

# Clamp-On-Doppler-Meßsysteme - Schallfeld und örtliche Amplitudenempfindlichkeit

Johann Gätke, Olaf Specht, Mathias Panicke  
Universität Rostock, FB Elektrotechnik und Informationstechnik

In der industriellen Durchflußmeßtechnik etablieren sich zunehmend eingriffsfreie akustische Meßverfahren. Dabei hat sich das Laufzeitverfahren klar gegenüber dem Doppler-Verfahren behauptet. Gründe dafür werden oft in der komplizierteren Signalverarbeitung beim Dopplerverfahren gesucht. Auch der Einsatz moderner Auswerteverfahren konnte die Meßgenauigkeit der Clamp-On-Doppler-Meßsysteme nicht entscheidend verbessern. Die hier vorgestellten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Phänomene der Entstehung der Doppler-Signale in metallischen Rohrleitungen und identifizieren den Schalldurchgang durch die Rohrwand als eine mögliche Hauptfehlerquelle.

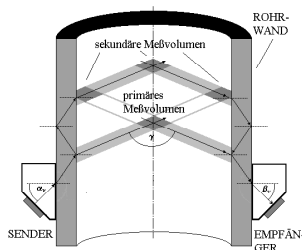


Abbildung 1: Doppler-Clamp-On-Anordnung

Die Abbildung 1 zeigt eine typische Clamp-On-Doppler-Anordnung mit von außen auf die Rohrwand aufgesetzten, gegenüberliegenden Schallwandlern. Bei dem hier betrachteten CW-Verfahren werden ständig Schallwellen in das strömende Medium eingestrahlt und kontinuierlich Rückstreusignale aus dem Meßvolumen empfangen. Diese Meßvolumen bilden sich in den Kreuzungsbereichen der in Abbildung 1 vereinfacht dargestellten Schallkeulen. Durch die Reflexion der Schallstrahlen an der Rohrwand ergeben sich neben dem Hauptmeßvolumen auch Nebenmeßvolumina entlang der Rohrachse und in Rohrwandnähe.

Die sehr unterschiedlichen Schallkennimpedanzen der Materialien der Schallwandler, der Rohrwand und des Fluids bewirken, daß an allen Übergangsflächen neben der Transmission auch Reflexionen entstehen. Durch die Überlagerung der rohrwandinternen Mehrfachreflexionen weist die Rohrwand eine Filterwirkung hinsichtlich der Schallwellenlänge und des Einstrahlwinkels auf. Die Abbildung 2 zeigt beispielsweise die Filtercharakteristik für eine 2,5 mm dicke Edelstahlrohrwand bei einem festen Strahlwinkel in Abhängigkeit von der Schallfrequenz [1]. Ein maximaler Schalldurchgang ergibt sich bei gleichphasiger Überlagerung der sich in der Rohrwand ausbreitenden verkoppelten Longitudinal- und Transversal-Schallwellen.

Das sich ausbildende Schallfeld nach dem Rohrwanddurchgang kann unter anderem nach der Ortsfrequenzbereichs-Methode berechnet werden [2, 3]. Die Abbildung 3 zeigt zwei Beispiele bei gleichem Strahlwinkel und unterschiedlichen Frequenzen. Die Rohrwand mit dem Schallwandler liegt in den Bildern bei  $x = -54$  mm. Bereiche stärkerer Schwärzung stellen höhere Schallintensitäten dar. Beim Rohrwandmaximaldurchgang bei  $f = 3,45$  MHz (Abbildung 3a) erkennt man einen

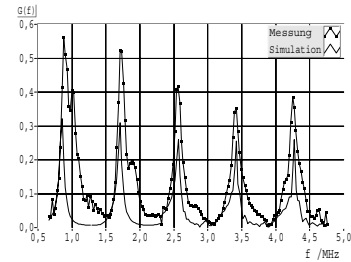


Abbildung 2: Übertragungsfunktion einer Edelstahlrohrwand

konzentrierten Schallstrahl mit relativ gleichmäßiger Intensitätsverteilung. Die Form und der Strahlwinkel entsprechen den theoretisch erwarteten Werten. Wählt man eine Arbeitsfrequenz etwas neben dem Maximaldurchgang, so ergibt sich, wie in der Abbildung 3b dargestellt, durch die Mehrfachreflexionen in der Rohrwand eine charakteristische Streifenstruktur, wobei sich der resultierende Gesamtstrahlwinkel der Schallausbreitung leicht verändert. Diese aus Rechenergebnissen gewonnenen Aussagen werden meßtechnisch durch schlierenoptische Aufnahmen bestätigt. Die Abbildung 4a zeigt das erwartete, konzentrierte und wenig strukturierte Schallfeld hinter der Rohrwand bei der Frequenz des Maximaldurchganges. Die in der Berechnung nicht berücksichtigte Krümmung der Rohrwand bewirkt eine Bedämpfung der Durchgangsmaxima und damit eine vergrößerte Bandbreite. Diese akustischen und geometrischen Effekte bewirken für Schallfrequenzen neben dem Rohrdurchgangmaximum eine Verstärkung der Ungleichmäßigkeit der Schallverteilung nach dem Rohrwanddurchtritt (Abbildung 4b). Das elektro-akustische Übertragungsverhalten der Clamp-On-Doppler-Meßstrecke ergibt sich aus der Multiplikation der Sendewandler-Schallcharakteristik mit der idealisierten Schallstreuungsfunktion des mit dem Fluid mitbewegten Teilchens und mit der Empfangscharakteristik im Ortsbereich. Das Ergebnis dieser Berechnung ist eine ortsabhängige Amplituden- und Doppler-Frequenz-Empfindlichkeit für das Meßvolumen, wie sie die Abbildungen 5a und b für zwei Sendefrequenzen zeigen. Hier entspricht eine stärkere Schwärzung einer höheren Amplitude der Dopplersignale aus diesem Volumenbereich. In der Abbildung 5a findet man das gleichmäßig ausgeprägte Meßvolumen in der Mitte

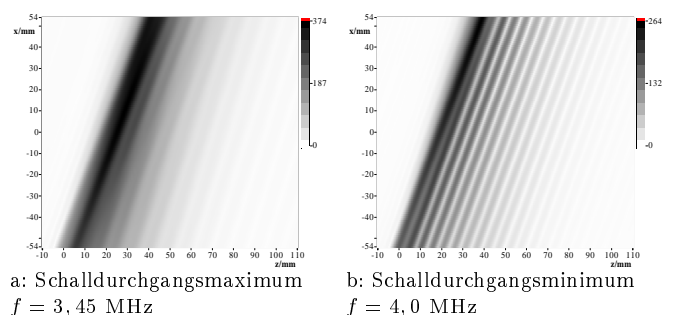


Abbildung 3: Simulierte Schalldurchgänge durch eine Edelstahlrohrwand

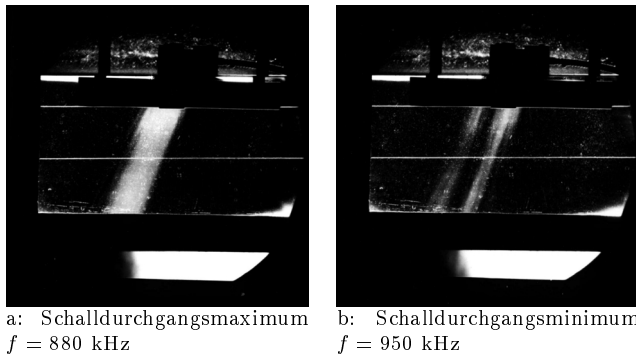


Abbildung 4: Schlierenbilder des Schallfeldes hinter einer Edelstahlrohrwand, 1-MHz-Schallwandler

des Rohres mit der höchsten Amplitudenempfindlichkeit, das aus der Einstrahlung auf einem Rohrwandmaximaldurchgang resultiert. Dabei ist das Hauptmeßvolumen von Bereichen geringerer Empfindlichkeit umgeben, die sich aus der rohrwandbedingten Verbreiterung der Schallkeule ergeben. Bei einer Arbeitsfrequenz neben der Maximumfrequenz des Rohrdurchganges erhält man ein stark streifenartig strukturiertes Meßvolumen weit geringerer Empfindlichkeit (etwa Faktor 10) und stark unterschiedlicher Strahlwinkel.

Ähnliche Verhältnisse sind in einer realen Dopplermessstrecke anzutreffen. Ein Beispiel dafür zeigt die Abbildung 6. Hier wurden die Amplitudenempfindlichkeiten in einem Edelstahlrohr mit Hilfe eines mit konstanter Geschwindigkeit zwangsgeführten Streuteilchens ausgemessen und die Mittelebene zwischen den gegenüberliegenden Schallwandlern (bei  $z = 25$  mm) dargestellt. Die Abbildung 6a für den Rohrwandmaximaldurchgang bei  $f = 880$  kHz zeigt das in der Rohrmitte konzentrierte Hauptmeßvolumen maximaler Amplitudenempfindlichkeit. Durch die Reflexionen an der Rohrrinnenwand entstehen auch Nebenmeßvolumina geringer Empfindlichkeit entlang der Rohrachse. Die darunter befindliche Darstellung der für die Geschwindigkeitsbestimmung meistens genutzten Doppler-Schwerpunktsfrequenz beschreibt die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung für jede  $x$ -Position des Streuteilchens. Die Schwerpunktsfrequenz wird aus dem Spektrum eines Dopplersignals, das bei einem Meßlauf des Streuteilchens in  $z$ -Richtung entsteht, berechnet. Diese Darstellung zeigt für den Bereich des Hauptmeßvolumens mit den höchsten Signalamplituden den erwarteten glatten Verlauf. In den Randbereichen führt das schlechte Signal-Stör-

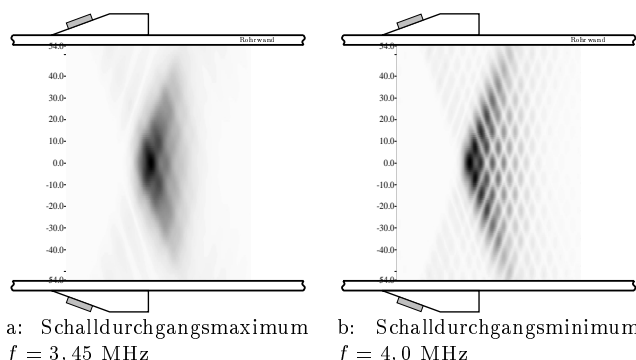
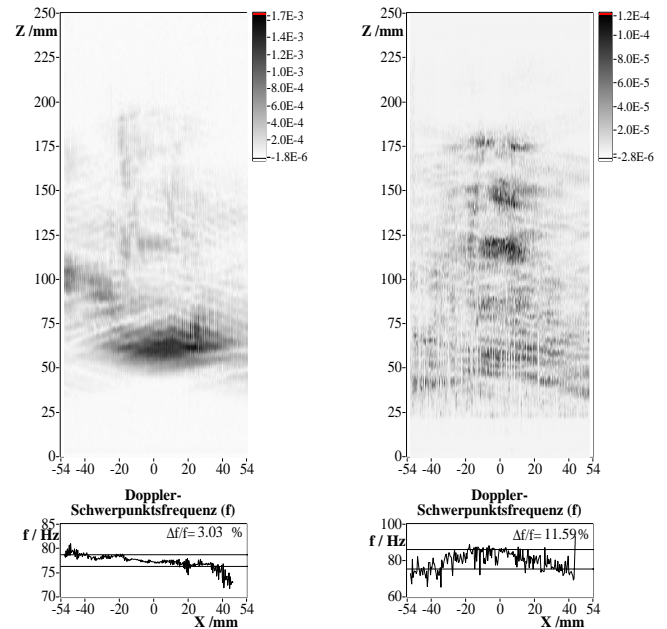


Abbildung 5: Simulierte Doppler-Amplitudenempfindlichkeit in einem Edelstahlrohr



a:  $f = 880$  kHz,  $U_{max} = 1650 \mu V$       b:  $f = 1,05$  MHz,  $U_{max} = 117 \mu V$

Abbildung 6: Doppler-Amplitudenempfindlichkeit im Edelstahlrohr (DN 109, Wand 2,5 mm), 1-MHz-Schallwandler gegenüberstehend

Verhältnis (SNR) zu starken Schwankungen und größeren Fehlern bei der Doppler-Frequenzbestimmung. Der angegebene globale Fehler ist auf die theoretische Dopplerfrequenz  $f_d = f_s \frac{v}{c} 2 \cos \alpha$  bei bekannter Geschwindigkeit  $v$ , Schallgeschwindigkeit  $c$ , Sendefrequenz  $f_s$  und Strahlwinkel  $\alpha$  bezogen. Der Wert von 3% ist für reale Dopplermessungen gut.

Bei einer Arbeitsfrequenz zwischen zwei Rohrwandmaximaldurchgängen wie in Abbildung 6b ( $f_s = 1,05$  MHz) sinkt die Amplitudenempfindlichkeit sehr stark ab (hier Faktor 14) und es ist kein abgegrenztes Meßvolumen mehr zu erkennen. Die Streifenstruktur aus den Berechnungen (siehe Abbildung 5b) ist auch hier sichtbar. Die schlechtere Transmission der Rohrwand bedingt auch eine erhöhte Reflexion an der Rohrrinnenwand, was das verstärkte Auftreten von Nebenmeßvolumina (4 Stück) bei den  $z$ -Positionen  $z = 80$  mm,  $120$  mm,  $140$  mm und  $170$  mm bewirkt. Der Verlauf der Kurve der Doppler-Schwerpunktsfrequenz ist, bedingt durch das schlechte SNR, sehr ungleichmäßig. Der leichte Bogen in der Kurve wie auch die Sprünge haben ihre Ursache in unterschiedlichen Strahlwinkeln, unter denen einzelne Teilmeßvolumina gebildet werden. Es tritt hier ein sehr großer globaler Fehler von 11,6 % auf.

Diese theoretischen und meßtechnischen Untersuchungen zeigen, daß genaue Durchflußmeßergebnisse mit einem Clamp-On-Doppler-Meßsystem nur bei einer Anpassung des Systems an die Schallübertragungscharakteristik der Rohrwand zu erreichen sind.

- [1] O. Specht. *Das Schallfeld und die örtliche Amplitudenempfindlichkeit in Clamp-On-Doppler-Meßsystemen*. Dissertation, Universität Rostock, 1998.
- [2] B. Funck. *Akustische Clamp-on-Meßstrecke*. Dissertation, Universität Rostock, 1995.
- [3] Fiedler, O.; Gätke J.: *DFG-Abschlußbericht Ultraschall-Durchflußsensorik (Fi500/1-3)*. Universität Rostock, 1996.