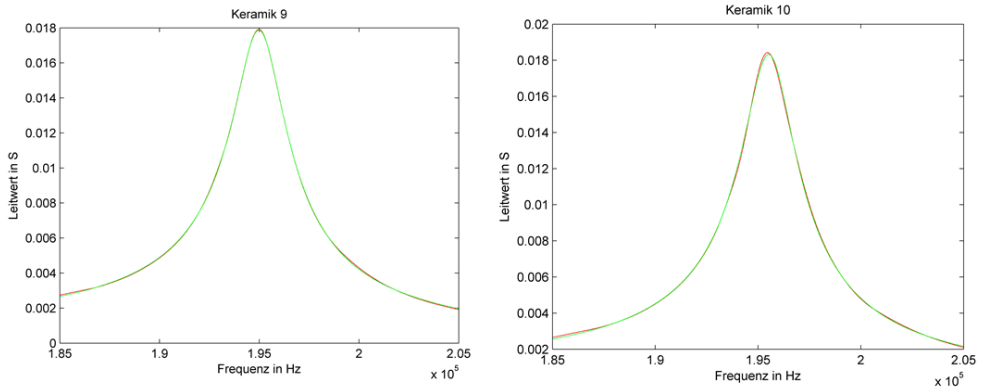


Abbildung B.5.: **gemessener Leitwert der Keramiken 9 und 10 an der Resonanzstelle**

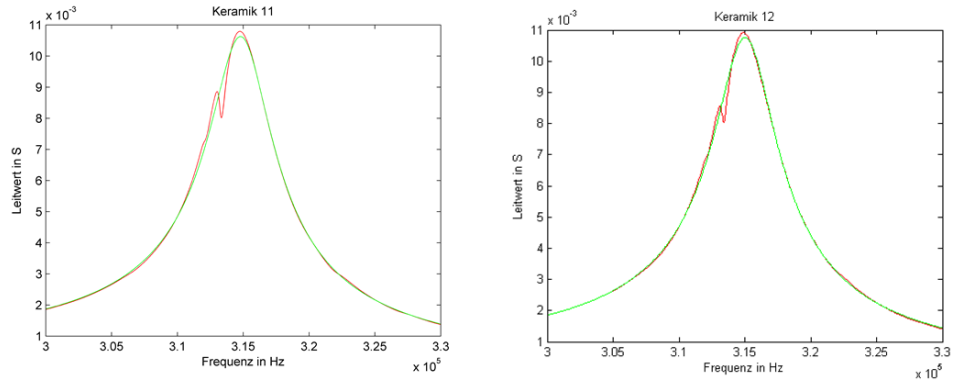


Abbildung B.6.: **gemessener Leitwert der Keramiken 11 und 12 an der Resonanzstelle**

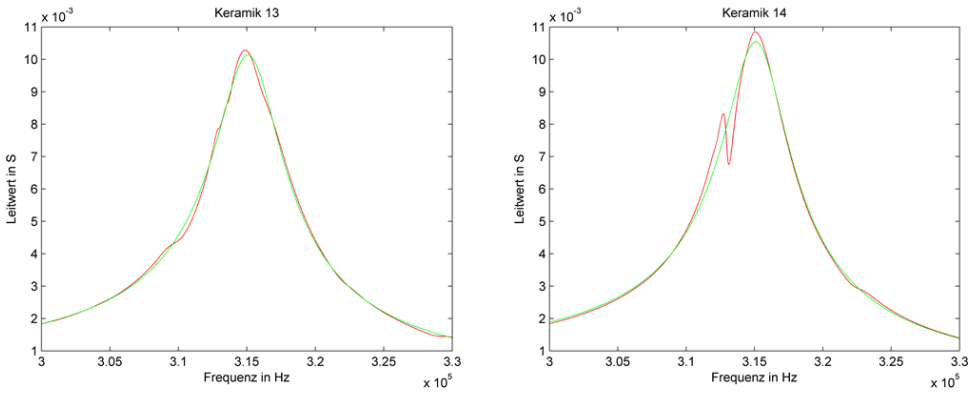


Abbildung B.7.: **gemessener Leitwert der Keramiken 13 und 14 an der Resonanzstelle**

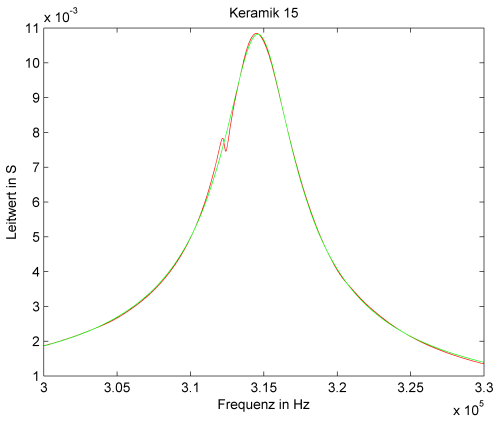


Abbildung B.8.: **gemessener Leitwert der Keramiken 15 an der Resonanzstelle**

C. Software Scanner

Die Scanner-Software besteht aus mehreren einzelnen Funktionen. Die Schnittstelle aller Funktionen bildet die GUI. Jedes angeschlossene Gerät lässt sich über eine eigene Funktion ansteuern und würde auch autark vom Rest der Software funktionieren. Es existieren folgende Steuer-Funktionen:

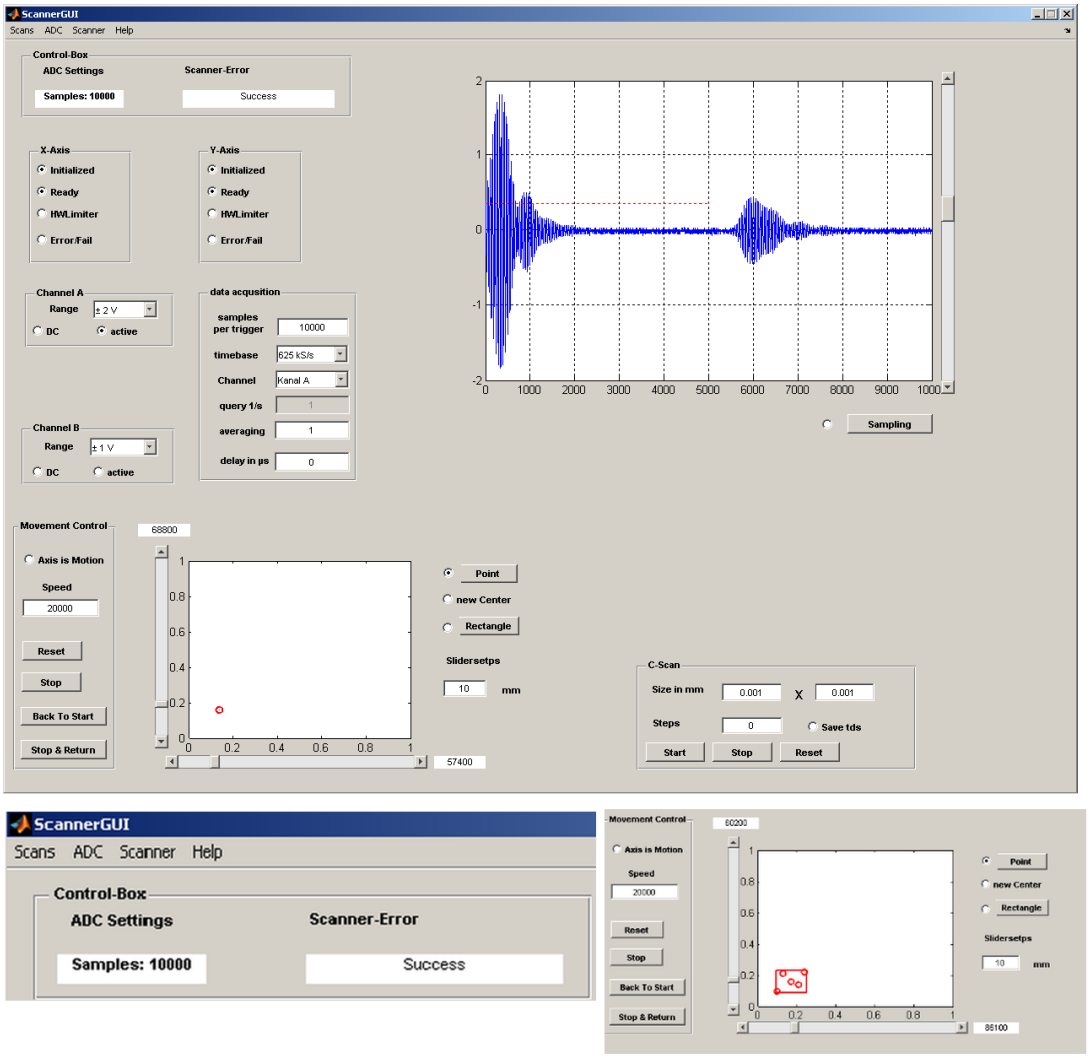
- Control_PicoScope - Kommunikation mit dem Softwareadapter für ADC
- IselSteuerung - Steuerung des Scanners
- Inkrement_Steuerung - Steuerung des Inkrementalzählers

Des weiteren existieren Hilfsfunktionen, welche spezielle Aufgaben bearbeiten.

- StartScanner - Beinhaltet die Initialisierungsbefehle des Gesamtsystems
- getIselConfigs - Aufbau der für die CAN-Bus-Kommunikation benötigten Strukturen
- ProcessScan - Steuert die Aufrufe von Scanmode/Waitbar wird per Timer aufgerufen
- Scanmode - Steuert den Scanner entsprechend der Scanmodi
- ScannerError - Interpretiert die Errorcodes des Scanners
- Refresh_gui - Setzt die aktuellen Parameter in der GUI

Nicht alle Einstellungen der ADC werden ständig gebraucht und wurden in ein extra Fenster ausgelagert, welches über das Drop-Down-Menü aufgerufen wird. Gleiche gilt für die Initialisierung der Achsen. Sollte diese beim Start des Programmes scheitern, kann eine manuelle Initialisierung über das Drop-Down-Menü

durchgeführt werden. In diesem Falle öffnet sich ebenfalls ein zusätzliches Fenster. Für den Fall, das eine Achse den Endschalter erreicht, muss die Achse aus dem



a) b)

Abbildung C.1.: **ScannerGUI mit Detailansichten a) Drop-Down-Menüs b) Scanfeld mit Positionsmarkierungen**

Hardwareendschalter per Befehl (Drop-Down-Menü) herausgefahren werden und benötigt danach eine erneute Referenzfahrt. Die GUI ist in Abbildung C.1 zu sehen.

Im oberen Bereich befinden sich die Drop-Down-Menüs. Das Axis im unteren Bereich dient der Steuerung der Achsen. Mit Hilfe eines Punktes wird die momentane Position der Achsen im Scanfeld angezeigt. Durch Klicken mit der linken Maustaste wird der Scanner automatisch an diese Position verfahren. Sofern der B- oder C-Scan Modus ausgewählt wurde, kann das Scanfeld per Maus innerhalb dieses Axis aufgezogen werden, bzw. es wird im Axis angezeigt, nachdem die Scanfeldgröße definiert wurde. Wird der Scanbereich per Maus definiert, fährt der Scanner automatisch in die Mitte des gewählten Scanbereichs. Mithilfe der Radiobutton an der rechten Seite des Axis kann das Verhalten beim Mausklick verändert werden. Somit lässt sich beispielsweise ein neuer Mittelpunkt des Scanfeldes bestimmen oder aber lediglich die Achse an eine Stelle des Scanfeldes gefahren werden, um das Signal an dieser Stelle zu prüfen. Für jeden angefahrenen Punkt wird ein Positionsfeedback in das Axis gezeichnet. Des weiteren stehen dem Nutzer noch Scrollbars zur Positionierung zur Verfügung. Das Inkrement der Scrollbars lässt sich über die *Slidersteps* definieren.

Je nach ausgewähltem Scanmodi (Drop-Down-Menü) wird rechts unten ein entsprechendes Panel sichtbar in dem die Scanfeldeigenschaften verändert werden können. Standardmäßig werden die Zeilen in Y-Richtung abgescannt. Dies ist Systembedingt, da die X-Achsen bei größeren Bewegungen ein Schwingen der Y-Achsen hervorrufen könnten. Lediglich der B-Scan ist in beide Richtungen möglich. Um Zeit zu sparen wird bei Hin- und Rückfahrt der Y-Achse gescannt.

Bei allen erzeugten Bildern der verschiedenen Scanmodi handelt es sich um die farbcodierte Darstellung der Maximalen Amplitude bzw. deren zeitliche Position. Somit werden beispielsweise bei einem C-Scan zwei Figure geöffnet, eines für die Darstellung der max. Amplituden und eines für die Darstellung der zeitlichen Position der ermittelten Amplituden. Mithilfe der Darstellung der Amplituden soll eine Materialänderung visualisiert werden, mit der zweiten Darstellung der zeitlichen Positionen sollen Rückschlüsse auf die Art der gefundenen Materialinhomogenitäten ermöglicht werden. Wenn im Bereich des Defekts eine höhere Laufzeit zu beobachten ist, handelt es sich wahrscheinlich um einen Gaseinschluss, im umgekehrten Falle um ein Materialeinschluss.

Folgende Einstellungen sind möglich:

Tabelle C.1.: **Liste der Einstellungen der Scanner-Software**

Position	Name	Beschreibung	Möglichkeiten
data acqusition panel	samples per trigger	Anzahl der Messpunkte	1 - 10000
	timebase	Abtastrate	1 - 20 MS/s
	Channel	Kanal von dem Daten akquiriert werden	A, B
	delay in μs	Post/Pretrigger	$\pm$ Aufgenommene Zeit
ADC Setup (DDM[a])	Quelle	Triggerkanal	Extern, A, B
	Richtung	Flankenrichtung	Steigend/Fallend
	Schwelle in %	Triggerschwelle in % der Range	-100 - 100
	AutoTrig ms	Selbsttriggerung nach x ms	nicht verwendet 0
Channel A / Channel B	Range	Eingangsspannungsbereich	$\pm$100 mV - $\pm$5 V
	DC-Radiobutton	Eingangsverhalten	DC wenn aktiviert, sonst AC
	active-Radiobutton	Aktiviert den Kanal	An/Aus
Movement Control	Speed	Verfahrgeschwindigkeit in Steps/s	1 - 30000
	Reset	verfährt die Achse an die letzte Position	
	Stop	Scanner stoppt sofort	
	Back to Start	zurück zum Startpunkt des Scanfelds	
	Stop & Return	Anhalten und zurück zur letzten Position	

[a] Drop-Down-Menü

D. Charakterisierungssoftware

Bei dieser Software handelt es sich um ein Hilfsprogramm, mit dem die elektrische Anpassung von Ultraschallwandlern berechnet werden kann. Dem Programm liegt ein Ersatzschaltbild für Ultraschallwandler zu Grunde. Anhand von Messdaten eines Frequenzanalysators (Leitwert über Frequenz), wird eine Funktion mit vier Unbekannten an die Messkurve gefittet. Die Messkurve sollte auf den gewünschten Resonanzbereich beschränkt sein, da das Ersatzschaltbild nur für den Resonanzfall gültig ist.

Die Daten sollten in einem ASCII-file zur Verfügung stehen, des weiteren sollten sie in zwei Spalten angeordnet sein (1.Spalte: Frequenz, 2.Spalte: Messwert). Sollte das Textfile einen Header enthalten, so wird dieser vom Programm nicht ausgelesen, sonder automatisch übersprungen. Ob das Programm die Daten korrekt ausliest, kann man im Vorfeld mit Matlab testen. Hierzu verwendet man den Befehl *importdata('Pfad')*. Man erhält eine Struktur die aus folgenden Feldern besteht: *data* (Messdaten), *textdata* (Header), *colheaders* (Spaltenbezeichnungen), wobei die ersten zwei Spalten von *data* die Messwerte enthalten sollten. Die Software lässt sich über eine eigene GUI steuern, wobei die eigentliche Problematik des Kurvenfittings in eine eigene Funktion ausgelagert ist.
Die Funktion wird mit folgendem Befehl aufgerufen:

Charakterisierung(Frequenz,Leitwert gemessen,Parameter)
und liefert folgende Rückgabewerte:

[Leitwert errechnet,LeitwertAnp,Phase,PhaseAnp,C0,R1,L1,C1,L0, Berechnungszeit,fval]
Die Parameter können in einer Struktur aus vier Werten vorgegeben werden, welche wie folgt aufgebaut ist:

- Para(1)=C0
- Para(2)=R1

- Para(3)=L1
- Para(4)=C1

Diese Parameter dienen nur zur Berechnung der Kurven und nicht als Startwerte des Fittings.

Als Startwerte sind 3 Parametersätze vordefiniert und werden automatisch verwendet, wenn statt der *Parameter* eine *0* übergeben wird.

Die Ausgabeparameter setzen sich wie folgt zusammen:

- Leitwert errechnet - Kurvenfit
- LeitwertAnp - Leitwert mit zusätzlich errechnetem Spulenwert L0
- Phase - Phasenlage Fit
- PhaseAnp - Phasenlage mit errechneter Spule
- C0, R1 ,L1 ,C1, L0 - errechnete Parameter
- Berechnungszeit - für Berechnung benötigte Zeit
- fval - Divergenz des Fits von den Messwerten

Der Wert *L0* gibt die Induktivität, der zur elektr. Anpassung benötigten, Spule an.

Die GUI verfügt über die Möglichkeit einer Datenbank, in der neue Messungen mittels eines Buttons hinzugefügt werden können. Die Datenbank speichert den Pfad sowie alle errechneten Messwerte und kann per Auswahl im Datenbankfenster auch die Daten wieder laden. Die GUI überprüft selbständig ob der Dateiname bereits in der Datenbank vorhanden ist und bietet die Möglichkeit die Datenbankeinträge zu laden. Abbildung D.1 zeigt die GUI und veranschaulicht nochmals die erwähnte Datenbank.

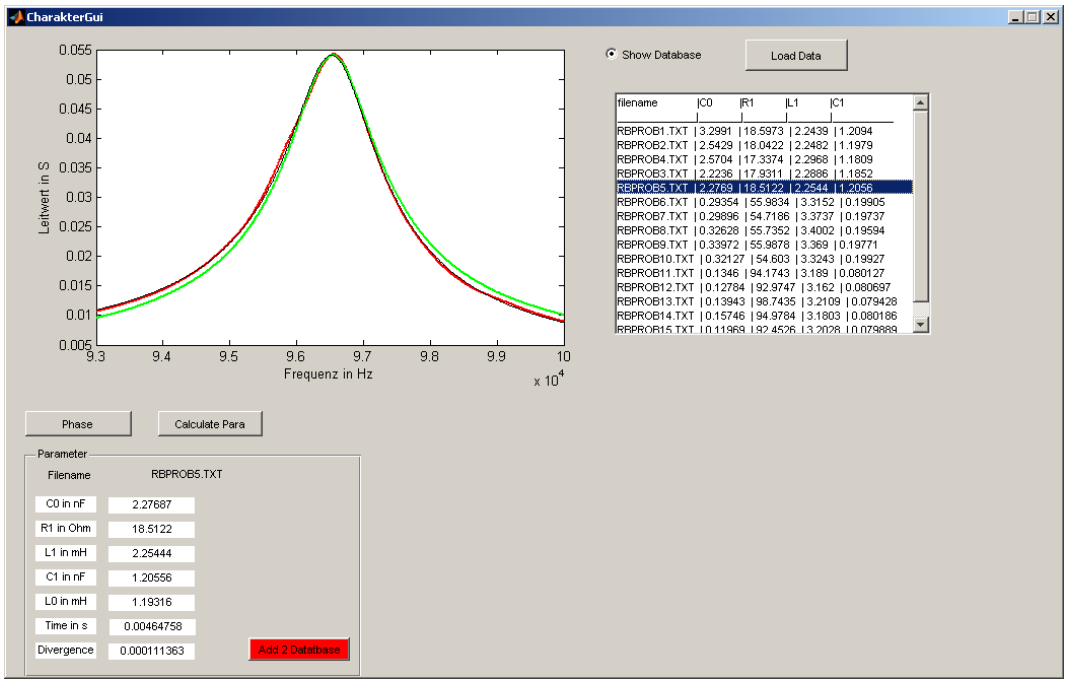


Abbildung D.1.: **CharakterGUI**

E. CAN-Bus Steuerung

Die Scannereinheit wird über eine CAN-Bus-Schnittstelle angesprochen. Zur Kommunikation mit dieser liegt ein Treiber vor. Die Kommunikation erfolgt über definierte Befehle, welche nach Einbindung des Treibers in das Programm verwendet werden können. Matlab hat diesbezüglich einen Nachteil gegenüber C++. In den meisten Befehlen werden die zu setzenden Werte in Strukturen übergeben, die sich nicht durch einfaches „Nachbauen“, wie etwa in C++, in Matlab erzeugen lassen. Die Strukturen müssen aus der *lib* des Treibers extrahiert werden. Ein weiteres Problem ist die Bestimmung der tatsächlichen Größe der Struktur in Bytes, da dieser Wert korrekt übergeben werden muss, damit der Controller den Befehl überhaupt annimmt.

Zur Extrahierung der Strukturen kann der Befehl *libstruct('tag')* benutzt werden, wobei *tag* der Name der Struktur im Treiber ist. Zur Ermittelung der Größe der Strukturen wurde ein mitgeliefertes Beispiel benutzt, welches in C++ geschrieben wurde. Die für die Steuerung wichtigsten Strukturen sind in Tabelle E.1 aufgeführt.

Tabelle E.1.: **Liste der Strukturen für die CAN-Steuerung**

Strukturname	Funktion
tagAXISPOS	Positionierung/ Positionsabfrage
tagAXISSTATUS	Abfrage der Status einer Achse
tagMCTLVELOCITY	Abfrage/ Setzen der Verfahrgeschwindigkeit

Die Details zum Aufbau der Struktur können der Hilfedatei *CNCApi.chm* entnommen werden. In der Nachfolgenden Tabelle E.2 werden die wichtigsten Befeh-

le aufgelistet. Zur Verwendung wird der *calllib*-Befehl von Matlab genutzt (Bsp.: *calllib('Name der dll','Befehl',Achse,Struktur,Strukturgröße)*). Die Übergabewerte Achse und Struktur, sowie ihre Größe sind optional, da nicht jeder Befehl diese benötigt.

Tabelle E.2.: **Liste der verwendeten Befehle für die CAN-Steuerung**

Befehl	Struktur/ Übergabewert	Funktion
mctl_Initialize	Pfad zur INI-Datei	Initialisierung des Scanners
mctl_Reset	-	Reset des Scanners
mctl_Reference	Achse(1–x, 2–y, 3–(x+y) ...)	Start der Referenzfahrt
mctl_SetVelocity	Struktur: tagAXISVEL,32	Setzen der Geschwindigkeit
mctl_MoveAbs	Struktur: tagAXISPOS,36	Verfahren des Scanners zu einer Absoluten Position
mctl_GetAxisStatus	Achse 0–x, 1–y Struktur: tagAXISSTATUS,92	Abfragen der Status der Achsen
mctl_MoveRel	Struktur: tagAXISPOS,36	Relative Bewegung der Achsen zur letzten Position
mctl_getPosition	Struktur: tagAXISPOS,36	Abfrage der aktuellen Position
mctl_LeaveHWLS	Achse(1–x, 2–y, 3–(x+y) ...), 'Hilfetext'	Verlassen des Endschalters (anschließend Reset und Referenzfahrt nötig)
mctl_SetMotionState	3 – Stop, 2 – Pause	Stoppt Pausiert die Bewegung

Für die Inbetriebnahme der Scannereinheit muss eine INI-Datei erstellt werden. Dies geschieht mit dem Programm CAN-Set. Die Einstellungen können hinterher mit CAN-Test getestet werden. In der INI werden die Initialisierungswerte fest-

gelegt. Dies betrifft unter anderem die Geschwindigkeit. Des Weiteren wird der Betriebsmodus definiert, in diesem Falle der Gantry-Modus. Es ist allerdings auch möglich alle vier Achsen autark zu verwenden, bzw. die Zuordnung zu ändern. Allerdings lassen sich immer nur 2 Achsen zusammenschalten.

Beim Start der Scannereinheit muss eine bestimmte Reihenfolge eingehalten werden.

1. mctl_Initialize
2. mctl_Reset
3. mctl_Reference

Alle in der INI eingestellten Achsen müssen eine Referenzfahrt durchführen, damit überhaupt eine Achse verwendet werden kann. Sollte eine Achse in den Endschalter fahren, wird die Versorgungsspannung der Achsen abgeschaltet. Diese muss nun über den Befehl *mctl_LeaveHWLS* softwareseitig freigeschaltet werden, bevor sie hardwareseitig am Controller (grün-blinkender Schalter an der Vorderseite) eingeschaltet werden kann. Das verlassen der Endschalter erfolgt nach erneuten einschalten automatisch.

Alle Felder in den Strukturen haben eine eindimensionale Formatierung, enthalten also nur einen Wert, außer das Feld *lNormVel* der Struktur *tagAXISVEL*. Dieses enthält zwei Werte, Längsgeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit. Es muss also immer wie folgt beschrieben werden:

tagAXISVEL.lNormVel=[Längsgeschw. Rotationsgeschw.]

Für das relative Verfahren der Achsen ist zu beachten, dass in der Struktur die alten Werte enthalten bleiben, so dass immer die Werte aller Achsen mit 0 überschrieben werden müssen, sofern ein erneutes Verfahren nicht gewünscht ist. Während die Achsen verfahren, werden keine neuen Befehle angenommen, d.h. weder Zielposition noch Geschwindigkeit können während der Bewegung geändert werden. Mithilfe des Befehls *mctl_SetMotionState* kann die Bewegung jedoch manipuliert werden (Stop, Pause ...).

F. Fileheader

Um eine weitere Auswertung der aufgenommenen Daten vornehmen zu können, ist es nötig das Zeitsignal der einzelnen Scanpunkte abzuspeichern. Die Speicher schonenste Variante ist das abspeichern in einer Binärdatei, welche fortlaufend während des Scans beschrieben wird. Damit diese Binärdatei korrekt ausgelesen werden kann, benötigt sie einen File-Header, indem alle nötigen Werte abgespeichert werden. Der File-Header wird mit Hilfe der Funktion *get_fileheader* erzeugt. Der File-Header setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle F.1.: **Aufbau des Fileheader**

Position (Hex)	Beschreibung	Variablen-Typ	Wert
0	Scanname	char	AirScan
10	Scanner	char	Isel
32	Art des Scans	char	C_Scan
40	MeanderScan	uint8	1
44	Scanspeed	int32	aus Variable
48	Scanspeed-max	int32	100000
4C	Bildbreite in μm	int32	aus Variable
50	Bildhöhe in μm	int32	aus Variable
54 & 1E0	Bildbreite in px	int32	aus Variable
58 & 1E4	Bildhöhe in px	int32	aus Variable
5C	# of scan lines	int32	aus Variable
60	Interpolationsfaktor	int32	1
64	Scannerposition x	int32	aus Variable
68	Scannerposition y	int32	aus Variable

Tabelle F.1.: **Fortgeführt: Aufbau des Fileheader**

6C	Scannerposition z	int32	1
70	Autofocus offset	int32	0
74	display zoom	int32	0
B0	Pulser–Typ	char	’ ’
B1	Delam–Treshold	uint8	0
B4	Gate Position	int32	0
B8	Gate Breite	int32	0
BC	B-Scan Gate Pos[1]	int32	0
C0	B-Scan Gate Breite	int32	0
C4	SFT[2] Gate Pos	int32	0
C8	SFT Gate Breite	int32	0
CC	Overflow trsh[3]	int32	0
D0	SFT trsh	int32	0
D4	data trsh	int32	0
E0	Phase	int32	0
E4	Signalmode	int32	2–TDS[4]
F5	Delam Marker	uint8	0
F6	Overflow Marker	uint8	0
F8	Surface Trigger	uint8	0
F9	Transmission Mode	uint8	0–Echo, 1–Through
10C	ADC Delay	int32	aus Variable
140	ADC HW[5] Name	char	Pico3206

[1]Pos–Position
[2]SFT–Surface Trigger
[3]trsh–Treshold
[4]TDS–Time Domain Signal
[5]HW–Hardware

Tabelle F.1.: **Fortgeführt: Aufbau des Fileheader**

170	ADC Samplerate	int32	aus Variable
174	ADC InputRange [mV]	int32	aus Variable
180	A–Scan Start–time [μs]	int32	aus Variable
184	A–Scan End–Time [μs]	int32	aus Variable
188	A–Scan Marker	int32	0
18C	SFT–gate start–Pos	int32	0
190	SFT–gate end–Pos	int32	0
1B0	SFT–trsh negative	uint8	0
11C	Verstärkung	int32	0
1C0	Transducer	char	'TestTrancducer'
1E8	Interpolationsfaktor	int32	1
1EC	# of samples	int32	aus Variable
1F0	Headersize	int32	500

Der Rückgabewert der Funktion ist eine Struktur, welche den Header enthält. Diese ist aus n-Einträgen zusammengesetzt, von denen jeder aus 3 Unterpunkten besteht:

- offs – Position im Binär-file (Bezüglich BOF[6])
- vart – Variablentyp
- data – zu schreibende Daten

Die Werte des Headers werden mit Hilfe einer Schleife in die Datei geschrieben, in die anschließend die Scanwerte hinzugefügt werden.

[6]BOF – Begin of file

In dieser Form entspricht das File-Format dem, der von der Software WinSam (PVA) erstellten SAZ-Files.