

Verbesserung der Signalauswertung bei der Untersuchung mehrschichtiger Strukturen mit Annular-Arrays

Mario Wolf¹, Sebastian Kümritz¹, Elfgard Kühnicke¹

¹ TU Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01069 Dresden, E-Mail: mario.wolf@tu-dresden.de

1 Einleitung

Bei klassischen Ultraschallmessverfahren wird lediglich die Laufzeit des reflektierten Signals ausgewertet und entweder die Dicke oder die Schallgeschwindigkeit einer Schicht als bekannt angenommen, um aus der Laufzeit die andere Größe zu bestimmen. Eine gleichzeitige Bestimmung beider Größen ist derzeit nur mit tomographischen Verfahren möglich, die mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand verbunden sind. Gust [1] stellte ein Verfahren vor, das es ermöglicht, beide Größen einer einschichtigen Probe mit einem stark fokussierenden Mikroskopieschallkopf zu bestimmen. Dabei wird der Schallkopf senkrecht zur Probenoberfläche verschoben und die Amplitude von Vorder- und Rückwandecho als Funktion der Schallkopfposition aufgenommen. Das jeweilige Echo ist am größten, wenn der Fokus auf der reflektierenden Grenzfläche liegt. Mit der Verschiebung zwischen den Positionen, an denen Vorder- bzw. Rückwandecho am stärksten sind, und der Laufzeit zwischen den Grenzflächen stehen zwei unabhängige Messgrößen zur Verfügung, die es erlauben, Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit gleichzeitig zu bestimmen. In [2,3] wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem Dicken und Schallgeschwindigkeiten zweischichtiger Strukturen mit Hilfe eines Annular-Arrays an einer festen Position bestimmt werden. Dabei werden die Ansteuerzeiten der Elemente variiert und die Signalenergie in Abhängigkeit von der eingestellten Fokussierung ausgewertet.

Mit einem Annular-Array (Struktur und Maße siehe Abbildung 1) wurden Platten aus Stahl und Aluminium nach einem Wasservorlauf von 20 mm vermessen. Mit jedem Element wurde einzeln gesendet und auf allen Elementen empfangen. Typische Empfangssignale zeigt Abbildung 2. Dabei entspricht s_{ij} dem von Element i gesendeten und von Element j empfangenen Signal.

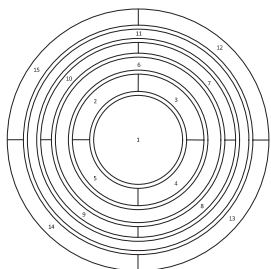


Abbildung 1: Struktur und Maße des verwendeten Annular-Array (einige Elemente sind zur Justage in Segmente unterteilt); Mittenfrequenz: 6 MHz;
 r_i : Innenradius r_a : Außenradius

Element	r_i [mm]	r_a [mm]
1	-	2,24
2	2,44	3,31
3	3,51	4,16
4	4,36	4,90
5	5,10	5,57
6	5,77	6,58

Die in [2], [3] vorgestellte Auswertung wird erschwert, da zusätzlich Signalanteile auftreten, die mit den Signalanteilen,

die die Nutzinformation enthalten, interferieren. Abbildung 2 zeigt die Signale beim Senden und Empfangen mit dem Zentralelement s_{11} bzw. dem ersten, zweiten und dritten Ring s_{22} , s_{33} , s_{44} . Das Signal des Zentralelements ist deutlich kürzer als die Signale der Ringe. s_{44} zeigt bereits deutlich die zwei Signalanteile, sodass zu vermuten ist, dass auch die Signale auf den anderen Ringen aus zwei Anteilen, die sich nicht klar trennen lassen, bestehen.

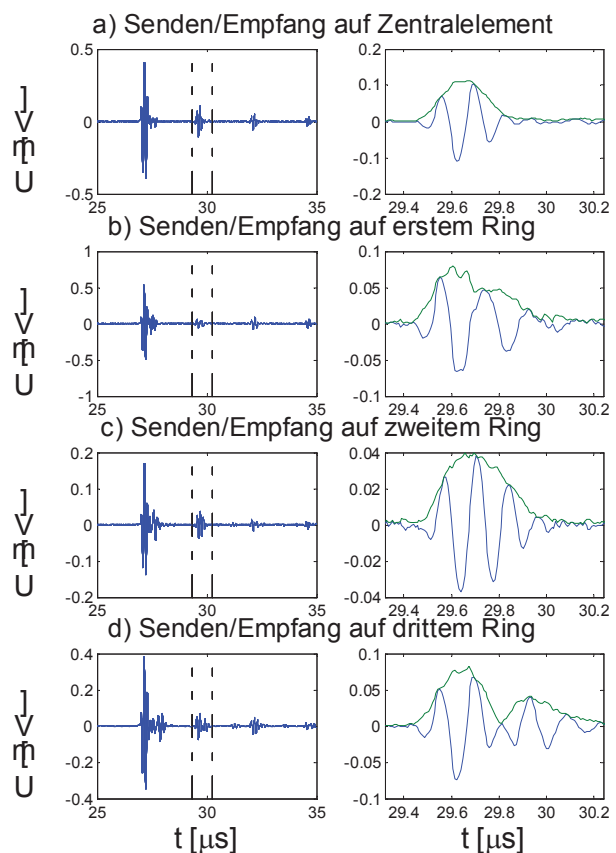


Abbildung 2: Echosignale vom: Zentralelement a), ersten Ring b), zweiten Ring c) und dritten Ring d); links: gesamtes aufgenommenes Echo, rechts: Vergrößerung des ersten Rückwandechos.

Obwohl bei der Schallausbreitung ihr Wellencharakter berücksichtigt werden muss, lassen sich die beiden Signalanteile geometrisch sehr gut interpretieren und zwei Laufwegen zuordnen (Abbildung 3 oben). Wenn mit nur einem Ring gesendet und empfangen wird, ergeben sich zwei Laufwege: ein kurzer, bei dem der Schall senkrecht auf die Grenzfläche trifft, entsprechend senkrecht reflektiert wird, und am gleichen Punkt des Wandlers wieder ankommt. Der zweite Laufweg resultiert aus einer schrägen Abstrahlung, Brechung an der ersten Grenzfläche, Reflexion

an der 2. Grenzfläche nahe der akustischen Achse des Wandlers und einem Rückweg zur gegenüberliegenden Seite des Rings. Auch beim Senden und Empfangen mit unterschiedlichen Ringen lassen sich zwei Laufwege zuordnen (Abbildung 3 unten).

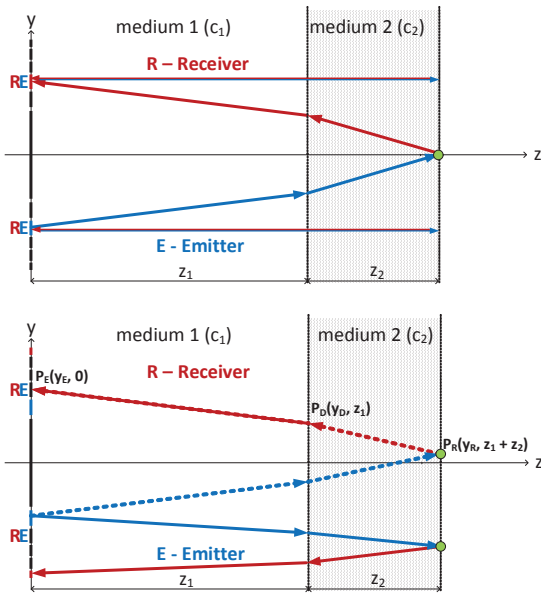


Abbildung 3: geometrische Interpretation der Schalllaufwege

Aufgrund dieser Betrachtungen ist es naheliegend, die in [2,3] gesuchten, „korrekten“ Verzögerungszeiten direkt aus den Signalen zu bestimmen, um aus diesen mithilfe eines Modells direkt auf Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit schließen zu können.

2 Methoden

Zur Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit werden die Laufzeitdifferenzen zwischen den einzelnen Signalanteilen bestimmt und dann als Eingangsgrößen für ein inverses geometrisches Modell genutzt.

2.1 Signaltrennung

Wie Abbildung 2 zeigt, interferieren die Signalanteile bei einigen Kombinationen von Senden und Empfang. Lediglich beim Zentralelement tritt nur ein (senkrechter) Signalanteil auf. Dieser kann als Referenzsignal für die Signaltrennung genutzt werden, sodass kein externes Referenzsignal vor der Messung bereitgestellt werden muss. Zunächst werden die analytischen Signale mit Hilfe der Hilberttransformation gewonnen:

$$\underline{s}_{ij}^H(t) = s_{ij}(t) + H(s_{ij}(t)) = s_{ij}(t) + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_{ij}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

Durch Betragsbildung lässt sich die Einhüllende dieses Signals bestimmen. Als Zeitfenster für das Referenzsignal s_{11} wurde der Bereich gewählt, in dem die Einhüllende größer als -18dB bzgl. ihres Maximums ist. Um winzige Laufzeitunterschiede auszugleichen, wird die Phasendifferenz zwischen den Signalen bestimmt und das Referenzsignal entsprechend phasengedreht. Abschließend

wird der Realteil der Differenz von analysiertem und phasengedrehtem Referenzsignal bestimmt und man erhält das Differenzsignal:

$$s_{ij}^D(t) = \Re \left[\underline{s}_{ij}^H(t) - \underline{s}_{11}^H(t) e^{j(\arg(s_{ij}^H(t)) - \arg(s_{11}^H(t)))} \right] \quad (2)$$

Die Ergebnisse sind für die eingangs bereits gezeigten Signale in Abbildung 4 dargestellt:

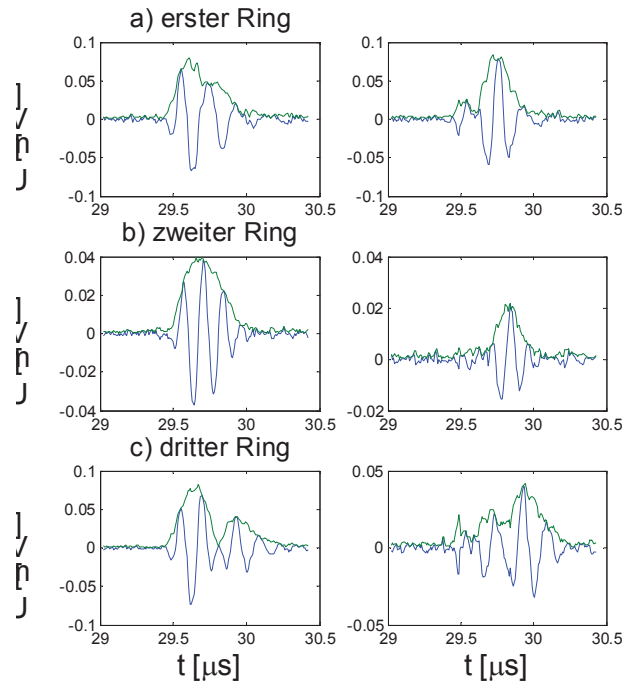


Abbildung 4: Signaltrennung beim ersten Ring a), zweiten Ring b) und dritten Ring c); links: Originalsignal, rechts: Differenzsignal

2.2 Geometrisches Modell

Auch wenn geometrische Strahlenmodelle die Schallausbreitung nur ungenügend beschreiben, sollen diese zunächst genutzt werden, da sie es ermöglichen, einen direkten funktionalen Zusammenhang zwischen Laufzeitdifferenz und Schichtdicke sowie Schallgeschwindigkeit aufzustellen. Die Laufzeit zwischen 2 Elementen beträgt

$$t = 2 \frac{\sqrt{(y_E - y_D)^2 + z_1^2}}{c_1} + 2 \frac{\sqrt{(y_D - y_R)^2 + z_2^2}}{c_2} \quad (3)$$

$$\text{mit } y_E = r_i, \quad y_R = (r_i + r_j)/2 \quad (4)$$

r_i und r_j sind die mittleren Radien der Elemente i und j , z_1 und c_1 die (bekannte) Dicke und Schallgeschwindigkeit der ersten Schicht, z_2 und c_2 die (unbekannte) Dicke und Schallgeschwindigkeit der untersuchten Schicht. Auch die Koordinate y_D des Punktes P_D ist nicht bekannt. Diese kann aus dem Fermat'schen Prinzip gewonnen werden, was zu einem Polynom 4. Grades führt

$$y_D^4 - 2 y_E y_D^3 + (y_E^2 + \frac{c_1^2 z_1^2 - c_2^2 z_2^2}{c_1^2 - c_2^2}) y_D^2 - 2 \frac{c_1^2}{c_1^2 - c_2^2} y_E z_1^2 y_D + c_1^2 y_E^2 \frac{z_1^2}{c_1^2 - c_2^2} = 0 \quad (5)$$

Unter bestimmten Bedingungen kann für dieses eine explizite Lösung gefunden werden. U.a. muss gelten: $c_1 < c_2$ und $r_i \geq r_j$, was ohne Einschränkungen erfüllbar ist, da gilt:

$t_{ij} = t_{ji}$. Durch die Laufzeit T zwischen Oberflächen- und Rückwandecho sind außerdem z_2 und c_2 miteinander verbunden und z_2 kann durch $z_2 = c_2 T/2$ ersetzt werden:

$$t_{ij} = f(c_2) = 2 \frac{\sqrt{[y_{E,ij} - y_D(c_2)]^2 + z_1^2}}{c_1} + 2 \frac{\sqrt{[y_D(c_2) - y_{R,ij}]^2 + (c_2 T/2)^2}}{c_2} \quad (6)$$

wobei t_{ij} eine Funktion der (einzigen unbekannt) Variablen c_2 ist. Diese modellbasierte Laufzeit kann nun mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit den gemessenen Laufzeitdifferenzen verknüpft werden.

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\Delta t_{ij} - (t_{ij}(c_2) - t_{11}(c_2)))^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

Nachdem so die Schallgeschwindigkeit bestimmt wurde, erhält man auch direkt die Schichtdicke.

3 Ergebnisse

Messungen wurden an Platten aus Stahl bzw. Aluminium mit Dicken von 6 mm bis 14 mm durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die bestimmten Laufzeitdifferenzen beim Senden und Empfang mit dem gleichen Element für unterschiedliche Proben. Die Differenzen, die aus der Signaltrennung gewonnen wurden (*signal*), werden mit denen verglichen, die sich aus dem geometrischen Modell (bei gegebener Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit) ergeben müssten (*model*).

Abgesehen von Δt_{22} weichen die gemessenen Werte um maximal 20% von den modellierten ab. Einige Werte von Δt_{66} sind nicht plausibel, da die Differenz mit dem Elementindex ansteigen muss. Diese unplausiblen Werte sollten für die Auswertung nicht genutzt werden. Tabelle 2 vergleicht die bestimmten Dicken und Schallgeschwindigkeiten, wenn alle 35 Werte verwendet werden (c_{all}, d_{all}) und wenn nur plausible Werte auf der Hauptdiagonale ausgewertet werden (c_{sel}, d_{sel}).

Tabelle 2: Bestimmte Schichtdicken und Schallgeschwindigkeiten

Material	Stahl, c = 5920 m/s			
d [mm]	6	8	10	14
c _{all} [m/s]	6839	5023	5175	5010
d _{all} [mm]	5,19	9,43	11,44	16,54
c _{sel} [m/s]	5830	5600	5879	5900
d _{sel} [mm]	6.09	8.46	10.07	14.05
Material	Aluminium, c = 6417 m/s			
d [mm]	6	8	10	14
c _{all} [m/s]	7685	5533	4886	-
d _{all} [mm]	5,01	9,28	13,13	-
c _{sel} [m/s]	6442	6012	6142	5682
d _{sel} [mm]	5.98	8.54	10.45	15.81

4 Diskussion und Ausblick

Die Hauptursache für die Abweichungen, die in Tabelle 2 zu sehen sind, ist das verwendete geometrische Modell. Das sich aus dem Fermat'schen Prinzip ergebende Brechungsgesetz gilt nur für ebene Wellen und somit nur für unendlich ausgedehnte Wandler. Die tatsächlichen Brechungswinkel und damit die korrekten Laufzeiten erhält man nur mit einem wellenbasierten Modell.

Außerdem zeigt Tabelle 2, dass die Ergebnisse bei einer Selektion der Verzögerungszeiten deutlich besser werden. Die Ursache für die großen Abweichungen bei Δt_{22} ist, dass die zu bestimmende Laufzeitdifferenz im Bereich der Wellenlänge liegt. In [1] wurde bereits gezeigt, dass eine Signaltrennung für derart kleine Differenzen nicht möglich ist. Die Beschränkung auf die Diagonalelemente ist hilfreich, da die Reflexion beim Senden und Empfang mit unterschiedlichen Elementen außerhalb der akustischen

Tabelle 1: Vergleich der Laufzeitdifferenzen aus Messungen und aus dem geomtrischen Modell

	d [mm]	Δt_{22} [ns]		Δt_{33} [ns]		Δt_{44} [ns]		t_{55} [ns]		t_{66} [ns]	
		signal	model	signal	model	signal	model	signal	model	signal	model
Stahl, c = 5920 m/s	6	129	97	192	197	333	299	398	405	191	548
	8	107	83	196	168	296	256	375	347	474	471
	10	107	72	182	147	191	224	299	304	418	413
	14	106	58	123	117	193	179	231	243	321	332
Alumi- nium, c = 6417 m/s	6	98	89	164	180	311	274	380	370	136	501
	8	86	75	182	152	280	232	364	314	457	427
	10	96	65	198	132	202	201	293	273	405	371
	14	107	51	135	104	225	159	256	216	355	295

Achse stattfindet und somit lokale Unebenheiten abgebildet werden.

Auch der Algorithmus zur Signaltrennung kann noch verbessert werden. So ist zu untersuchen, inwiefern sich die Signale beim Senden mit Zentralelement und Empfang auf einem Ring, die ebenfalls nur einen Signalanteil enthalten, als Referenzsignale eignen.

Literatur

- [1] N. Gust: Improvement of signal analysis for the ultrasonic microscopy, Dissertation, Dresden (2010)

- [2] S. Kümritz, M. Wolf, E. Kühnicke, Simultane Bestimmung von Dicken und Schallgeschwindigkeiten geschichteter Strukturen, tm – Technisches Messen 82/3, (2015).

- [3] E. Kühnicke, S. Kümritz, M. Wolf
Schichtdickenbestimmung mit Ultraschall bei unbekanntem Schallgeschwindigkeiten, DAGA 2015, Nürnberg

Acknowledgement

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes KU1075/14-1.