

# Bestimmung der Materialeigenschaften von Rohren und innen liegenden Schichten mittels geführten akustischen Wellen

Alexander Backer<sup>1</sup>, Sabrina Tietze<sup>1</sup>, Klaus Stefan Drese<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT), Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, Am Hofbräuhaus 1b, 96450 Coburg, Deutschland,

Alexander.Backer@hs-coburg.de, Sabrina.Tietze@hs-coburg.de, Klaus.Drese@hs-coburg.de

## Zusammenfassung

Für die nichtinvasive Durchflussmessung werden meist Ultraschallsensoren verwendet, die reversibel an das zu untersuchende Rohrsystem angebaut werden. Die Messgenauigkeit dieser Sensoren wird durch mögliche Ablagerungen im Rohrrinneren beeinflusst.

In dem hier vorgestellten Forschungsvorhaben, soll es mit Hilfe eines ultraschallbasierten Messverfahren möglich sein, sowohl die Materialeigenschaften und Wandstärke des Rohres direkt zu ermitteln als auch eventuell vorhandene Schichten im Rohrrinneren zu detektieren und zu charakterisieren. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Messgrößen soll zukünftig eine präzisere Durchflussmessung von klemmbaren Ultraschalldurchflusssensoren ermöglicht werden. Um die Algorithmen zur Charakterisierung der Materialeigenschaften zu erproben, wurden zunächst Simulationen zur Wellenausbreitung der geführten akustischen Wellen und deren Interaktion mit Schichten durchgeführt. Es erfolgte die Auswertung der beiden Grundmoden, A<sub>0</sub> und S<sub>0</sub>, in einem definierten Frequenzbereich. Im Anschluss erfolgte die experimentelle Überprüfung auf einer ebenen Platte mit definierten Schichten von 415 µm und 780 µm. Die bisherigen Messergebnisse zeigen, dass es möglich ist mit dem entwickelten Algorithmus das Material und die Schichten zu charakterisieren. Die noch vorhandene Abweichung der Materialdaten von den Literaturwerten ergibt sich u. a. aus dem Schwingungsverhalten der Piezokeramik. Zukünftig soll die Auswertung durch direkte Messung der Schwingungseigenschaften der Piezokeramik weiter optimiert werden.

**Keywords:** Geführte Akustische Wellen, Materialeigenschaften, Rohrsysteme, Schichtdickenbestimmung, Ultraschall-Durchflussmessung

## Einleitung

Für die Durchflussmessung in Rohrleitungen stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Für die nichtinvasive Durchflussmessung werden meist Ultraschallsensoren verwendet, die reversibel an das zu untersuchende Rohrsystem angebaut werden. Bei der Installation dieser Sensoren ist es wichtig, die Materialeigenschaften des Rohres, den Rohrumfang und die Wandstärke zu kennen, um eine zuverlässige Durchflussmessung zu gewährleisten. Die Messgenauigkeit wird auch durch mögliche Ablagerungen beeinflusst. So verfälschen z. B. aufwachsende Kalkschichten im Rohrwassersystem das Messergebnis. Zudem ist vor allem bei bestehenden Rohrsystemen nicht bekannt, ob bereits eine Schicht im Rohrrinneren vorhanden ist und somit zur Messgenauigkeit beiträgt.

Die Ausbreitung geführter akustischer Wellen ist abhängig von den Materialeigenschaften. Außerdem konnte in vergangenen Arbeiten bereits gezeigt werden, dass diese Art von

Ultraschallwellen gegenüber Schichtanlagerungen sensitiv sind [1,2].

Im aktuellen Forschungsvorhaben soll mit Hilfe eines zusätzlichem Ultraschallsensors, sowohl die Materialeigenschaften und Wandstärke des Rohres direkt, als auch vorhandene Schichten im Rohrrinneren detektiert und charakterisiert werden. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Messgrößen soll zukünftig eine präzisere Durchflussmessung von klemmbaren Ultraschalldurchflusssensoren ermöglicht werden.

## Algorithmus und Messmethodik

Für die Bestimmung der Materialeigenschaften und Schichtstärken wurde ein Algorithmus entwickelt, der diese Eigenschaften anhand von aufgenommenen Ultraschallsignalen berechnet und in diesem Abschnitt genauer vorgestellt wird.

Das Grundprinzip des Algorithmus beruht darauf, dass das Messsignal mit Hilfe von berechneten Dispersionsdiagrammen und

propagierten Signalen mit einem Optimierungsverfahren angenähert wird. Das Optimierungsergebnis entspricht dann dem zugrunde liegenden Messsystem und enthält dabei Informationen über die Materialeigenschaften und Schichtdicken. Das Vorgehen lässt sich dabei in die Datenvorverarbeitung und dem Optimierungsschritt unterteilen.

Die einzelnen Schritte der Datenvorverarbeitung sind in Abb. 2 dargestellt.

Als Messsignale dienen die akustischen Wellen, die sich entlang der zu untersuchenden Oberfläche ausbreiten, diese durchdringen und dabei mit angrenzenden Schichten interagieren. Bei Platten spricht man von Lambwellen. Bei Rohren werden die umlaufenden – Circumferential – Wellen verwendet. Je größer der Rohrdurchmesser im Vergleich zur Wellenlänge ist, desto mehr verhalten sich die umlaufenden Moden wie eine Lambwelle auf einer Platte. Der Unterschied des Dispersionsdiagramms ist in Abb. 1 für ein DN80 Aluminiumrohr – Außendurchmesser 88,9 mm – mit 1,5 mm Wandstärke und eine 1,5 mm dicke Platte mit identischen Materialeigenschaften dargestellt.

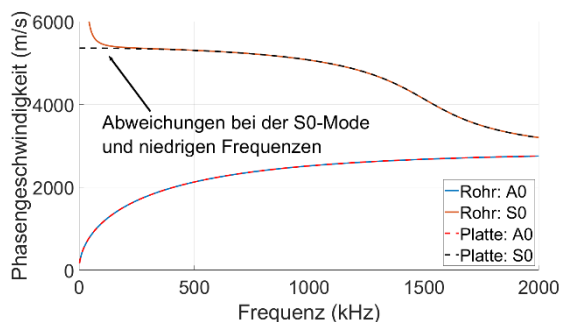


Abb. 1: Vergleich der Dispersionsdiagramme einer 1,5 mm Platte und eines Rohrs mit einer Wandstärke von 1,5 mm und einem Außendurchmesser von 88,9 mm

Neben unterschiedlichen Frequenzen kann der Algorithmus auch unterschiedliche Moden verarbeiten. Dabei gilt, je mehr Moden und Frequenzen verwendet werden, desto genauer ist das Berechnungsergebnis.

Als Messsignal wird ein Hanning gefensterter 5-fach Sinusburst verwendet. Die Anregefrequenz und Periodenanzahl wird dabei so gewählt, dass eindeutig voneinander getrennte Moden ohne die Überlagerungen von anderen Wellengruppen, wie sie z.B. durch Reflexionen an Rohrenden entstehen können, entstehen. Um den Einfluss von Signalrauschen und Signalstörungen zu minimieren, werden die Messsignale mit einem Bandpassfilter gefiltert. Die untere und obere Grenze des Filters wird

dabei anhand der Anregefrequenz und der verwendeten Periodenanzahl des Sendesignals gewählt.

Im nächsten Schritt werden die relevanten Signalbereiche – unterschiedliche Moden bei unterschiedlichen Frequenzen – aus den Messsignalen extrahiert.

Für das Annähern des Messsignals durch ein propagiertes Signal wird noch ein Ausgangssignal für die Berechnung benötigt. Dabei kann entweder das beim Senden verwendete Signal – Hanning gefensterter Sinusburst – oder ein Referenzsignal verwendet werden. Das Referenzsignal kann dabei z.B. das Messsignal sein, bevor es zu einem Schichtwachstum gekommen ist.

Im 5. Schritt werden die Frequenzanteile des zu propagierenden Signals anhand der gemessenen Frequenzanteile der im 3. Schritt extrahierten Wellengruppen korrigiert. Damit können Signalverzerrungen, wie sie z.B. durch die frequenzabhängige und modenabhängige Übertragungsfunktion der Ultraschallwandler entstehen, teilweise kompensiert und somit die Genauigkeit des Algorithmus erhöht werden. Für jedes Messsignal ergibt sich somit ein darauf angepasstes zu propagierendes Signal.

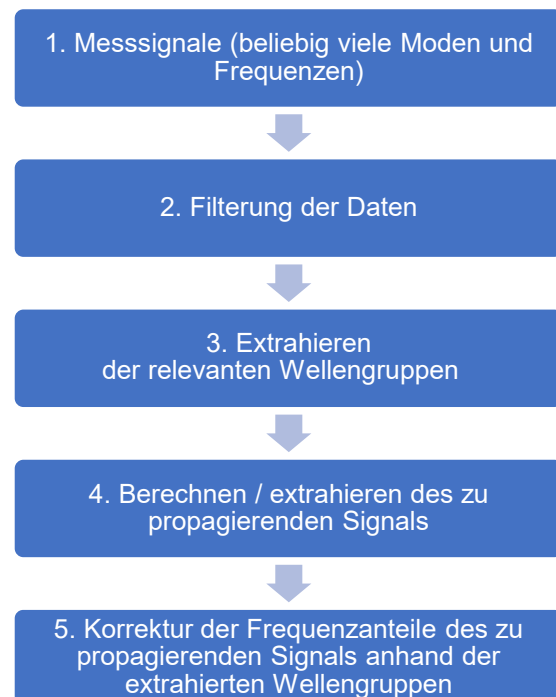


Abb. 2: Datenvorverarbeitung für den Optimierungsalgorithmus

Die vorverarbeiteten Daten werden anschließend dem Optimierungsalgorithmus übergeben. Der zyklische Durchlauf des Algorithmus ist in Abb. 3 dargestellt. Basierend auf den Startparametern und des vorliegenden Messsystems wird ein Dispersionsdiagramm berechnet. Die Berechnung erfolgt mit der Spectral Collocation Method (SCM). Im Unterschied zu Nullstellenverfahren, wie die Global Matrix Method (GMM), findet die SCM immer alle existierenden Moden und ermöglicht somit eine vollautomatisierte Berechnung der Dispersionsdiagramme für variierende Materialeigenschaften und Schichtdicken.

Dabei wird im Algorithmus zwischen Ein- und Mehrschichtsystemen mit und ohne Fluidbelegung von Rohren und Platten unterschieden [3,4,5].

Mit dem so berechneten Dispersionsdiagramm wird, das im Schritt 5 der Datenvorverarbeitung erzeugte Signal propagiert. Propagiert bedeutet hierbei, dass die dispersionsbedingte Signalveränderung bei der Ausbreitung einer geführten akustischen Welle simuliert wird. Dies lässt sich mit der Formel (1) realisieren [6].

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i(k(\omega)x - \omega t)} d\omega \quad (1)$$

Dabei ist  $F(\omega)$  die schnelle Fourier-Transformation (fast Fourier transform, FFT) des zu propagierenden Signals,  $k(\omega)$  die mittels der SCM für die jeweilige Mode berechnete frequenzabhängige Wellenzahl und  $x$  die zu propagierende Distanz, die dem Abstand zwischen Sender- und Empfängerpiezo entspricht. Das propagierte Signal  $u(x, t)$  kann dabei mittels der inversen Fouriertransformation berechnet werden.

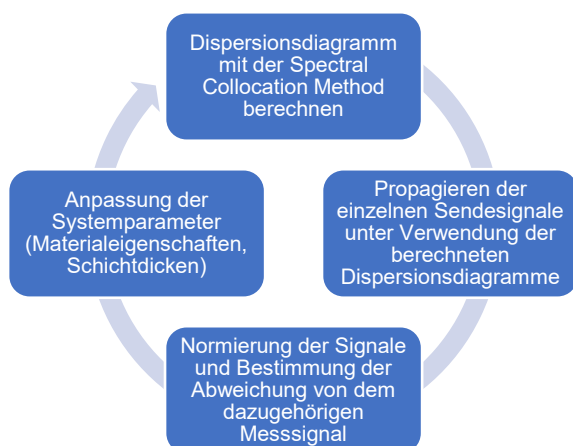


Abb. 3: Programmablaufplan des Algorithmus zur Berechnung der Materialeigenschaften und Schichtdicken

Dieser Schritt wird für jedes zu propagierendes Signal wiederholt, wodurch sich die gleiche Anzahl an propagierten Signalen, wie Messsignale ergeben.

Bevor das propagierte Signal mit dem dazugehörigen Messsignal verglichen wird, werden beide jeweils mit ihrer Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung von der Nulllinie normiert. Anschließend wird die mittlere quadratische Abweichung des propagierten Signals zum jeweiligen Messsignal bestimmt. Das Minimum der summierten Abweichung der einzelnen Signale ist dabei die zu optimierende Größe.

Bevor der nächste Zyklus beginnt, werden die für die Berechnung des Dispersionsdiagramms verwendeten Materialeigenschaften und Schichtdicken variiert. Durch dieses Vorgehen wird das berechnete Dispersionsdiagramm so lange iterativ angepasst, bis es die experimentell bestimmten Messdaten ausreichend genau nachbilden kann und somit ein Abbruchkriterium der Optimierung erreicht wird.

### Simulationen

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Algorithmus sowie der Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Startparametern bei der Optimierung wurden Simulationen in COMSOL Multiphysics durchgeführt. Simuliert wurde die zweidimensionale Wellenausbreitung auf einer 1,5 mm dicken und 250 mm langen Aluminiumplatte mit einem E-Modul von 68 GPa, einer Poissonzahl von 0,35 und einer Dichte von 2700 kg/m<sup>3</sup>. Im zweiten Schritt wurde die Simulation der Aluminiumplatte um eine einseitige Schichtbelegung erweitert. Dabei wurde ein E-Modul von 3,3 GPa, eine Poissonzahl von 0,38 und eine Dichte von 1200 kg/m<sup>3</sup> verwendet und Schichtdicken von 200 µm, 400 µm, 600 µm und 800 µm simuliert. Die Materialeigenschaften sind vergleichbar mit einer Epoxidharzschicht. Die Anregung der A0-Mode der Lambwelle erfolgte über eine antisymmetrische, die der S0-Mode über eine symmetrische Verschiebung der zwei Plattenkanten auf einer Seite der Platte. Als Anregesignal wurde ein 300 kHz Hanning gefensterter 5-fach Sinusburst mit 5 Schwingungsperioden verwendet. Ausgewertet wurde die Oberflächenauslenkung der Schicht abgewandten Seite in einem Abstand von 100 mm und 150 mm von der Anregeposition.

### Experimentelle Untersuchungen

Das simulierte Modell einer Platte mit Schichtbelegung wurde zudem in einem Experiment umgesetzt. Die experimentell und anhand von Datenblättern ermittelten Materialeigenschaften sind die im Abschnitt

Simulation genannten. Die mit einer Messschraube gemessene Dicke der Aluminiumplatte betrug 1,465 mm. Die Länge und Breite jeweils 1000 mm. Als im Plattenzentrum gelegene Messstrecke wurden zwei Scheibenpiezos mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Dicke von 0,5 mm aus dem Material PIC255 der Firma PICeramic, die in einem Abstand von 297 mm mit dem UHU Plus Schnellfest Zweikomponentenkleber aufgeklebt wurden, verwendet. Als Schicht wurde das 3D Druck Harz Aqua Gray der Firma Phrozen verwendet. Die Schicht wurde auf der piezoabgewandten Seite, mit einem Metallrakel gleichmäßig aufgebracht und anschließend unter UV-Licht ausgehärtet. Bevor die zweite, dickere Schicht aufgebracht wurde, wurde zuerst die erste Schicht entfernt, um mögliche Einflüsse einer unvollständigen Schichtverbindung zu verhindern. Die jeweilige Schichtdicke wurde nach der Messung durch das Ablösen der Schicht und Vermessen mit einer Messschraube bestimmt und betrug 415  $\mu\text{m}$  bzw. 780  $\mu\text{m}$ . Als Anregesignal wurde ein Hanning gefensterter 5-fach Sinusburst mit 5 Schwingungsperioden, 10  $V_{pp}$  und Frequenzen zwischen 100 kHz und 300 kHz verwendet, der mit einem Agilent 33521B Funktionsgenerator erzeugt wurde. Die Messdatenaufnahme erfolgte mit einem LeCroy HDO6034 Oszilloskop.

### Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Schritt wurden die Simulationsdaten der Aluminiumplatte ohne Schicht ausgewertet und dabei die Anzahl der zu optimierenden bzw. unbekannt Parameter sowie die Startwerte für den Optimierer variiert. Durch die simulierte, ideale Anregung der Platte durch eine vorgegebene Verschiebung sind die Ergebnisse der Auswertung von den beiden Punkten zueinander, dem Verwenden eines Referenzsignals oder des idealen Anregesignals und einem einzelnen Punkt nahezu identisch. Durch die über weite Frequenzbereiche gute Übereinstimmung der Dispersionsdiagramme – siehe Abb. 1 – und damit auch dem Verhalten von geführten akustischen Wellen auf Platten und Rohren lassen sich die durchgeführten Simulationen und Experimente auch auf Rohrsysteme übertragen. In diesem Beitrag wurde sich aufgrund des erschwerten Aufbringens einer definierten Schicht im Inneren von Rohren auf Experimente und dazu passend auch auf Simulationen mit Platten konzentriert. Die Ergebnisse der Auswertung der zwei Punkte – Abstand von 100 mm bzw. 150 mm von der Anregeposition – zueinander sind in Tab. 1 dargestellt. In dieser, wie auch bei allen folgenden Tabellen sind die Ergebnisse des Algorithmus als Zahlenwert eingetragen. Leere

Felder stehen für Parameter, die vorgegeben und somit als bekannt angenommen wurden. Die nummerierten Spalten unterscheiden sich durch die ausgewerteten Moden, die gewählten Startparameter bzw. der Anzahl an zu optimierenden Parametern. Die Startparameter wurden dabei um  $\pm 20\%$  um den tatsächlichen Wert variiert. Als unteres Optimierungslimit wurde 50% und als oberes Limit 200% des tatsächlichen Wertes verwendet. Die Startparameter für das E-Modul wurden somit beispielhaft zwischen 54,4 GPa und 81,6 GPa variiert und der Optimierer konnte zwischen 34 GPa und 136 GPa nach einem Minimum suchen.

Wie in der Tabelle zu sehen ist, konnte der Algorithmus die Materialdicke bei allen ausgewerteten Fällen eindeutig bestimmen. Bei der 1. Spalte wurde abweichend zu den anderen drei Spalten nur die A0-Mode bei der Berechnung berücksichtigt. Dabei konnten geringe Abweichungen bei der Poissonzahl und Materialdicke beobachtet werden. Durch das zusätzliche Auswerten der S0-Mode und den damit einhergehenden Informationsgewinn ist diese Abweichung nicht mehr aufgetreten. Auffällig sind die starken Unterschiede von E-Modul und Dichte bei Spalte 2 und 3, die sich lediglich in den gewählten Startparametern unterscheiden. Die Ursache hierfür lässt sich bei der Abhängigkeit des Dispersionsdiagramms von den vier Größen – E-Modul, Poissonzahl, Dichte und Plattendicke – finden. Wird das E-Modul und die Dichte um den gleichen Faktor verändert, bei konstanter Poissonzahl und Plattendicke, erhält man ein identisches Dispersionsdiagramm. Entsprechend gibt es eine unendliche Anzahl von Lösungen des Optimierungsproblems. Erst durch die Vorgabe einer der beiden Parameter, wie bei Spalte 4 die Dichte, ergibt sich ein eindeutiges Ergebnis.

Tab. 1: Ergebnisse des Algorithmus für eine 1,5 mm dicke, simulierte Aluminiumplatte

Nr.	1	2	3	4
$E_p$ (GPa)	74,40	75,10	65,03	68,00
$\nu_p$	0,351	0,350	0,350	0,350
$\rho_p$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2953	2982	2582	
$d_p$ (mm)	1,499	1,500	1,500	1,500

Die Ergebnisse für eine einseitige, 400  $\mu\text{m}$  dicke Schichtbelegung sind in Tab. 2 zu sehen. Die starke Variation des E-Moduls und der Dichte der Platte bei unterschiedlichen Startparametern konnte nicht mehr beobachtet werden. Der Einfluss der zusätzlichen Schicht sorgt dafür, dass es keine unendliche Anzahl an möglichen Kombinationen mehr gibt. Die Parameter können somit eindeutig bestimmt werden.

Dennoch werden die simulierten Parameter nicht exakt berechnet und es gibt eine Abhängigkeit von den gewählten Startparametern. Dies lässt sich ebenfalls auf die hohe Anzahl an Freiheitsgraden zurückführen, die eine Vielzahl an möglichen Parameterkonfigurationen ermöglicht, mit denen sich das gemessene Signal annähern lässt. Die Anzahl an möglichen Parameterkonfigurationen, mit denen das Signal ausreichend genau angenähert werden kann, lässt sich dabei durch zwei Möglichkeiten reduzieren. Die erste ist das Reduzieren der Freiheitsgrade. Dies kann durch die Vorgabe von bekannten oder angenommenen Parametern erfolgen. Diese können z.B. aus Datenblättern entnommen oder durch zusätzliche Messungen bestimmt werden. Die zweite Möglichkeit ist die Erhöhung der Informationen für den Algorithmus. Dies kann durch das Auswerten von mehreren Signalen mit unterschiedlichen Frequenzen oder das Einbeziehen von weiteren Moden erfolgen. So unterscheiden sich auch hier Spalte 1 und 2 nur darin, dass bei der Spalte 1 nur die A0-Mode und bei der Spalte 2 die A0- und S0-Mode ausgewertet wurde. Durch das Einbeziehen der zweiten Mode wird die Poissonzahl annähernd richtig berechnet und auch die Abweichung der Aluminiumplattendicke nimmt stark ab. In den Spalten 3 und 4 wird neben der Auswertung von zwei Moden auch die Anzahl der Freiheitsgrade durch die Vorgabe von einigen Materialeigenschaften reduziert. Dadurch ist es in der 4. Spalte möglich die Materialeigenschaften und Schichtdicken exakt zu bestimmen.

So kann z. B. durch Referenzmessung und somit bekanntem Grundmaterial und bekannter Schichtbelegung, die Schicht (Spalte 4) sehr gut bestimmt werden. Aber auch bei unbekanntem Schichtparametern, lässt sich zumindest die Schichtdicke bis auf ca. 20  $\mu\text{m}$  (Spalte 1 und 2) genau bestimmen, was im Fall von Ultraschalldurchflussmessgeräten die Genauigkeit verbessert. Ob auch die Schichteigenschaften relevant sind, muss dann vom späteren Anwendungsfall her unterschieden werden.

Mit Hilfe der Simulationen konnte nicht nur die Funktionsfähigkeit des Algorithmus überprüft, sondern auch die Empfindlichkeit auf Startparameter und auf die Anzahl der zu optimierende Parameter untersucht werden. Weitere Einflussfaktoren wie das Schwingungsverhalten des Piezos, Fertigungstoleranzen oder auch Signalstörungen müssen jedoch experimentell untersucht werden. Wie zuvor beschrieben, wurde die Simulation durch ein Experiment

nachgestellt und die dabei aufgenommenen Messdaten ausgewertet.

Tab. 2: Ergebnisse des Algorithmus für eine 1,5 mm dicke, simulierte Aluminiumplatte mit einer 400  $\mu\text{m}$  dicken, einseitigen Schichtbelegung

Nr.	1	2	3	4
$E_p$ (GPa)	66,17	66,40		
$\nu_p$	0,256	0,348		
$\rho_p$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2707	2611		
$d_p$ (mm)	1,563	1,492	1,501	1,500
$E_s$ (GPa)	3,766	3,729	3,274	3,305
$\nu_s$	0,318	0,359	0,384	0,380
$\rho_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1210	1215	1218	
$d_s$ (mm)	0,381	0,420	0,394	0,400

Neben den Ergebnissen soll hierbei noch einmal kurz auf die Funktionsweise des Algorithmus sowie die vom Algorithmus verwendeten Daten eingegangen werden.

In Abb. 4 oben ist das Messsignal zu erkennen. Der extrahierte Bereich der A0-Mode ist orange eingefärbt. Rotgestrichelt ist das korrigierte Anregesignal dargestellt. Wie in der Abbildung unten zu erkennen, kann das elektrisch Anregesignal nicht als Ausgangspunkt für die Propagation genommen werden. Durch die Eigenschaften der Piezokeramik zeigt sich eine leichte Frequenzverschiebung nach links. Für die Anwendung des Algorithmus ist es notwendig das tatsächliche Anregesignal mit den darin enthaltenen Frequenzanteilen zu verwenden, weshalb die elektrische Anregung um die Abweichung zu dem gemessenen Signal korrigiert werden muss.

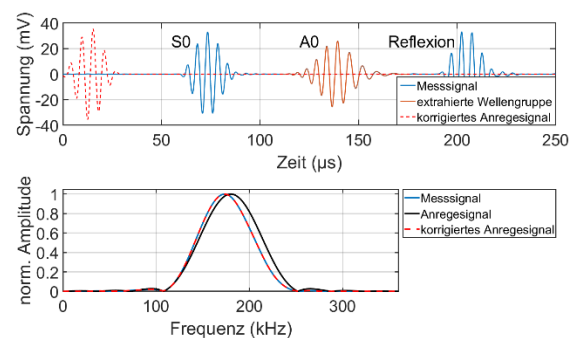


Abb. 4: Aufgenommenes Messsignal bei einer Anregungsfrequenz von 180 kHz und Auswertung der A0-Mode

In Abb. 5 sind oben beispielhaft für 120 kHz, 180 kHz und 240 kHz die aus den experimentell aufgenommenen Messdaten extrahierten Signalanteile blau dargestellt. Ausgewertet wurde die A0- und S0-Mode. Orange überlagert ist das im aktuellen Optimierungszyklus

berechnete Signal, das bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zeigt. Im darunterliegenden Balkendiagramm sind die Startparameter blau und die im aktuellen Optimierungszyklus verwendeten Parameter orange dargestellt. Die schwarze Linie zwischen den beiden Balken zeigt die untere und obere Parametergrenze und damit den Bereich, in dem sich der Optimierungsalgorithmus bewegen kann.

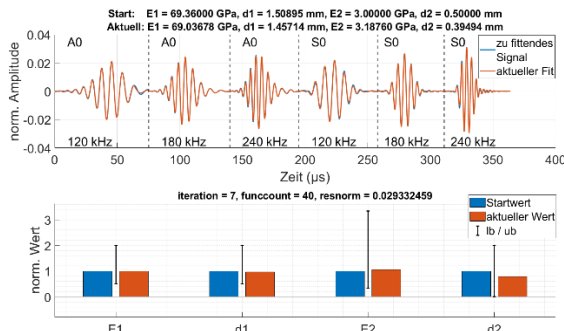


Abb. 5: oben: Überlagerung der zu fittenden Signale mit dem im aktuellen Berechnungsschritt berechneten Signale, unten: Darstellung der Startparameter, der im aktuellen Berechnungsschritt verwendeten Parameter und der unteren und oberen Parametergrenzen

Die experimentellen Ergebnisse für die Aluminiumplatte sind in Tab. 3 zusammengefasst. Hierbei zeigt sich, dass die Materialdicke zuverlässig bestimmt werden kann, während die Materialeigenschaften, je nach festgehaltenem Parameter, unterschiedlich stark abweichen. Dies ist vor allem auf den bei den simulierten Daten bereits erwähnten Zusammenhang zwischen E-Modul und Dichte zurückzuführen.

Tab. 3. Ergebnisse des Algorithmus für eine 1,465 mm dicke Aluminiumplatte

Nr.	1	2	3	4
$E_P$ (GPa)	74,96	73,45	61,91	68,01
$\nu_P$	0,362			
$\rho_P$ (kg/m <sup>3</sup> )	3003	2916	2458	
$d_P$ (mm)	1,468	1,464	1,464	1,464

In Tab. 4 und Tab. 5 sind die Ergebnisse des Algorithmus für die Aluminiumplatte mit einer 415 µm bzw. 780 µm dicken, einseitigen Schichtbelegung zusammengefasst. Bei der Auswertung wurde das Messsignal ohne Schichtbelegung als Referenzsignal verwendet und so die Genauigkeit des Algorithmus erhöht. In den Spalten 1 und 2 ist eine deutliche Überschätzung der Dicke der aufgetragenen Harzschicht zu erkennen, wohingegen die Dichte unterschätzt wird. Erst durch das

Vorgeben von einigen Materialeigenschaften lässt sich diese Abweichung reduzieren. Sobald die Daten vorgegeben werden findet eine Unterschätzung der Schichtdicke statt, welche mit zunehmender Schichtdicke größer wird.

Tab. 4. Ergebnisse des Algorithmus für eine 1,5 mm dicke Aluminiumplatte mit einer 415 µm dicken, einseitigen Schichtbelegung

Nr.	1	2	3	4
$E_P$ (GPa)	69,10	69,65		
$\nu_P$				
$\rho_P$ (kg/m <sup>3</sup> )				
$d_P$ (mm)	1,423	1,437		
$E_S$ (GPa)	4,142	4,159	2,462	3,254
$\nu_S$				
$\rho_S$ (kg/m <sup>3</sup> )	987		1014	
$d_{S415}$ (mm)	0,516	0,444	0,395	0,352

Tab. 5. Ergebnisse des Algorithmus für eine 1,5 mm dicke Aluminiumplatte mit einer 780 µm dicken, einseitigen Schichtbelegung

Nr.	1	2	3	4
$E_P$ (GPa)	66,75	71,15		
$\nu_P$				
$\rho_P$ (kg/m <sup>3</sup> )				
$d_P$ (mm)	1,442	1,405		
$E_S$ (GPa)	2,411	4,042	2,541	3,307
$\nu_S$				
$\rho_S$ (kg/m <sup>3</sup> )	757		1028	
$d_{S780}$ (mm)	0,842	0,789	0,696	0,657

Als mögliche Ursache wird das nicht bekannte Schwingungsverhalten der Piezokeramik gesehen, wodurch es sowohl beim Senden als auch beim Empfangen zu einer Phasenverschiebung kommt. Auch können Wellenanteile gegebenenfalls nicht korrekt durch die Piezokeramik aufgenommen werden. So ist es möglich, dass die Scheranteile der Welle nicht vollständig detektiert werden. Dadurch kommt es zu einer Abweichung in den Amplituden der Wellengruppe, was wiederum zu einem Fehler im Algorithmus führt. Auch ist es denkbar, dass die Zunahme der Schichtdicke und dadurch der Masse oberhalb des Schallwandlers beim Senden zu einer Verzerrung des angeregten Signals führt. Diese Faktoren könnten durch direkte Messung des Schwingverhaltens der Piezokeramik herausgerechnet werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, durch die Auswertung von geführten akustischen Wellen, die Materialeigenschaften von Festkörpern und die Schichteigenschaften einer darauf aufgetragenen Schicht zu bestimmen. So ist es möglich Schichtinformation dort zu erhalten, wo andere Messmethoden nicht mithalten können, z. B. im Inneren von Rohrsystemen. Bei bekannten Materialeigenschaften konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Schichtdicken mit einer Genauigkeit von  $\pm 20\%$  zu bestimmen. Anhand der großen Freiheitsgrade ist die Bestimmung der Materialeigenschaften noch herausfordernd. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Schichtdicke eine größere Abweichung zur tatsächlichen Schichtdicke entsteht. Zur Optimierung dieses Messprinzips sind weitere Untersuchungen notwendig. So kann eine Ursache der Abweichung von den theoretischen Modellen das Schwingungsverhalten des piezoelektrischen Schallwandlers sein. Das elektrische Signal wird nicht 1:1 in eine Schwingung umgesetzt und umgekehrt. Es entsteht eine Phasenverschiebung der emittierten und empfangenen Welle, die bisher nicht korrigiert wurde. Auch der Einfluss der Schichtbelegung auf das Schwingungsverhalten des Schallwandlers wurde bisher nicht berücksichtigt. Zukünftig soll die Auswertung durch direkte Messung der Schwingungseigenschaften der Piezokeramik weiter optimiert werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim gesamten ISAT-Team, vor allem bei Sandra Ebert, und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK), welcher das Projekt im Rahmen des Zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand (ZIM) (FKZ: ZF4512404LT9, Projekt NiNAA) gefördert hat.

## Literaturnachweis

- [1] Sabrina Tietze, Ferdinand Singer, Sandra Lasota, Sandra Ebert, Johannes Landskron, Katrin Schwuchow, Klaus Stefan Drese und Gerhard Lindner: Monitoring of Soft Deposition Layers in Liquid-Filled Tubes with Guided Acoustic Waves Excited by Clamp-on Transducers. *Sensors* 2018, 18(2), 526; doi: 10.3390/s18020526
- [2] Johannes Landskron, Florian Dötzer, Andreas Benkert, Michael Mayle, Klaus Stefan Drese : Acoustic Limescale Layer and Temperature Measurement in Ultrasonic Flow Meters. *Sensors* 2022, 22(17), 6648, doi: 10.3390/s22176648
- [3] Viktor Firuschin, Felix Brand, Alexander Backer, Klaus Stefan Drese : Elastic Properties Measuremen Using Guided Acoustic Waves. *Sensors* 21(19): 6675 (2021); doi: 10.3390/s21196675[4] Daniel A. Kiefer, Michael Ponschab, Stefan J. Rupitsch, Michael Mayle; Calculating the full leaky Lamb wave spectrum with exact fluid interaction. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 June 2019; 145 (6): 3341–3350; doi: 10.1121/1.5109399
- [5] F. Hernando Quintanilla, M. J. S. Lowe, R. V. Craster; Modeling guided elastic waves in generally anisotropic media using a spectral collocation method. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 March 2015; 137 (3): 1180–1194; doi: 10.1121/1.4913777
- [6] Wilcox, P.D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 2003, 50, 419–427; doi: 10.1109/TUFFC.2003.1197965