

Simultane Ermittlung von Schallgeschwindigkeit und Dicke dünner Platten mittels Ultraschall

Stefan J. Rupitsch, Michael Fink, Reinhard Lerch

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland

Email: stefan.rupitsch@fau.de

Einleitung

In technischen Anwendungen ist man häufig mit der zerstörungsfreien und lokalaufgelösten Charakterisierung von dünnen plattenförmigen Materialien konfrontiert. Beispielsweise gilt es, Inhomogenitäten in Platten zu lokalisieren oder die Plattendicke zu bestimmen. Hierfür eignen sich im Besonderen Ultraschallmessverfahren, die im Puls-Echo-Modus arbeiten [1]. Bei bekannter Plattendicke d_M kann aus der Laufzeit der Schallwellen auf die Schallgeschwindigkeit c_M der Longitudinalwellen in der Platte geschlossen werden. Gleichermäßen ist bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Plattendicke ermittelbar. Dieser Beitrag behandelt ein Ultraschallmessverfahren, das im Transmissions-Modus die simultane Bestimmung von c_M und d_M für homogene plattenförmige Materialien erlaubt. Es wird das zugrundeliegende Messprinzip beschrieben sowie auf mögliche Ansteuersignale des Sendeprüfkopfs eingegangen. Mit Hilfe unterschiedlicher Materialproben erfolgt eine Bewertung des Messverfahrens.

Messprinzip

Grundsätzlich werden zwei getrennte Messungen im Transmissions-Modus durchgeführt (siehe Abb. 1): (i) ohne Materialprobe d.h. es befindet sich nur das akustische Koppelmedium zwischen Sender und Empfänger der Ultraschallwellen; (ii) die zu untersuchende plattenförmige Probe befindet sich zwischen Sender und Empfänger. Während Messung (i) für die verwendete Sender-Empfänger-Konfiguration einmal durchgeführt wird, ist Messung (ii) bei unterschiedlichen Materialproben zu wiederholen. Das Messverfahren basiert auf der Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen in der Probe, was zeitversetzte Schallausbreitungspfade bedingt [2]. Durch mathematische Umformungen ergeben sich für die Messanordnung folgende analytische Zusammenhänge

$$c_M = c_W \left[\frac{2(t_W - t_0)}{t_d} + 1 \right] \quad (1)$$

$$d_M = c_W \left[t_W - t_0 + \frac{t_d}{2} \right] \quad (2)$$

mit den Größen

- t_W Laufzeit der Schallwellen ohne Probe
- t_0 Laufzeit des direkt transmittierten Schalls
- t_1 Laufzeit der ersten Mehrfachreflexion
- $t_d = t_1 - t_0 = 2d_m/c_M$; Versatzzeit
- c_W Schallgeschwindigkeit im Koppelmedium.

Falls die Laufzeiten t_W , t_0 , t_1 (bzw. t_d) der Schallwellen

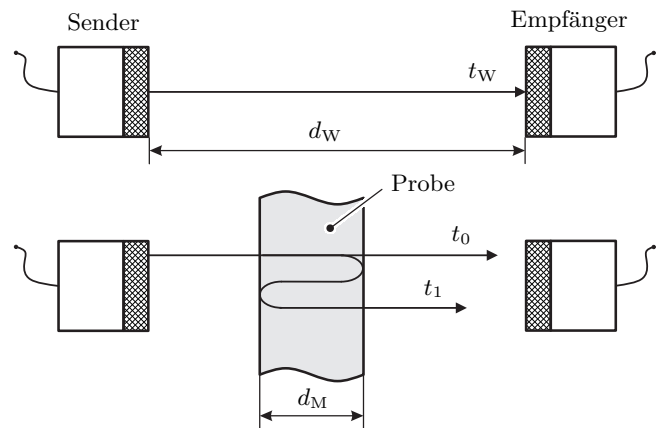


Abbildung 1: Zwei getrennte Ultraschallmessungen im Transmissions-Modus zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c_M in der plattenförmigen Probe sowie deren Dicke d_M .

len zwischen Sender und Empfänger sowie die Schallgeschwindigkeit c_W bekannt sind, können somit c_M und d_M simultan ermittelt werden.

Ansteuersignale

Bei herkömmlichen Anwendungen werden Ultraschallprüfköpfe mit zeitlich kurzen elektrischen Pulsen zum Schwingen angeregt [1]. Für die konkrete Anordnung bedeutet dies, dass der Sender einen kurzen Ultraschallpuls aussendet, der durch die Probe zum Empfänger läuft und von diesem wiederum in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die Dauer des ausgesendeten Ultraschallpulses hängt vorwiegend von der charakteristischen Mittenfrequenz des Senders ab und kann deshalb nicht beliebig kurz gewählt werden. Für dünne Platten und hohe Schallgeschwindigkeiten ist die Versatzzeit t_d zwischen direkt transmittiertem Schall und der ersten Mehrfachreflexion oftmals geringer als die Pulsdauer. Daher können die einzelnen Pulse nicht voneinander getrennt und folglich die Laufzeiten (t_0 bzw. t_1) der Schallwellen nicht eindeutig ermittelt werden. Als alternative elektrische Ansteuersignale wurden hier frequenzvariable Signale verwendet, deren Momentanfrequenz linear von der Startfrequenz f_U bis zur Endfrequenz f_O ansteigt [3]. Diese sogenannten linearen Up-Chirpsignale erzeugen am Sender eine entsprechende Ultraschallwelle $S(t)$, die durch die Probe zum Empfänger läuft. Die Überlagerung des direkt transmittiertem Schalls $T_0(t)$ und der zeitlich versetzten ersten Mehrfachreflexion $T_1(t)$ (siehe Abb. 3) führt am Empfänger auf ein Schwebungssignal. Zwischen der

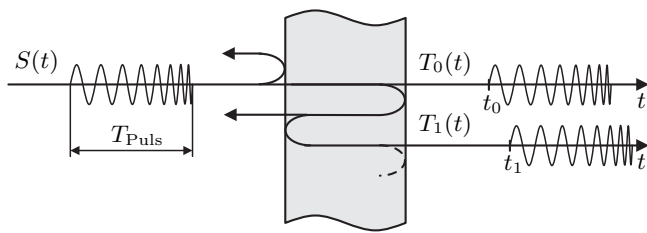


Abbildung 2: Direkt transmittierte Schallwelle $T_0(t)$ und zeitlich versetzte Mehrfachreflexion $T_1(t)$ für einen linearen Up-Chirp mit der Pulsdauer T_{Puls} als Ansteuersignal.

Versatzzeit t_d , der Periodendauer T_S des Schwebungssignals sowie der Pulsdauer T_{Puls} und der Bandbreite B des Chirpsignals ergibt sich der elementare Zusammenhang

$$t_d = 2 \frac{T_{Puls}}{B \cdot T_S} \quad (3)$$

Da sowohl T_{Puls} als auch B durch das Ansteuersignal vorgegeben sind, kann mit der ermittelten Periodendauer T_S des Schwebungssignals direkt auf t_d geschlossen werden.

Resultate

Im realisierten Messaufbau kamen unfokussierte Immersionsprüfköpfe mit der Mittenfrequenz $f_M = 2,25$ MHz als Sender und Empfänger der Ultraschallwellen zum Einsatz. Um Nahfeldeffekte bei der Messung zu vermeiden, wurden die beiden Prüfköpfe im Abstand $d_W > 200$ mm im Wasserbad positioniert. Als Anregungssignal des Senders diente ein lineares Up-Chirpsignal mit der Startfrequenz $f_U = 1,25$ MHz, der Bandbreite $B = 2$ MHz und der Pulsdauer $T_{Puls} = 150 \mu s$. Abbildung 3 zeigt das transmittierte Schwebungssignal $T_{ges}(t)$ am Empfänger für eine plattenförmige Aluminiumprobe mit der Plattendicke $d_M \approx 4$ mm. Aus der Schwebungsperiodendauer $T_S = 120 \mu s$ und den gewählten Parametern des Anregungssignals folgt mit Gl. (3) für die Versatzzeit $t_d = 1,25 \mu s$. Tabelle 1 enthält die ermittelte Plattendicke d_M und Schallgeschwindigkeit c_M für die Aluminiumprobe sowie zusätzlich als ausgewählte Beispiele für eine Plexiglas- und Stahlplatte. Die Referenzwerte für d_M beziehen sich hierbei auf das Messergebnis eines digitalen Messschiebers, der eine Messunsicherheit von $\pm 0,03$ mm aufweist. Als Schallgeschwindigkeitsreferenzen wurden übliche Kennwerte aus der Literatur übernommen.

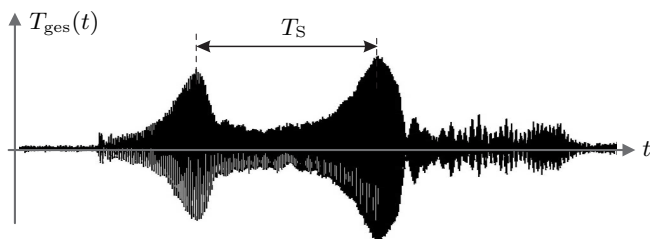


Abbildung 3: Transmittiertes Schwebungssignal $T_{ges}(t)$ am Empfänger mit der Schwebungsperiodendauer T_S .

Die Einträge in Tab. 1 verdeutlichen, dass die simultane

Tabelle 1: Gegenüberstellung der ermittelten Plattendicke d_M und Schallgeschwindigkeit c_M mit Referenzwerten für diverse plattenförmigen Materialien (Messabweichung $\Delta_{d,c}$).

Parameter	Aluminium	Plexiglas	Stahl
d_M (Ref.)	4,02 mm	4,92 mm	1,04 mm
d_M (Mess.)	4,013 mm	4,915 mm	1,084 mm
$ \Delta_d $	0,16 %	0,09 %	4,21 %
c_M (Lit.)	6420 m/s	2700 m/s	5920 m/s
c_M (Mess.)	6442,6 m/s	2705,3 m/s	6193,1 m/s
$ \Delta_c $	0,35 %	0,19 %	4,61 %

Ermittlung von d_M und c_M sowohl für die Aluminium- als auch die Plexiglasprobe auf Messabweichungen $< 0,5$ % führt. Bei der untersuchten Stahlprobe ergeben sich allerdings erheblich größere Messabweichungen, was auf die Kombination von Schallgeschwindigkeit, Plattendicke und Ultraschallfrequenz zurückzuführen ist. Die bestimmende Größe ist hierbei das Verhältnis von Plattendicke zu Wellenlänge λ . Obwohl bei der untersuchten Stahlprobe $d_M \approx \lambda/3$ gilt, liefert das Messprinzip mit dem gewählten Up-Chirpsignal Messabweichungen < 5 % für Plattendicke und Schallgeschwindigkeit.

Zusammenfassung

Es wurde ein ultraschallbasiertes Messprinzip vorgestellt, mit dem sowohl die Schallgeschwindigkeit in homogenen plattenförmigen Proben als auch deren Plattendicke simultan ermittelbar sind. Die Ansteuerung des Sendeprüfkopfs erfolgt mit einem Up-Chirpsignal. Aufgrund von Mehrfachreflexion ergibt sich am Empfangsprüfkopf ein Schwebungssignal, dessen Periodendauer zur Charakterisierung von Schallgeschwindigkeit und Plattendicke genutzt wird. Auch bei Proben, deren Dicke kleiner als die Wellenlänge der Ultraschallwellen ist, werden Messabweichungen < 5 % erzielt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 39 PT-PIESA (Teilprojekt C06) von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Literatur

- [1] Lerch, R., Sessler, G., Wolf, D.: Technische Akustik. Springer, Berlin, 2009
- [2] Hsu, D., Hughes, M.: Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites. Journal of the Acoustical Society of America 92 (1992), 669-675
- [3] Misaridis, T., Jensen, J.: Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 52 (2005), 177-201