

SIMULTANE BESTIMMUNG DER PLATTENDICKE UND SCHALLGESCHWINDIGKEIT MIT CODIERTEN ULTRASCHALLSIGNALLEN

Daniel A. Kiefer*, Michael Fink, Stefan J. Rupitsch

Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen-Nürnberg, Paul-Gordan-Str. 3/5, 91052 Erlangen, Deutschland

*Tel.: 09131 85-23134; e-mail: daniel.kiefer@fau.de

Kurzfassung – Ist entweder die Dicke einer Platte oder die Schallgeschwindigkeit in dieser bekannt, so kann durch Laufzeitmessung von Ultraschallsignalen auf die jeweils andere Größe geschlossen werden. Häufig sind jedoch beide Parameter unbekannt. In diesem Fall können Mehrfachreflexionen in der Platte ausgenutzt werden, um beide Größen simultan zu bestimmen. Dies ist insbesondere für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von großem Interesse. Zur Vermessung dünner Platten muss die axiale Auflösung des Messsystems erhöht werden. Dies geschieht mittels einer Konditionierung des Signales, welches zur Ansteuerung der Ultraschallwandler zum Einsatz kommt. Hierfür wird ein neues Verfahren vorgestellt und auf ein linear frequenzmoduliertes Signal angewandt. Dieses gehört zu den codierten Ansteuersignalen, wodurch ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden kann. Jedoch ist bei solchen Signalen aufgrund ihrer langen zeitlichen Ausdehnung zur Laufzeitmessung eine Pulskompression erforderlich. Bekannte Pulskompressionsverfahren werden hinsichtlich axialer Auflösung und Nebenkeulenpegel messtechnisch untersucht. Platten aus Stahl, Aluminium und Polymethylmethacrylat (PMMA, Acrylglas) werden mit dem vorgestellten Verfahren vermessen. Die Messergebnisse für Dicke und Schallgeschwindigkeit zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten, welche mit einer Messschraube bestimmt bzw. aus der Literatur entnommen wurden.

Schlüsselwörter – Ultraschall, codierte Ansteuersignale, Pulskompression, Messtechnik, Dicke, Schallgeschwindigkeit, Platten, Chirps.

I. EINLEITUNG

Ultraschallmessungen haben den Vorteil, dass sie weitestgehend unabhängig vom Material des Prüflings sind und auch bei lediglich einseitig zugänglichen Bauteilen eingesetzt werden können [1]. Die Möglichkeit geometrische und mechanische Eigenschaften simultan zu bestimmen, ist insbesondere für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von großem Interesse, da Proben unbekannter und nicht homogener Eigenschaften geprüft werden können [2].

Für diese Arbeit werden codierte Signale zur Ansteuerung eines Ultraschallwandlers eingesetzt, um das Sig-

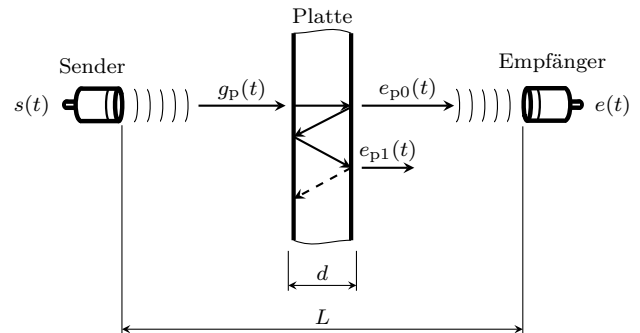


Abbildung 1: MESSPRINZIP – Die relevanten Ultraschallstrahlen sind als Pfeile dargestellt. Die Wellenausbreitung verläuft ausschließlich in horizontaler Richtung. Vertikale Komponenten der Pfeile stellen die Zeitverzögerung zu vorhergehenden Mehrfachreflexionen dar.

nal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zum Puls-Echo-Betrieb zu verbessern. Dadurch wird die Eindringtiefe erhöht und die Anforderung an die akustische Kopplung zwischen Medium und Probe abgeschwächt. Prinzipiell kann hierdurch die luftgekoppelte Vermessung ermöglicht werden. Eine neue Methode zur Signalkonditionierung wird vorgestellt, wodurch das axiale Auflösungsvermögen gegenüber klassischen Pulsen verbessert wird. Des Weiteren werden mehrere Pulskompressionsfilter vorgestellt und messtechnisch hinsichtlich axialer Auflösung und Nebenkeulenpegel untersucht.

II. MESSPRINZIP UND MODELL

Die ultraschallbasierte Messung erfolgt im Transmissionsmodus wie in Abb. 1 dargestellt. Die Anordnung stellt ein Drei-Schichtenproblem dar [3]. Die Impulsantwort der Platte ist

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \delta(t - t_n). \quad (1)$$

Hierin ist E_n der Amplitudenfaktor der einzelnen Mehrfachreflexionen, $\delta(t)$ bezeichnet den Dirac-Stoß und $t_n = t_0 + nT$ stellt die Laufzeit der n -ten Mehrfachreflexion dar.

Der Abstand L zwischen Sende- und Empfangswandler sowie die Schallgeschwindigkeit c_w im umgeben-

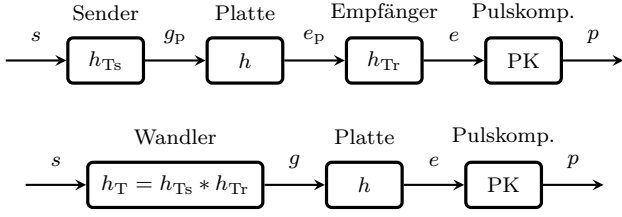


Abbildung 2: STRUKTURDIAGRAMME – Die obere Anordnung gibt die physikalische Struktur des Messsystems wieder, die untere ist äquivalent und wird im Weiteren verwendet. Die Zeitabhängigkeit der Signale wurde weggelassen.

den Medium werden mittels einer Referenzmessung bestimmt. Durch Messen der Laufzeit t_0 des direkt transmittierten Schalls und der Verzögerung $T = t_n - t_{n-1}$ zwischen den Mehrfachreflexionen kann sowohl auf die Dicke d der Platte als auch auf die Schallgeschwindigkeit c in dieser geschlossen werden. Der Zusammenhang ist gegeben durch [4]

$$d = c_w \left(t_w - t_0 + \frac{T}{2} \right), \quad (2)$$

$$c = c_w \left(1 + 2 \frac{t_w - t_0}{T} \right). \quad (3)$$

Hierbei entspricht $t_w = L/c_w$ der Laufzeit für ein akustisches Signal, wenn sich keine Platte zwischen den Wandlern befindet. Die Verzögerung T wird durch die Dicke und die Schallgeschwindigkeit bestimmt in der Form

$$T = \frac{2d}{c}. \quad (4)$$

Bei der Vermessung von Platten legt die axiale Auflösung Δt des Systems die Messgrenzen fest, da sie die minimal erfassbare Verzögerung T_{\min} bestimmt. Um dünne Platten zu vermessen, muss die axiale Auflösung daher möglichst gut sein. In dieser Arbeit soll die axiale Auflösung des Messsystems bei gegebener Bandbreite der Ultraschallwandler optimiert werden.

III. ANSTEUERSIGNAL

Die Bezeichnung der einzelnen Signale im Messsystem ist im Blockdiagramm von Abb. 2 gezeigt. Aufgrund der Linearität des Systems können die Blöcke der Platte und des Empfangswandlers vertauscht werden. Die Impulsantwort des Sendewandlers h_{Ts} und die des Empfangswandlers h_{Tr} werden zur beidseitigen Wandlerimpulsantwort h_T zusammengefasst und systemtheoretisch als ein Wandler betrachtet. Dies vereinfacht die im Folgenden durchgeführten Analysen.

An das Ansteuersignal $s(t)$ werden zwei wesentliche Anforderungen gestellt. Erstens sollte es eine hohe Bandbreite besitzen, um die nötige axiale Auflösung zur Verfügung zu stellen. Zweitens ist ein hoher Energiegehalt des Signals wichtig, damit ein gutes Signal-

Rausch-Verhältnis (SNR) erzielt werden kann. Ein Maß für die Energie eines Signals ist das Zeit-Bandbreite-Produkt (DB) [5–7]. Ansteuersignale mit hohem Zeit-Bandbreite-Produkt werden auch *codierte Ansteuersignale* genannt.

Ausschlaggebend für die axiale Auflösung des Messsystems ist die Bandbreite des von den Wandlern erzeugten Interrogationssignals $g(t)$. Um das axiale Auflösungsvermögen eines Ansteuersignals zu erhöhen, sollte dieses so entworfen werden, dass die Wandlerbandbreite möglichst gut ausgenutzt wird. Dies wird im Weiteren als Signalkonditionierung bezeichnet. Dabei werden die vom Wandler gedämpften Frequenzanteile vor dem Senden verstärkt, wodurch eine höhere -6 dB-Bandbreite des Interrogationssignals erreicht wird.

Um ein solches Filter zur Signalkonditionierung zu entwerfen, wird der Ansatz der Faltungsäquivalenz von Oelze eingesetzt [8]. Hierzu wird zunächst ein beliebiger “idealer Wandler” der Impulsantwort $h_c(t)$ entworfen. Dieser erfülle die erwünschten Eigenschaften, insbesondere hinsichtlich Bandbreite. Wird der ideale Wandler mit dem Ansteuersignal $s(t)$ angeregt, so erzeugt er das Interrogationssignal $g(t)$. Nun ist die Frage, mit welchem konditionierten Ansteuersignal $s_c(t)$ der reale Wandler angeregt werden muss, um das gleiche Interrogationssignal $g(t)$ zu erzeugen. Es wird also eine Faltungsäquivalenz der Form

$$s(t) * h_c(t) \stackrel{!}{=} s_c(t) * h_T(t) = g(t) \quad (5)$$

gefordert, wobei “*” die zeitliche Faltung darstellt.

Im Frequenzbereich erhält man aus (5) das konditionierte Ansteuersignal. Statt des instabilen inversen Filters $1/H_T(f)$ soll ein Wiener-Filter zum Einsatz kommen. Die Pulskompression (s. Abschnitt IV.) ist sehr sensibel bei fehlangepasstem Phasengang [6]. Deshalb wird die Konditionierung ausschließlich am Amplitudenspektrum durchgeführt, um die Qualität des Codes nicht zu vermindern. Das konditionierte Spektrum ergibt sich aus

$$S_c(f) = S(f) \frac{|H_c(f)H_T^*(f)|}{|H_T(f)|^2 + \beta |H_T(f)|^{-2}}. \quad (6)$$

Hierin legt β das Rausch-Signal-Verhältnis fest. Durch inverse Fouriertransformation lässt sich das konditionierte Ansteuersignal im Zeitbereich ermitteln.

Das Modell für den idealen Wandler muss noch entworfen werden. Hierzu soll ein Gauß-Puls der Gestalt

$$h_c(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \cos(2\pi f_c t) \quad (7)$$

dienen. Dabei ist f_c die Trägerfrequenz und σ die Standardabweichung. Dieses Modell ermöglicht einen gezielten Entwurf, z. B. bezüglich erwünschter Bandbreite. Die -6 dB-Bandbreite B des Gauß-Pulses wird durch entsprechende Wahl der Standardabweichung σ gewählt. Hierfür setzt man

$$\sigma = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi B}. \quad (8)$$

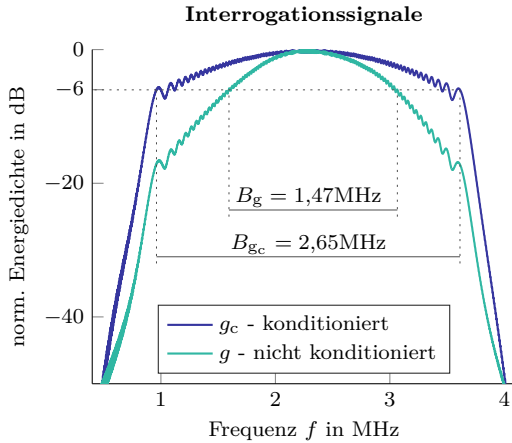


Abbildung 3: ENERGIEDICHTESPEKTRA – Die -6 dB-Bandbreite des konditionierten Interrogationssignals ist deutlich höher als die des nicht-konditionierten. Jedes Signal ist auf dessen maximale Amplitude normiert.

In dieser Arbeit wird ein linear frequenzmoduliertes Signal, auch *Chirp* genannt, gemäß (6) konditioniert und als Ansteuersignal eingesetzt. Dessen Charakteristika sind $D = 150 \mu\text{s}$ und $B = 1,14 \cdot B_{hc} = 2,87 \text{ MHz}$. Letzteres ist die optimale Bandbreite bezüglich Nebenkeulenpegel (s. IV.) für den idealen Wandler [9]. Durch Faltung des Ansteuersignals mit der realen, beidseitigen Wandlerimpulsantwort $h_T(t)$ erhält man das Interrogationssignal. Die Energiedichtespektren der Interrogationssignale zugehörig zu dem konditionierten und nicht konditionierten Ansteuersignal sind in Abb. 3 dargestellt. Es ist eindeutig erkennbar, dass die -6 dB-Bandbreite des konditionierten Interrogationssignales beinahe doppelt so groß ist.

IV. PULSKOMPRESSION

Codierte Ansteuersignale haben inhärenterweise eine lange zeitliche Dauer D , weshalb sich die Mehrfachreflexionen der Platte überlappen. Um diese trennen zu können, muss in einem Decodierungsprozess, der sogenannten Pulskompression, die axiale Auflösung wiederhergestellt werden. Bei diesem Prozess entsteht stets eine Hauptkeule mit unerwünschten Nebenkeulen an den Seiten. Das Verhältnis von höchster Nebenkeulenhöhe zu Hauptkeulenhöhe in Dezibel wird als *Nebenkeulenpegel* (SLL, engl. side lobe level) bezeichnet. Dieser muss hinreichend gering sein, sodass Nebenkeulen nicht mit den Hauptkeulen der Mehrfachreflexionen verwechselt werden.

Um den Nebenkeulenpegel zu senken, kann eine geeignete Fensterung des Amplitudenspektrums vorgenommen werden. Dies wird stets mit einer verringerten axialen Auflösung erkauft. Das Fenster mit der besten axialen Auflösung bei gegebenem Nebenkeulenpegel ist das Chebyshev-Fenster [10]. Es werden zwei Ansätze zur Pulskompression eingesetzt und miteinander verglichen;

das Wiener-Filter und das Korrelationsfilter. In beiden Fällen wird ein Chebyshev-Fenster zur Verringerung des Nebenkeulenpegels angewandt.

V. MESSUNG

Für die Messungen werden nicht-fokussierende 0,5-Zoll Ultraschallwandler (V306, Olympus Corporation, Shinjuku, Tokio, Japan) mit einer Mittenfrequenz von $f_c = 2,25 \text{ MHz}$ und einer relativen Bandbreite von $B = 61,45\%$ der Mittenfrequenz eingesetzt.

A. Axiale Auflösung und Nebenkeulenpegel

Befindet sich keine Platte zwischen den Wandlern, so kann anhand des Pulskompressionssignals $p(t)$ die axiale Auflösung und der Nebenkeulenpegel bestimmt werden. Diese wurden für verschiedene Ansteuersignale und Pulskompressionsverfahren experimentell ermittelt. Als Maß für die axiale Auflösung dient die Halbwertsbreite der Hauptkeule im Pulskompressionssignal. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die angegebene axiale Auflösung ist auf die des kurzen Pulses $\delta_p = 0,59 \mu\text{s}$ bezogen.

Sig.	Pulskompressionsfilter	$\frac{\Delta t}{\delta_p}/1$	SLL/dB
Puls	–	1,00	–33,90
s	Korr. mit s	1,06	–28,00
	Korr. mit s (cheb-35)	1,32	–34,10
	Wiener (cheb-35)	0,80	–34,80
s _c	Korr. mit s _c	0,66	–7,50
	Korr. mit s _c (cheb-35)	0,86	–14,50
	Korr. mit s (cheb-35)	1,09	–27,30
	Wiener (cheb-35)	0,80	–34,80

Tabelle 1: VERGLEICH DER AXIALEN AUFLÖSUNG UND NEBENKEULENPEGEL

Es ist zu erkennen, dass das konditionierte Ansteuersignal s_c tatsächlich die axiale Auflösung erheblich erhöht. Da die Konditionierung allein auf das Amplitudenspektrum angewandt wurde, lässt sich das Korrelationsfilter sowohl auf Grundlage des konditionierten als auch des nicht konditionierten Ansteuersignals s entwerfen.

Unterschiedliche Platten werden im Weiteren mit dem Wiener-Filter und dem Korrelationsfilter vermessen. Es wird jeweils ein Chebyshev-Fenster mit -35 dB angewandt.

B. Messergebnisse

Die Messergebnisse für Platten unterschiedlicher Dicke und Materialien sind in Abb. 4 dargestellt. Die Referenzwerte sind außerdem als horizontale Linien eingezeichnet und die Abweichung hierzu ist in Prozent angegeben. Für die Dicke wurde als Referenzwert der

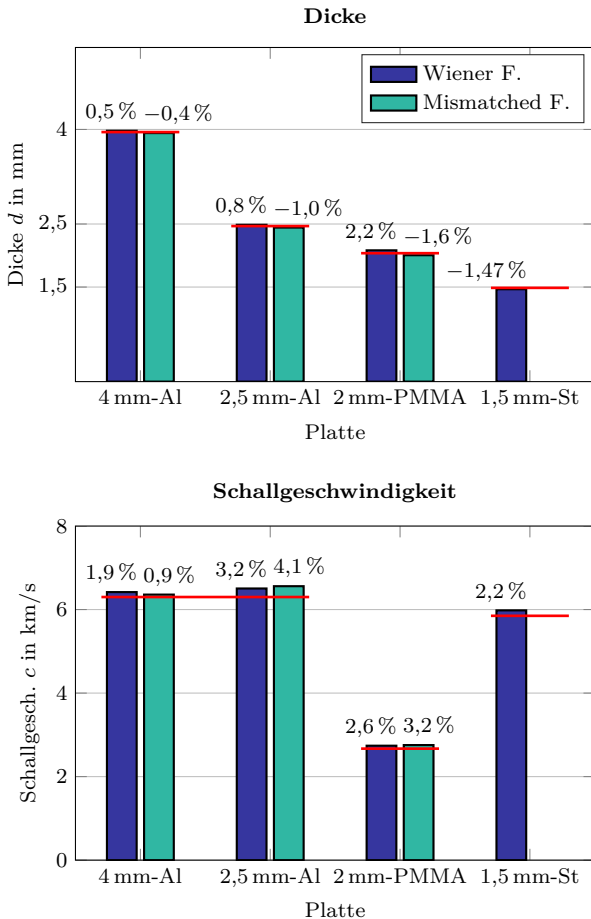


Abbildung 4: MESSERGEBNISSE – für Platten aus Aluminium, Polymethylmethacrylat und Stahl

Mittelwert von 6 Messungen mit der Mikrometerschraube an unterschiedlichen Stellen der Platte verwendet. Die Genauigkeit der Messschraube liegt bei ca. 0,02 mm. Für die Schallgeschwindigkeit hingegen dienen als Referenzwerte die Angaben in der Literatur [11]. Die Messergebnisse weisen bei allen Proben eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten auf. Für die Dicke ist die Abweichung kleiner als 2,2%, für die Schallgeschwindigkeit hingegen kleiner als 4,1%. Es ist bemerkenswert, dass Aluminiumplatten mit Dicken bis unter 80% der Wellenlänge vermessen wurden, Stahlplatten entsprechend bis unter 60%. Letzteres kann jedoch nur mit dem Wiener-Filter vermessen werden, welches eine höhere axiale Auflösung bietet. Die Wellenlänge bezieht sich dabei auf die Mittenfrequenz der Wandler.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Codierte Ansteuersignale stellen sowohl ein gutes Auflösungsvermögen als auch ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zur Verfügung. Ersteres kann auf Kosten des Signal-Rausch-Verhältnisses durch eine Konditionierung weiter erhöht werden. Hierzu wurde das Prinzip der Faltungsäquivalenz angewandt und ein neuer Ansatz für das Konditionierungsfilter und das ideale Wand-

lermodell vorgestellt. Diese Ansätze haben den Vorteil, dass Verzerrungen im Phasengang vermieden werden und der ideale Wandler gezielt entworfen werden kann. Ein weiterer wesentlicher Vorzug ist, dass der Entwurf des Pulskompressionsfilters auch anhand des nicht konditionierten Ansteuersignals möglich ist.

Bei codierten Ansteuersignalen muss eine Pulskompression durchgeführt werden, um das gewünschte axiale Auflösungsvermögen zu erzielen. Die axiale Auflösung hängt somit maßgeblich vom eingesetzten Pulskompressionsverfahren ab. Mehrere Korrelationsfilter und ein Wiener-Filter, jeweils mit Fensterung, wurden hinsichtlich axialer Auflösung und Nebenkeulenpegel untersucht. Das Wiener-Filter stellt die axiale Auflösung annähernd unabhängig vom eingesetzten Ansteuersignal zur Verfügung. Unterschiedliche Platten wurden mit den vorgestellten Methoden vermessen. Die Messergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten.

Literatur

- [1] V. K. Kinra and V. R. Iyer, "Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part I: the forward problem," *Ultrasonics*, vol. 33, no. 2, pp. 95–109, 1995.
- [2] D. K. Hsu and M. S. Hughes, "Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, no. 2, pp. 669–675, Aug. 1992.
- [3] D. T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*. John Wiley & Sons, Apr. 2000.
- [4] S. Rupitsch, D. Glaser, and R. Lerch, "Simultaneous determination of speed of sound and sample thickness utilizing coded excitation," in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*, Oct. 2012, pp. 711–714.
- [5] C. Cook, "Pulse Compression-Key to More Efficient Radar Transmission," *Proceedings of the IRE*, vol. 48, no. 3, pp. 310–316, Mar. 1960.
- [6] T. Misaridis and J. A. Jensen, "Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I: Basic concepts and expected benefits," *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 2, pp. 177–191, 2005.
- [7] R. Chiao and X. Hao, "Coded excitation for diagnostic ultrasound: a system developer's perspective," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, no. 2, pp. 160–170, Feb. 2005.
- [8] M. Oelze, "Bandwidth and resolution enhancement through pulse compression," *IEEE Transactions on*

Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,
vol. 54, no. 4, pp. 768–781, Apr. 2007.

- [9] M. Pollakowski, H. Ermert, L. v. Bernus, and T. Schmeidl, “The optimum bandwidth of chirp signals in ultrasonic applications,” *Ultrasonics*, vol. 31, no. 6, pp. 417–420, Nov. 1993.
- [10] T. Misaridis and J. A. Jensen, “Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part II: design and performance for medical imaging applications,” *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 2, pp. 192–207, 2005.
- [11] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, Sep. 2004.