

Optimierung von Ultraschall- Fokusprüfköpfen beim Einsatz an stark gekrümmten Oberflächen

Thomas HECKEL, Rainer BOEHM, Dirk GOHLKE
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachgruppe 8.4, Akustische und Elektromagnetische Verfahren
Arbeitsgruppe 8.43, Ultraschallsonderprüftechniken
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Tel.: +49 30 8104 3686
Fax.: +49 30 8104 1846
thomas.heckel@bam.de

Kurzfassung. Bei der Prüfung von gekrümmten Bauteilen in Tauchtechnik muss man die Veränderung des Schallfeldes durch die Form der Oberfläche berücksichtigen. Insbesondere bei hochauflösenden Ultraschallprüfungen mit Fokusprüfköpfen kommt es hierbei zu drastischen Verzerrungen des Schallfeldes. Diese Verzerrungen sind bei der Empfindlichkeitseinstellung sowie bei der Auslegung von Fokuspunkt- und Spurbstand zu berücksichtigen, um eine ausreichende Prüfeempfindlichkeit zu erreichen. Es werden Beispiele von Simulationsrechnungen an typischen Prüfanordnungen vorgestellt.

Einführung

Bei der Auswahl von Fokusprüfköpfen spielen hauptsächlich neben dem gewünschten Fokusabstand, der Schwingerdurchmesser und die Prüffrequenz eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich unterscheidet man die Bauart des Prüfkopfes in punkt- und linienfokussierend. Bei hochauflösenden Messungen in Tauchtechnik werden typischerweise Punktfokusprüfköpfe eingesetzt. Ziel ist es hierbei, das erfasste Volumen im empfindlichen Bereich des Prüfkopfes, dem sogenannten „Fokusschlauch“, zu minimieren. Es werden hier Schallbündeldurchmesser von ca. 0,5 mm bis 2 mm angestrebt. Dies bedeutet andererseits, dass der erforderliche Messpunktstand bei der mechanisierten Prüfung typischerweise im Bereich von 0,25 mm bis 1 mm liegt. Mit dieser Anordnung ist es möglich, Registriergrenzen bis 0,125 mm zu realisieren.

Reflektorgrößenbestimmung

Bei hochauflösenden Messungen in Tauchtechnik geht man davon aus, dass die aufzufindenden Reflektoren „klein“ sind. Bevorzugt wird nach Einschlüssen, Poren oder Lunkern gesucht. Bezogen auf den Schallbündeldurchmesser bedeutet dies, dass die Mehrzahl der Reflektoren im Allgemeinen kleiner als der Bündeldurchmesser des Fokusprüfkopfes sind und die Größenbestimmung des Fehlers allein über die

Echoamplitude erfolgt. Reflektoren in der Größe des Bündeldurchmessers lassen sich durch die hohe Positionsauflösung mit Hilfe der Halbwertsmethode ermitteln.

Beim Einsatz von Fokusprüfköpfen in Tauchtechnik ist eine Auswertung mit der AVG-Methode nur sehr begrenzt möglich. Hier findet vorzugsweise die DAC-Methode Anwendung. Dies erfordert, dass für die Justierung Vergleichskörper mit entsprechenden Justierreflektoren (vorzugsweise Flachbodenbohrungen) zur Verfügung stehen.

Bei den meisten Prüfteilen, die hochauflösend geprüft werden, handelt es sich um rotationssymmetrische Bauteile, wie z. B. Stangen, Rohre oder Ringe. Die gekrümmte Oberfläche der Bauteile führt dazu, dass das Schallfeld beim Eintritt des Schalls in das Bauteil geometrieabhängig verzerrt wird. Dies hat eine Änderung des Fokusschlauchs in Form und Schalldruckverteilung zur Folge.

Werden in einer Prüfanlage viele Bauteile mit unterschiedlichen Abmessungen geprüft, so ist für jede Bauteilgeometrie ein entsprechender Justierkörper notwendig. Die Vorhaltung der Justierkörper und die Justierung der Anlage stellt bei häufigem Geometriewechsel einen hohen Zeit- und Kostenfaktor dar.

Schallfeldsimulation

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen kann das Brechungsverhalten in Abhängigkeit von den Prüfkopfparametern Schwingerdurchmesser, Nennfrequenz, Fokusabstand und den Bauteilparametern Schallgeschwindigkeit, Krümmungsradius und Krümmungsart (konvex oder konkav) sowie der Schallgeschwindigkeit der Vorlaufstrecke nachgebildet werden. Mit Hilfe der Simulation können für die Prüfaufgabe optimale Prüfgeometrien erarbeitet, ein passender Prüfkopf ausgewählt und eine Berechnung der Prüfempfindlichkeit durchgeführt werden. Für die Berechnungen der Schallfelder wird das Programm Array3D SE, welches von BAM 8.42 erarbeitet worden ist, verwendet.

Grundsätzlich wird durch eine Krümmung der Bauteiloberfläche eine zusätzliche Fokussierung bzw. Defokussierung in Abhängigkeit vom Durchmesser des Fokusschlauchs, dem Krümmungsradius und des Schallgeschwindigkeitsverhältnisses von Bauteil und Vorlaufmedium auftreten.

Die Simulation eines Prüf Szenarios, z. B. für verschiedene Prüfteildurchmesser, erlaubt bei Verwendung desselben Prüfkopfes das Übertragen einer Justierung an einem definierten Durchmesser auf andere Durchmesser. Somit muss nicht zwangsläufig für jedes Prüfteil ein Justierkörper gefertigt werden, sondern die DAC-Kurven können mit Hilfe der Ergebnisse der Simulationen umgerechnet werden.

Aufgrund der Vielfalt der möglichen Prüfparameter und Bauteilgeometrien können im Rahmen dieser Arbeit nicht alle Möglichkeiten aufgezeigt werden. Im Folgenden sind drei ausgewählte Prüf Szenarien mit Parametervariation dargestellt.

Variation des Fokusabstandes

In diesem Beispiel wird die Variation des Abstandes eines Fokusprüfkopfes mit einem Schwingerdurchmesser von 20 mm, einer Mittenfrequenz von 10 MHz und einem Fokusabstand von 100 mm in Wasser dargestellt. Der Fokusdurchmesser beträgt 0,7 mm. Untersucht wird hierbei das Verhalten im Fall einer planen Bauteiloberfläche gegenüber einer konkav bzw. konvex gekrümmten Oberfläche mit einem Krümmungsradius von 125 mm. Alle Grafen bilden den Schalldruck auf der akustischen Achse über dem Schallweg im Bauteil ab.

Bild 1a zeigt den planparallelen Fall. Der Abstand wird in vier Schritten von 20 mm auf 80 mm erhöht. Man erkennt, dass die resultierenden Schallfelder ihre Maxima in

unterschiedlichen Bauteiltiefen erreichen. 20 mm Abstandsänderung des Prüfkopfes zum Bauteil ergeben ca. 5 mm Verschiebung des Schalldruckmaximas im Bauteil. Dies entspricht dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten von ca. 4:1 (Stahl 5920 m/s und Wasser 1480 m/s). In allen Fällen bleiben die maximale Amplitude des Schalldruckes und der Verlauf des Fokusschlauches unverändert.

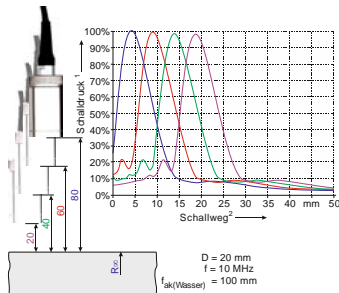


Bild 1a

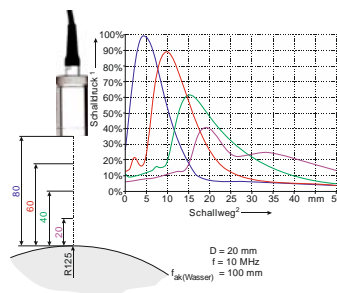


Bild 1b

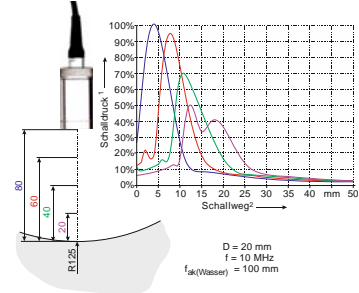


Bild 1c

Bild 1b zeigt das Verhalten bei einem Außenkrümmungsradius von 125 mm. Je dichter der Prüfkopf an das Bauteil herankommt bzw. je tiefer der Fokuspunkt ins Bauteil gelegt werden soll, umso stärker verformt sich das Schallfeld. Bei einem Abstand von 20 mm sind zwei ausgeprägte Maxima mit unterschiedlichen maximalen Schalldrücken im Schallfeld zu erkennen, eines bei 20 mm und ein weiteres bei 35 mm. Weiterhin zeigt sich, dass der maximale Schalldruck bei gekrümmten Bauteilen stark abstandsabhängig ist. Hier geht, bezogen auf den planparallelen Fall bei einem Abstand von 20 mm, der maximale Schalldruck auf 40% zurück. Bezogen auf den Impuls-Echo-Betrieb entspricht das einem Verlust von 14 dB Prüfeempfindlichkeit, da der Verlust sowohl beim Senden als auch beim Empfangen auftritt.

In Bild 1c ist das Verhalten bei einer Innenprüfung mit einem Krümmungsradius von 125 mm dargestellt. Auch hier ist zu beobachten, dass die maximale Amplitude zu kürzeren Abständen abnimmt. Auch das Schallfeld wird durch den Krümmungseinfluss verformt. Bei 20 mm Abstand ergeben sich zwei Maxima bei 13 und 18 mm gegenüber einem Maxima bei 19 mm im planparallelen Fall. Die maximale Amplitude geht auf 50% zurück, was bei einem Impuls-Echo-Betrieb einem Verlust von 12 dB Prüfeempfindlichkeit entspricht (s. o.).

Variation des Bauteilradius

In diesem Beispiel wird die Variation des Radius des zu prüfenden Bauteils bei vorgegebenem Wasservorlauf mit einem Fokusprüfkopf mit einem Schwingerdurchmesser von 20 mm, einer Mittenfrequenz von 10 MHz und einem Fokusabstand von 100 mm in Wasser dargestellt. Untersucht wird hierbei das Verhalten im Fall einer planen Bauteiloberfläche gegenüber konkav und konvex gekrümmten Oberflächen bei einem Wasservorlauf von 20 mm. Alle Grafen bilden den Schalldruck auf der akustischen Achse über dem Schallweg im Bauteil ab. Bild 2a zeigt den planparallelen Fall.

In Bild 2b sind die Schalldruckverteilungen bei unterschiedlichen äußeren Krümmungen dargestellt. Bereits ein Radius von 400 mm reduziert den Schalldruck um 20%, bei einem Radius von 150 mm wird eine deutliche Verformung des Schallfeldes durch den defokussierenden Einfluss der Krümmung erkennbar und bei kleineren Radien sinkt die maximale Amplitude weiter ab. Bezogen auf einen Impuls-Echo-Betrieb anstelle der Schalldruckbetrachtungen reduziert sich die Empfindlichkeit bei einer Krümmung von

25 mm im Gegensatz zum planparallelen Fall um 20 dB. Die Tiefenlage des maximalen Schalldrucks wird im Wesentlichen nicht von der Krümmung beeinflusst.

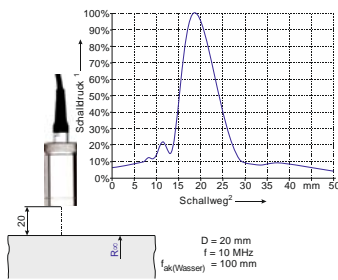


Bild 2a

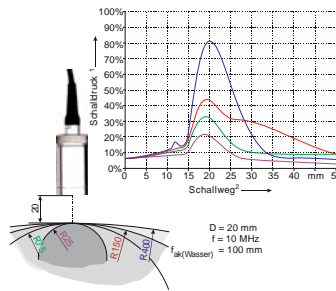


Bild 2b

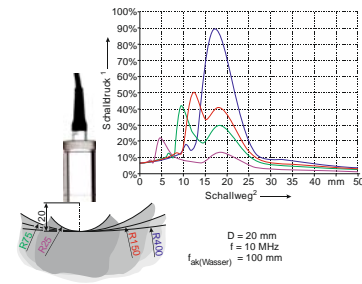


Bild 2c

Bild 2c zeigt, wie sich die Situation bei einer Prüfung von der inneren Krümmung aus darstellt. Bei einem Radius von 400 mm ist bereits ein leichter Rückgang der Amplitude erkennbar, bei 150 mm bilden sich zwei deutliche Maxima bei 12 mm und 18 mm aus. Hier beträgt die Amplitude des Maximums bei 12 mm 50% gegenüber dem planparallelen Fall. Das Maximum bei 12 mm wird durch die fokussierende Wirkung der Krümmung verursacht, das eigentliche, vom Fokusprüfkopf stammende Maximum bei 18 mm, erreicht nur 40% des Ausgangswertes im planparallelen Fall. Deutlich erkennbar ist die Verschiebung des Schalldruckmaximums zu geringeren Bauteiltiefen. Bezogen auf eine Impuls-Echo-Anordnung reduziert sich die Empfindlichkeit bei einem Radius von 25 mm im Gegensatz zum planparallelen Fall um 20 dB (s.o.).

Prüfung nach SEP 1927

Das Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1927 beschäftigt sich mit hochauflösender Ultraschallprüfung zur Bestimmung des akustischen Reinheitsgrades. In dem Regelwerk wird eine fest vorgegebene Prüfkopfanordnung verwendet. Es werden fünf Empfindlichkeitsklassen, ausgehend von KSR 1,0 mm, definiert. Bild 3a zeigt die vorgegebene Prüfanordnung, wie sie in der Ausgabe von 2010 vorgegeben ist. Es ist zu erkennen, dass bei der gewählten Anordnung, bestehend aus einem unfokussierten 10 MHz Prüfkopf mit 6,25 mm Schwingerdurchmesser und einem Abstand zur Bauteiloberfläche von 40 mm, der Einfluss des Bauteildurchmessers bei Werten über 25 mm eine untergeordnete Rolle spielt.

Bild 3b zeigt die Anordnung, wie sie die ältere Ausgabe der SEP 1920 von 2001 gefordert hat. Der einzige Unterschied ist der gewählte Prüfkopf Abstand von 20 mm. Hier ist ein deutlicherer Einfluss durch die Krümmung insbesondere bei kleinen Radien zu erkennen. Durch die Überarbeitung der Norm im Jahre 2010 konnte dieser Einfluss verringert werden (vgl. Bild 3a). Es kann festgestellt werden, dass durch die Erhöhung des Prüfkopf Abstandes die Prüfeempfindlichkeit vor allem für Bauteile mit starker Krümmung gestiegen ist.

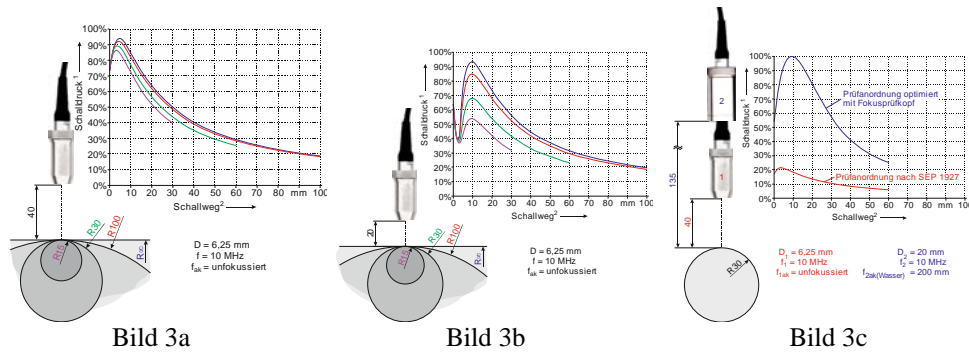


Bild 3a

Bild 3b

Bild 3c

Bild 3c zeigt die Optimierung der Prüfkopfanzordnung nach SEP 1927 für einen definierten Bauteildurchmesser von 60 mm durch die Verwendung eines fokussierenden Prüfkopfes. Anstelle des unfokussierten 6,25 mm Schwingers mit einer Frequenz von 10 MHz bei einem Abstand von 40 mm wird ein 20 mm Schwinger ebenfalls mit 10 MHz und einem Fokusabstand von 200 mm in Wasser verwendet. Bei einem Bauteilradius von 30 mm und einer Wasservorlaufstrecke von 135 mm kann im Bauteil etwa der fünffache Schalldruck erreicht werden. Dies bedeutet, dass mit dieser Anordnung in Impuls-Echo-Betrieb eine Empfindlichkeitssteigerung um bis zu 20 dB erzielt werden kann.

Zusammenfassung

Der Einsatz von fokussierenden Prüfköpfen an gekrümmten Bauteilen kann mit Hilfe von Simulationsrechnungen optimiert werden. Extreme Änderungen der Prüfeigenschaften und der Fokusschläuche durch die Krümmung können nachvollzogen und durch geschickte Wahl der Prüfkopfparameter und der Vorlaufstrecke minimiert werden. Auch eine Übertragung einer Empfindlichkeitsjustierung auf unterschiedliche Durchmesser ist mit Hilfe der Simulationen möglich. Insbesondere bei der hochauflösenden Prüfung nach SEP 1927 bietet der Einsatz von fokussierenden Prüfköpfen, deren Parameter durch Simulation optimiert an das Prüfteil angepasst worden sind, deutliche Empfindlichkeitssteigerungen.