

Genauigkeit der Wanddickenmessung: Verbesserte Messtechnik und Grenzen in der Praxis

Dietger SCHÄLE, Wolfram DEUTSCH
KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG
Otto-Hausmann-Ring 101
42115 Wuppertal
0202/7192-0

Kurzfassung. Mit der Weiterentwicklung der Elektronik hat sich auch bei Wanddickenmessgeräten die Messtechnik verbessert. Die Messung der Laufzeit ist immer präziser geworden und ermöglicht die Bestimmung der Wanddicke auf hohem Niveau.

Doch wo liegen die tatsächlichen Grenzen der Genauigkeit in der praktischen Anwendung? Dieser Beitrag zeigt auf, wo die messtechnisch erreichbaren Genauigkeiten liegen und beleuchtet verschiedene Aspekte, die diese in der Praxis einschränken.

Einführung

Bis in die 90er Jahre wurde die Laufzeit in der Ultraschallmessung mit Hilfe von elektronischen Zählbausteinen ermittelt, deren Taktrate zwischen 1 und 20 MHz lag. Bei 20 MHz erhält man eine Zeitauflösung von 50 ns. Im Impuls-Echo-Verfahren ergibt sich daraus für die Wanddickenmessung in Stahl eine Messunsicherheit von 0,15 mm (Stahl).

Da inzwischen Taktraten bis zu 1 GHz erreicht werden, hat sich die Messunsicherheit bei diesem Verfahren auf 0,003 mm (Stahl) reduziert.

Oftmals wird aber eine noch höhere Auflösung von 0,001 mm gewünscht. Diese kann durch spezielle Zeitmess-Bausteine erreicht werden, bei denen mit einer Auflösung von 50 ps gemessen werden kann was einer Auflösung von 0,00015 mm (Stahl) entspricht.

Diese hohe Auflösung der Messtechnik, die inzwischen auch für batteriebetriebene Handgeräte zur Verfügung steht, ist in der Praxis jedoch von mehreren Faktoren begrenzt.

1. Die Genauigkeit in der Praxis

1.1 Messmethode

Um genaue Messwerte zu erhalten, ist es wichtig, eine geeignete Messmethode zu wählen. Die Messung mit SE-Prüfköpfen (Bild 1) kann aufgrund des Umwegfehlers mit einer Ungenauigkeit von bis zu 0,1 mm (Stahl) behaftet sein. In der Praxis werden zwar meistens bessere Werte erreicht, aber für eine hochgenaue Messung sind auch diese Werte noch zu hoch.

Ebenso ist die Messung der Laufzeit vom Sendeimpuls bis zum Rückwand-Echo mit einem Fehler behaftet, da die Schalllaufzeit im Koppelspalt mit gemessen wird. Diese kann zwar sehr dünn sein (5 .. 50 μm ist eine realistische Koppelspalt-Dicke), aber durch die geringere Schallgeschwindigkeit des Koppelmittels wird bei der Dickenberechnung von Stahl der Messfehler vervierfacht. Das heißt: Eine Ungenauigkeit von 0,2 mm (Stahl) ist durchaus möglich.

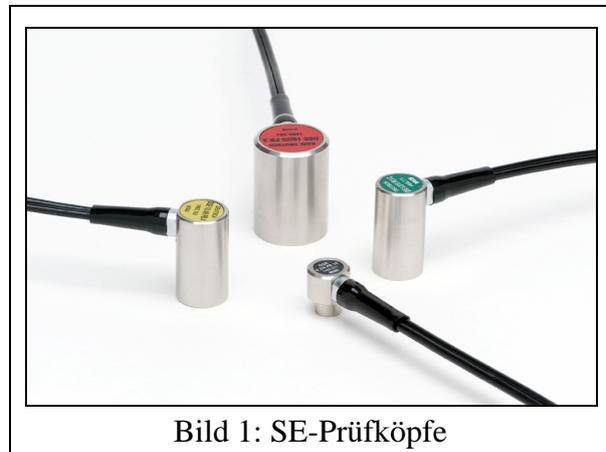


Bild 1: SE-Prüfköpfe

Nur die Messung mit einem Einschwinger-Prüfkopf ermöglicht in Verbindung mit der Auswertung der Laufzeit zwischen zwei aufeinander folgenden Rückwandechos (RE-RE-Messung) eine hohe Genauigkeit ohne systematische Fehler.

1.2 Triggerzeitpunkt

Auch die Art der Triggerung ist von entscheidender Bedeutung für die Messgenauigkeit.

Die Mess-Elektronik muss aus dem analogen Prüfkopf-Signal einen digitalen Impuls erzeugen, der die Mess-Zeitpunkte bestimmt. Dazu gibt es verschiedene Verfahren.

Bei der Flanken-Triggerung entsteht eine Laufzeitdifferenz zwischen Nulldurchgang und tatsächlichem Trigger-Zeitpunkt. Diese Laufzeitdifferenz ist amplitudenabhängig, sofern mit einer festen Triggerschwelle gearbeitet wird, und kann bei stark dämpfenden Materialien zu Messfehlern bis zu 0,1 mm (Stahl) führen (Bild 2). In der Praxis lässt sich dieser Laufzeitfehler reduzieren, indem die Empfänger-Signale hoch verstärkt werden und dadurch der Signalverlauf im Nulldurchgang steiler wird.

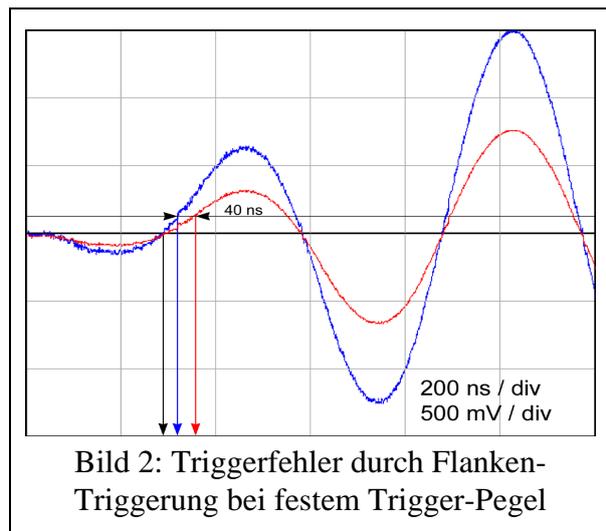


Bild 2: Triggerfehler durch Flanken-Triggerung bei festem Trigger-Pegel

Auch die Spitzenwert-Triggerung ist nicht optimal, da die Steigung des Signals im Scheitelpunkt sehr flach ist und sich der Zeitpunkt des tatsächlichen Maximalwertes nicht hinreichend genau ermitteln lässt. Eine Messung mit einem 2-MHz-Prüfkopf und einer Laufzeit-Unsicherheit von $1/32 \lambda$ (λ = Wellenlänge des Prüfsignals) würde zu einem Messfehler von 0,1 mm (Stahl) führen.

Notwendig für eine hochgenaue Messung ist deshalb eine Nulldurchgangs-Triggerung, bei der kein systematischer Fehler auftritt. Hierbei muss jedoch sichergestellt werden, dass keine niederfrequenten Signale überlagert sind, die den tatsächlichen Nullpegel und dadurch den Triggerzeitpunkt verschieben könnten.

1.3 Schallgeschwindigkeit

Weitere Voraussetzungen für exakte Messwerte betreffen die Schallgeschwindigkeit. Erforderlich ist sowohl eine Kenntnis der genauen Schallgeschwindigkeit als auch die Homogenität der Schallgeschwindigkeit im Material. Eine Variation von ± 20 m/s führt bei einem Werkstück von 30 mm Dicke bereits zu einem Messfehler von 0,1 mm (Stahl). Bei Anforderungen an die Messgenauigkeit im μm -Bereich muss die Schallgeschwindigkeit in der Größenordnung von 0,1 m/s bekannt sein. Dies ist in der Praxis eine hohe Herausforderung, kann jedoch durch vergleichende Messungen sichergestellt werden, indem die Schallgeschwindigkeit bei der Kalibrierung an einem Referenz-Prüfling ermittelt wird. Zusätzlich muss die Homogenität der Schallgeschwindigkeit im Material in der gleichen Größenordnung garantiert sein.

1.4 Konzentrationsmessung

Die volle Auflösung der Messtechnik kann insbesondere bei der Konzentrationsmessung (Bild 3) genutzt werden.

In Flüssigkeiten ist die Schallgeschwindigkeit abhängig von der Konzentration der einzelnen Bestandteile. Insbesondere bei Mischungen von zwei verschiedenen Komponenten lässt sich daher die Konzentration durch die Messung der Schallgeschwindigkeit ermitteln.

Mit der hohen Auflösung der Laufzeit ist es möglich, die Schallgeschwindigkeit von Flüssigkeiten auf zwei Nachkommastellen stabil anzuzeigen, was einer Genauigkeit von 0,001 % entspricht. Diese hohe Auflösung ist bei der Konzentrationsmessung erforderlich, da sich die Schallgeschwindigkeit aufgrund von Konzentrationsänderungen oftmals nur geringfügig ändert.

Für eine hohe Messgenauigkeit müssen aber auch hier weitere Kriterien beachtet werden: Die Nulldurchgangstriggerung ist eine notwendige Voraussetzung für die Genauigkeit der Messung. Ebenso muss ein Prüfkopf verwendet werden, bei dem sich Sender und Empfänger exakt planparallel gegenüberstehen und somit keine Umwegfehler entstehen, die den Messwert verfälschen könnten. Kritisch ist jedoch die exakte Kenntnis der tatsächlichen freien Lauflänge, die ebenfalls auf 0,001 % bekannt sein muss. Bei dem in Bild 3 gezeigten Prüfkopf mit einer Lauflänge von 20 mm wären das 0,2 μm . Das zeigt, dass diese hohe Messgenauigkeit als Absolutwert nur mit einer sehr aufwändigen Kalibrierung möglich ist.



Bild 3: Konzentrationsmessgerät
ECHOMETER 1076 K

Vergleichende- und Differenz-Messungen lassen sich jedoch mit der vollen Auflösung bei einer hohen absoluten Genauigkeit durchführen.

Dass die Messungen in der Praxis ganz hervorragende Ergebnisse liefern, zeigt (Bild 4) anhand gemessener Schallgeschwindigkeiten in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur.

Dort sieht man einen Vergleich zwischen Literaturwerten [1] (grau) und Messungen mit dem hier vorgestellten Gerät (schwarz). Der mittlere Messfehler des gesamten Aufbaus beträgt 0,12 %. Hierbei gehen die Fehler der Temperaturmessung und die der Schallgeschwindigkeitsmessung ein.

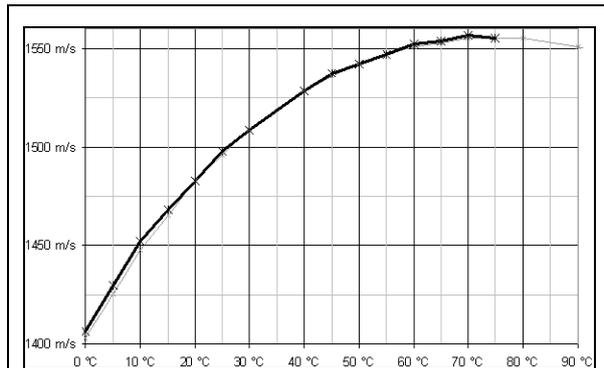


Bild 4: Schallgeschwindigkeitsverlauf H₂O über die Temperatur

2. Zusammenfassung

Die Steigerung der Messgenauigkeit bei der Zeitmessung zeigt ihre Stärken in Bezug auf Wanddicken- und Schallgeschwindigkeitsmessung insbesondere in der Wiederholgenauigkeit und bei Vergleichsmessungen. In der Praxis sind jedoch längst nicht mehr die Genauigkeiten der Messtechnik begrenzende Faktoren, sondern die Messbedingungen und die Messmethode. Daraus resultieren folgende Forderungen an den Messaufbau:

- Messmethode: RE-RE-Messung
- Triggerung: Nulldurchgangs-Triggerung
- Prüfkopf: Einschwinger, Prüfkopffrequenz > 10 MHz
- Messobjekt: Homogene, sehr genau bekannte Schallgeschwindigkeit

3. Literatur

- [1] Dr.-Ing. Heiner Grimm
http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html#kap11