

Materialparameterbestimmung mit dem Ultraschallmikroskop

Norbert GUST^{**}, Elfgard KÜHNICKE^{*}, Klaus-J. WOLTER^{**}

^{*} Institut für Festkörperelektronik, TU-Dresden, Helmholtz Straße 18, 01069 Dresden

^{**} Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik, TU-Dresden

Norbert.Gust@tu-dresden.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag werden effektive Methoden zur Bestimmung von Materialparametern unbekannter Proben mit dem Ultraschallmikroskop aufgezeigt. Elastische Module, Schallgeschwindigkeiten, Dichte, Dämpfung und die Dicken mehrerer Schichten können damit bestimmt werden. Neuerungen gegenüber gängigen Verfahren sind die gleichzeitige Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke ohne Referenzreflektor, die iterative Parameterrekonstruktion mit einer schnellen realitätsnahen Ultraschallsimulation und damit die Möglichkeit einer 3D Rekonstruktion basierend auf der Klassifikation mit Simulationsergebnissen. Die Rekonstruktionsansätze wurden an Referenzproben und numerischen Simulationen verifiziert, und zeigen eine hohe Qualität.

1. Einführung

Scannende Ultraschallmikroskope werden häufig für die zerstörungsfreie Prüfung von Baugruppen und Materialien in der Elektronikbranche eingesetzt. Genutzt werden dabei in der Regel sphärisch fokussierenden Schallköpfen im Impuls-Echo Betrieb bei Mittenfrequenzen von 10 – 200 MHz. Die üblicherweise gewonnenen und dargestellten Informationen sind B- und C-Bilder der laufzeitabhängigen Reflexionssignale von Einschlüssen oder Delaminationen. Hier sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, mit denen sich elastischen Materialparameter von geschichteten Proben aus unterschiedlichen Materialien genau bestimmen lassen. Benötigt werden die Materialdaten unter anderem für Zuverlässigkeitssimulationen von elektronischen Baugruppen und für Defektanalysen.

Die Laufzeiten und Amplituden der empfangenen Reflexionen werden durch die Struktur und die Materialeigenschaften der zu untersuchenden Probe bestimmt. Deshalb können aus den Reflexionsparametern mit Rekonstruktionsansätzen Material- und Struktureigenschaften bestimmt werden. Bei bekanntem Schallausbreitungsweg lassen sich aus den Ankunftszeiten der Echos die Schallgeschwindigkeiten der einzelnen Wellenmoden sehr genau bestimmen [2][3][4]. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Schallgeschwindigkeiten ist die Auswertung von Interferenzeffekten der Oberflächenwellen mit zylindrisch fokussierenden Ultraschallwandlern [1]. Die Bestimmung von Dichte und akustischer Dämpfung aus den Echoamplituden ist erheblich schwieriger, da bei den Amplituden viele weitere Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Mit entsprechenden Referenzmessungen oder mit entsprechenden Spezialaufbauten lassen sich einige dieser Einflussfaktoren, wie z.B. Fokussierungsabhängigkeit, reduzieren [3][4].

In diesem Beitrag sollen Verfahren aufgezeigt werden, mit denen sich erheblich mehr Informationen aus den reflektierten Signalen gewinnen lassen, und die dadurch eine vollständige Bestimmung aller homogenen elastischen Materialparameter ermöglichen.

Erreicht werden kann dies durch Entfaltung der Reflexionssignale zur Trennung überlagerter Echos und zur genaueren Reflexionsparameterbestimmung, die gleichzeitige Bestimmung von Dicken und Schallgeschwindigkeiten in den einzelnen Schichten, der realitätsnahen Modellierung des Schallfeldes und der iterativen Rekonstruktion. Dabei werden die primären Reflexionen, sowie auch Echos durch Modenwandlung und Mehrfachreflexionen für die Informationsgewinnung genutzt, und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Longitudinal- und Transversalwellen, Dichte, elastische Module, akustische Dämpfung und Dicke mehrerer Schichten bestimmt.

2. Theorie für die Bestimmung von Materialparametern mit Ultraschall

2.1 Schallgeschwindigkeiten und Schichtdicken

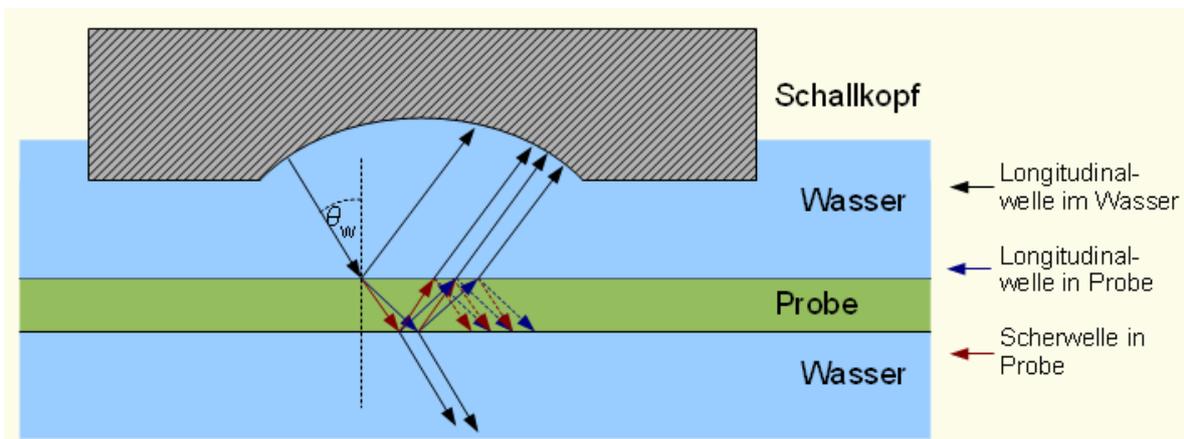


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Schallausbreitung am Ultraschallmikroskop mit Strahlen

Die Laufzeit der Schallwelle durch die Probe t_p wird durch die Schichtdicke d_p , die Schallgeschwindigkeit in der Probe c_p und der effektiven Schallausbreitungsrichtung in der Probe θ_p bestimmt (Abbildung 1). Durch Modenwandlung an Grenzschichten von Festkörpern kommt es zur Ausbreitung von Longitudinal- und Scherwellen, deren Reflexionen aufgrund der deutlich unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zeitlich getrennt ausgewertet werden können. Die Bestimmung des effektiven Schallwinkels θ_p bei einer unbekannt Probe ist in Kombination mit einer iterativen Rekonstruktion möglich und kann mit Hilfe des Snelliusschen Brechungsgesetz $\sin\theta_W / c_W = \sin\theta_p / c_p$ aus dem effektiven Winkel θ_W im Ankopplungsmedium berechnet werden. Für das Verhältnis aus Schallgeschwindigkeit (je nach Reflexionsmode longitudinal oder transversal) c_p und Schichtdicke d ergibt sich:

$$c_p = \frac{d_p}{t_p \cos \theta_p} = c_W \frac{\sqrt{1 - \sqrt{1 - [2 \sin \theta_W \cdot d_p / (t_p c_W)]^2}}}{\sqrt{2} \sin \theta_W}, \text{ bzw. } c_p = \frac{d_p}{t_p} \text{ für } \theta_W = 0. \quad (1)$$

Ist die Schallgeschwindigkeit oder die Schichtdicke bekannt, lässt sich die jeweils andere Größe mit Gleichung (1) berechnen. Ist keine der beiden Größen mit sinnvollen Mitteln bestimmbar, so können mit Hilfe eines hier beschriebenen Verfahrens, das zusätzliche Informationen aus der Fokussierung gewinnt, beide Größen gleichzeitig bestimmt werden. Da die Lage des Fokuspunktes von den Schallgeschwindigkeiten des Ausbreitungsmediums abhängig ist, kann umgekehrt aus der Fokussierung auf zwei

unterschiedliche Grenzschichten und der Laufzeit dazwischen die Schallgeschwindigkeit und der Weg zwischen diesen Punkten bestimmt werden. Aus der Strahlengeometrie und dem Snelliusschen Brechungsgesetz ergibt sich für die Verschiebung des Schallkopfes im Koppelmedium d_W eine Fokusverschiebung in der Probe d_P (Abbildung 2):

$$d_P = d_W \frac{c_W \cos \theta_P}{c_P \cos \theta_W}. \quad (2)$$

Das Messschema für die gleichzeitige Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei wird der Schallkopf so in z -Richtung verschoben, dass einmal auf die Oberseite der jeweiligen Schicht fokussiert wird und einmal auf die Unterseite. Die Ermittlung der Fokusposition kann bei fokussierten Schallwandlern näherungsweise durch Maximierung des jeweiligen Grenzschichtechos erfolgen [4]. Für die Schallgeschwindigkeit und die Schichtdicke ergibt sich entsprechend Abbildung 2 aus den Gleichungen (1) und (2):

$$c_P = c_W \sqrt{(t_1 - t_2) / t_P} \quad \text{und} \quad (3)$$

$$d_P = c_W \sqrt{(t_1 - t_2) t_P - (t_1 - t_2)^2 \sin^2 \theta_W}. \quad (4)$$

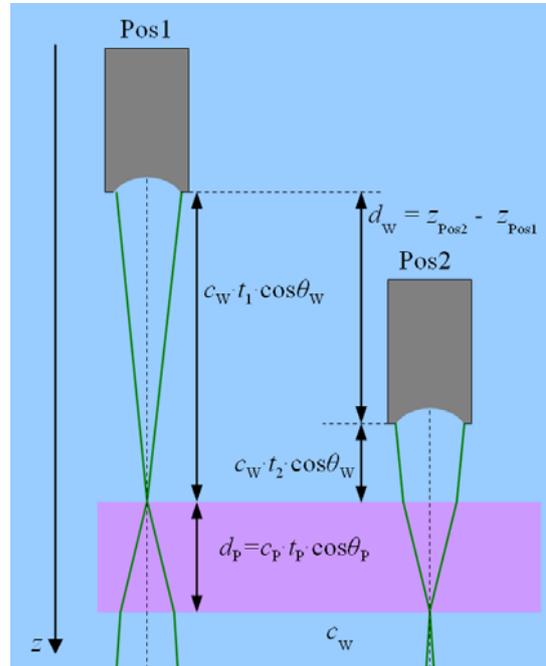


Abbildung 2: Messschema zur gleichzeitigen Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit

2.2 Elastische Module, Dichte und akustische Dämpfung

Der grundlegende Zusammenhang zwischen elastischen Modul M , Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c einer Welle ist $c^2 = M / \rho$. Sind Dichte, longitudinale und transversale Geschwindigkeit bekannt, so lassen sich daraus alle wesentlichen elastischen Module bestimmen [4]. Ist die Dichte unbekannt, können diese Größen mittels Ultraschall nur aus den Amplituden der Grenzflächenechos bestimmt werden. An dieser Stelle soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, die unter vereinfachenden Annahmen eine grobe Bestimmung der Dichte aus einem einzelnen Reflexionssignal ohne Referenzprobe ermöglicht. Unter der Annahme eindimensionaler Schallausbreitung (akustische Impedanz $Z = \rho \cdot c$) und mittlerer frequenzunabhängiger Dämpfung a [dB/m] ergeben sich die Reflexionsamplituden A für jede Schicht n wie folgt:

$$A_{1n} = A_0 \cdot r_{n+1} \cdot \prod_{i=1}^n (1 + r_i) (1 - r_i) 10^{\frac{2 \cdot a_i \cdot d_i}{20 \text{dB}}} \quad \text{für das primäre Rückwandecho und} \quad (5)$$

$$A_{2n} = -A_0 \cdot r_n \cdot r_{n+1}^2 \cdot 10^{\frac{2 \cdot a_n \cdot d_n}{20 \text{dB}}} \cdot \prod_{i=1}^n (1 + r_i) (1 - r_i) 10^{\frac{2 \cdot a_i \cdot d_i}{20 \text{dB}}} \quad \text{mit} \quad r_i = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i + Z_{i-1}} \quad (6)$$

für die erste Mehrfachreflexion von der Rückwand, wobei A_0 die Anfangsamplitude ist. Sind mindestens zwei Materialien bekannt (normalerweise angrenzendes Wasser) und alle relevanten Amplituden und Schallgeschwindigkeiten bestimmt, lässt sich das Gleichungssystem vollständig lösen und Dichte, Dämpfung und elastische Module jeder Schicht n bestimmen. Für eine Schicht ($n = 1$) in Wasser ergeben sich folgende Lösungen:

$$\rho_1 = \frac{\rho_W c_W}{c_1 A_{11}^2} \left[A_{11}^2 - 2 A_{10} A_{21} + 2 \text{sign}(A_{10}) \sqrt{A_{10} A_{21} \cdot (A_{10} A_{21} - A_{11}^2)} \right] \quad \text{und} \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{20\text{dB}}{2 \cdot d_1} \cdot \log_{10} \left(\frac{A_{21} - A_{11}}{A_{11} - A_{10}} \right). \quad (8)$$

2.3 Iterative Rekonstruktion

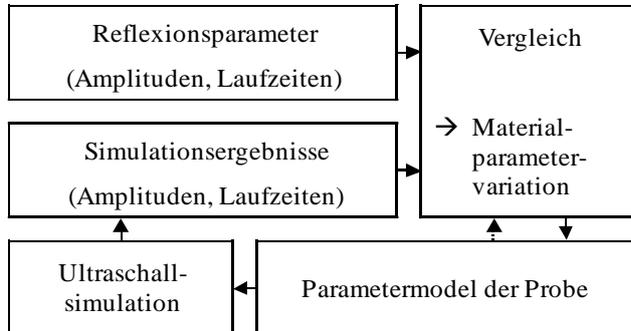


Abbildung 3: Rekonstruktionsschema

Mit den in den Abschnitten 2.1 und 2.2 erhaltenen Lösungen kann ein grober Anfangsdatensatz für ein Parametermodell der Probe bestimmt werden. Wird dieses realitätsnah simulierte Modell für eine iterative Rekonstruktion entsprechend Abbildung 3 genutzt, können erheblich genauere Materialparameter aus den gemessenen Ultraschallsignalen gewonnen werden, als mit den eindimensionalen Näherungsrechnungen.

Im Rekonstruktionsprozess werden die Reflexionsparameter von Simulation und Messung direkt miteinander verglichen und aus den Abweichungen die entsprechend notwendigen Änderungen einzelner Parameter bestimmt. Die Anzahl der unabhängigen Reflexionsparameter muss dabei größer oder gleich der Anzahl an unbekanntem Parametern der Probe sein, damit der Rekonstruktionsprozess sicher konvergiert. Bei komplexeren Proben ist es auch bei Entfaltung der Reflexionssignale nicht immer möglich, ausreichend unabhängige Reflexionsparameter zu messen. Mittels Vorwissen über die Probenstruktur kann auch dann mit einem Optimierungsprozess zur Maximierung der Korrelation zwischen Simulation und Messung ein gutes Ergebnis erzielt werden. Diese Optimierung ist generell sinnvoll, da damit alle Reflexionen – auch vielfach überlagerter Mehrfachechos und Echos von sehr dünnen Schichten ausgewertet werden. Somit können auch Parameter die in erster Linie die Reflexionsamplituden beeinflussen sehr genau bestimmt werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Gleichzeitige Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke

Das in dem Absatz 2.1 beschriebene Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung von Dicken und Geschwindigkeiten von mehreren Schichten. Dazu wird jeweils von jedem Grenzflächenecho die Laufzeit bei maximaler Echoamplitude (entspricht etwa Fokus, siehe Abbildung 2) bestimmt und anschließend mit den Gleichungen (3) und (4) c_P und d_P daraus berechnet.

Die Tabelle 1 enthält Ergebnisse der Bestimmung von Platten aus unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Dicken. Berechnet wurden jeweils die Schallgeschwindigkeit (Zeile 7) und die Schichtdicke (Zeile 4). Anhand der mechanischen Vergleichsmessung (Zeile 1) für die Dicke d_m ist zu erkennen, dass das Verfahren einen deutlichen systematischen Fehler aufweist, der in Abhängigkeit des Schallgeschwindigkeitsunterschieds c_P / c_W zum Kalibriermedium Wasser steigt. Dieser Fehler kann mit einer

Referenzmessung korrigiert werden, wenn Referenzmaterial und unbekanntes Material eine ähnliche Schallgeschwindigkeit besitzen. Mit SiO₂ als Referenzmaterial (Zeile 5) können alle Glasähnlichen Materialien gut bestimmt werden. Für stärker abweichende Schallgeschwindigkeiten kann ein linearer Korrekturterm verwendet werden, der jeweils auf Wasser und ein weiteres Referenzmaterial kalibriert ist. Mit SiO₂ als zweites Referenzmedium konnten damit sehr gute Ergebnisse (Zeile 6, ≈ 1% Fehler) erzielt werden, solange die Schallgeschwindigkeit nicht zu stark abweicht wie bei der Keramik. Dieser systematische Fehler zeigt ein nichtlineares Verhalten und entsteht unter anderem dadurch, dass bei dem Maximum einer Reflexion der Fokus nicht genau auf der jeweiligen Grenzfläche liegt. Eine Kompensation ohne Referenzmessung ist perspektivisch über eine vergleichende Schallfeldberechnung möglich.

Tabelle 1: Gleichzeitige Bestimmung von Schichtdicke d_p und Schallgeschwindigkeit c_p

Material	SiO ₂	BorS. Glas	Glas	Keramik	Plastik
mechanisch gemessenes $d_m \pm 2 \mu\text{m}$	512 μm	700 μm	1100 μm	1012 μm	2300 μm
$2(t_1 - t_2)$	3272 ns	4176 ns	6771 ns	11927 ns	4885 ns
$2 t_p$	171,9 ns	247,3 ns	382,2 ns	195,6 ns	1951 ns
$d_p = c_w \cdot \sqrt{(t_1 - t_2)} \cdot t_p$	563 μm	763 μm	1207 μm	1146 μm	2317 μm
$d_p \cdot (d_{\text{SiO}_2\text{m}} / d_{\text{SiO}_2})$	512 μm	694 μm	1098 μm	1042 μm	2108 μm
d_p linear korrigiert auf SiO ₂	512 μm	699 μm	1103 μm	955 μm	2278 μm
$c_p = c_w \cdot \sqrt{(t_1 - t_2)} / t_p$	6549 m/s	6168 m/s	6318 m/s	11721 m/s	2375 m/s
c_p linear korrigiert auf SiO ₂	5957 m/s	5653 m/s	5772 m/s	9765 m/s	2335 m/s

3.2 Rekonstruktion einer Schicht

Tabelle 2: Materialparameterbestimmung von SiO₂ (75MHz Schallkopf)

Material Parameter	ρ in kg/m ³	d in μm	a in dB/m	c_p in m/s	c_s in m/s
Hersteller Daten	2203	512	-	5965	3767
direkte Bestimmung SiO ₂	2030	-	1547	6002	3630
iterative Bestimmung SiO ₂	2181	-	27,9	-	-
relativer Messfehler	1%	-	-	<1%	3.6%
direkte Bestimmung SiO ₂ EFIT	1105	-	-	6006	3676
iterative Bestimmung SiO ₂ EFIT	2178	-	-	-	-

Als Verifizierung der Rekonstruktionsansätze wurde eine Referenzmessung an hochreinem SiO₂ Quarzglas durchgeführt. Die in Tabelle 2 dargestellten direkt bestimmten Werte wurden mit den Gleichungen (1), (7) und (8) berechnet und können mit den Herstellerdaten verglichen werden. Als weiterer Vergleich wurde die Schallausbreitung in dieser Probe numerisch (EFIT) ohne Dämpfung simuliert und die Rekonstruktion darauf angewendet. Bei der direkten Bestimmung fällt jeweils auf, dass insbesondere die Dichte aufgrund der eindimensionalen Modellierung sehr stark abweicht. Die direkt mit Gleichung (1) und $\theta_p = 0$ bestimmte longitudinale Schallgeschwindigkeit ist aufgrund der bekannten Schichtdicke sehr genau – bei der transversalen Schallgeschwindigkeit kommt es durch winkelabhängige Modenwandlung zu einem effektiv längeren Schallweg und damit zu

einer größeren Abweichung. Ist genauere Bestimmung des effektiven Winkels ist Bestand zukünftiger Arbeiten.

Durch iterative Rekonstruktion konnten die Dichte und die Dämpfung erheblich genauer bestimmt werden. Unter Laborbedingungen ist eine Genauigkeit von 99% möglich.

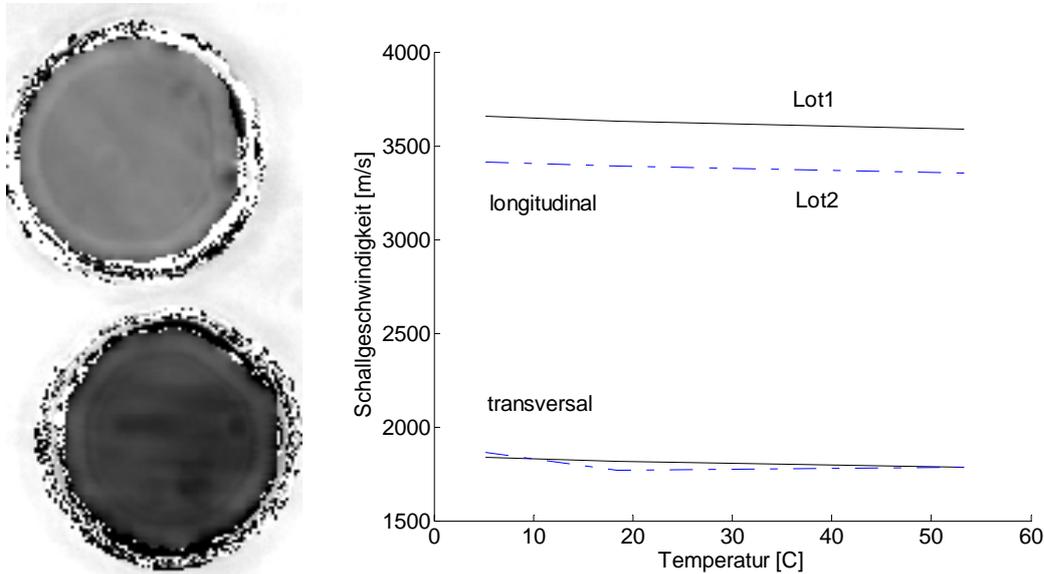


Abbildung 4: Temperaturabhängige Materialparameterbestimmung von Lotwerkstoffen

Als Erweiterung ist es zusätzlich möglich die elastischen Materialparameter in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen, wie Temperatur, zu bestimmen. In Abbildung 4 sind die Schallgeschwindigkeiten unterschiedlicher Lötwerkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Dazu wurde das Wasserbad jeweils auf die entsprechende Temperatur gebracht und anschließend die Messung durchgeführt. Aus dem Verhältnis von longitudinaler und transversaler Geschwindigkeit kann die Querkontraktionszahl direkt bestimmt werden. Für die elastischen Module ist die zusätzliche Bestimmung der Dichte notwendig.

3.3 Iterative Rekonstruktion mehrschichtiger Proben

Die Rekonstruktionsverfahren können auch auf Proben mit vielen Schichten angewendet werden. In Abbildung 5 ist der schematische Aufbau von einem 8-Siliziumchipstapel mit künstlich eingebrachten Lufteinschlüssen (Referenzprobe 3) und ein B-Scan dieser Probe dargestellt. Die grün eingezeichneten Rechtecke repräsentieren die Position des primären Grenzflächenechos von dem jeweiligen Lufteinschluss. Es ist zu erkennen dass bereits ab der 4. Siliziumschicht keinerlei Information mehr aus dem primären Echo gewonnen werden kann, da es eine Amplitude deutlich unterhalb des Signalrauschens besitzt. Erst die große Anzahl gleichzeitig empfangener Mehrfachreflexionen liefert ausreichend Kontrast für eine Auswertung. Erreicht werden kann dies durch eine deutlich tiefere Fokussierung in das Glassubstrat, statt der Fokussierung auf die interessierende Grenzschicht. Die Laufzeit der unterschiedlichen Mehrfachreflexionen ist deutlich länger als die des primären Echos, wodurch die Lage eines Defektes nicht mehr direkt aus der Laufzeit bestimmt werden kann.

Die Auswertung der Reflexionssignale erfolgt für die ersten Schichten anhand der Reflexionsparameterbestimmung und der entsprechenden Anpassung der Simulation. Für tiefere Schichten können die Reflexionsparameter nicht mehr bestimmt werden und es muss an dieser Stelle Vorwissen über die Probe genutzt werden, um eine grobe Anfangsstruktur zu bestimmen. Da es sich hier um eine periodische Struktur handelt, ist nur

die Anzahl der Schichten notwendig. Die genauen Parameter werden anschließend durch einen Optimierungsprozess bestimmt und sind in Tabelle 3 dargestellt.

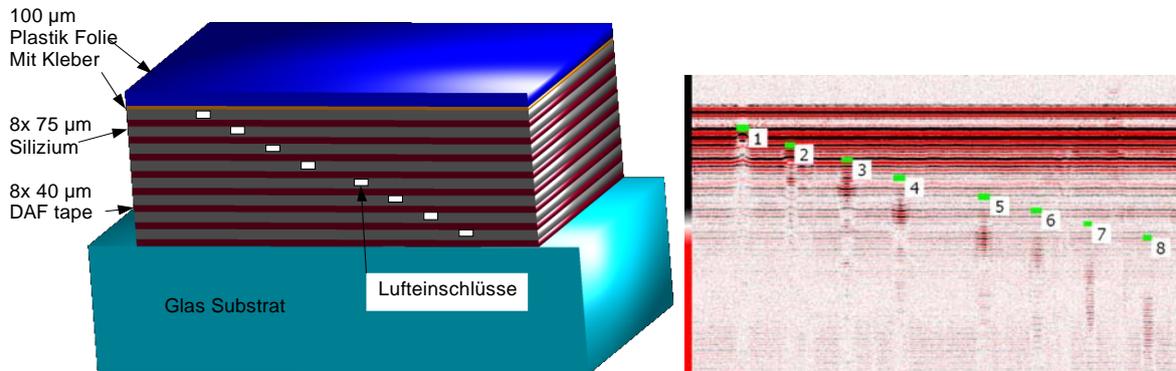


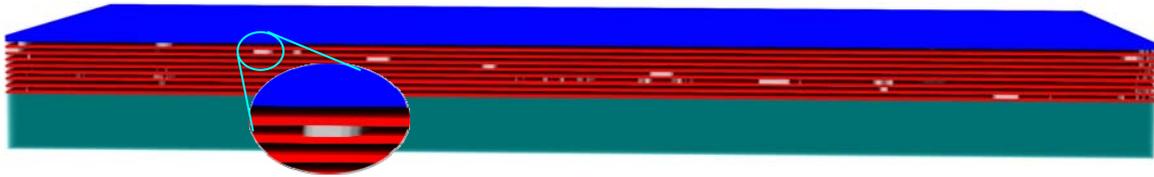
Abbildung 5: Referenzprobe 3; links: Aufbauschema; rechts: B-Scan mit eingezeichneter Position (grüner Balken) des primären Grenzflächenechos der jeweiligen Siliziumschicht (Nummer);

Tabelle 3: Rekonstruierte Materialparameter von Referenzprobe 3

Material	ρ in kg/m ³	d in μm	c_L in m/s	c_S in m/s	a_L in dB/m	a_S in dB/m
Abdeckfolie	1039	103.4	3107	1627	9953	11675
Folienkleber	1355	11.0	1254	-	44042	-
100-Silizium	2330	73.9	8433	5843	17.1	23.8
DAF Tape	1463	40.2	2230	881	7788	24475

Da die grundlegende Struktur mit allen notwendigen Materialparametern bekannt ist, können unterschiedliche mögliche Defekte simuliert werden. In diesem Fall wurde das Reflexionssignal für eine intakte Probe und für 8 Proben mit jeweils einem von den möglichen Luftporen simuliert. Die erhaltenen simulierten Reflexionssignale können mittels Kreuzkorrelation mit den real gemessenen Signalen an jedem Punkt der Probe verglichen werden. Entsprechend der maximalen Korrelation kann dadurch jedem Punkt der Probe die entsprechende Struktur zugeordnet und damit die Gesamtstruktur der Probe bestimmt werden.

Die so erhaltenen Volumendaten können ähnlich wie bei einer Röntgencomputertomographie (Abbildung 7) ausgewertet und dargestellt werden. In Abbildung 6 ist ein Querschnitt von dem Rekonstruktionsergebnis aus den Ultraschallsignalen der Referenzprobe 3 dargestellt. Es sind alle Luftporen in der jeweiligen Siliziumschicht deutlich sichtbar. An den Rändern kommt es aufgrund der Beugung stellenweise zu schlechterer Signalübereinstimmung und damit zu geringfügigen Artefakten. Die Ultraschallrekonstruktion bietet im Vergleich zur Röntgen CT deutlich besseren Materialkontrast, benötigt dafür jedoch mehr Vorwissen über die Probe. Im Vergleich zu dem ursprünglichen B-Scan wurde ein deutlicher Informationsgewinn erreicht. Die genaue Lage von Defekten und die elastischen Materialparameter aller Materialien der Probe konnten bestimmt werden.



**Abbildung 6: Rekonstruiertes Volumen aus Ultraschalldaten von Referenzprobe 3 – Querschnitt:
blau = Folie, schwarz = Silizium, rot = DAF Tape, weiß = Luft, türkis = Glas**



**Abbildung 7: Rekonstruiertes Volumen aus Röntgen CT von Referenzprobe 3 – Querschnitt:
rot = Folie oder DAF Tape, helles rot = Luft, helles grau = Silizium oder Glas**

Referenzen

- [1] Jun-Ichi Kushibiki and Noriyoshi Chubachi, "Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope", IEEE Transactions on sonics and ultrasonics, vol. SU-32, no. 2, pp. 189-212, March 1985
- [2] N. Kim, "Simultaneous measurement of longitudinal and transverse waves velocities employing spherically focused acoustic transducer", Key Engineering Materials Volume 321-323 I (2006-01-01), pp. 574-577, ISSN: 1013-9826, Jan. 2006
- [3] Christophe Graciet and Bernard Hosten, "Simultaneous measurement of speed, attenuation, thickness and density with reflected ultrasonic waves in plates", Ultrasonics symposium 1994, pp. 1219-1222
- [4] Norbert Gust, Elfgard Kühnicke, Dirk Breuer, "Material characterization with the ultrasonic microscope", IEEE conference proceedings ISSE 2008 in Budapest, 2008, pp.92-95