

Sensorarray für akustische Durchflußmessung

H. Daßler, W. Manthey

Technische Universität Chemnitz-Zwickau
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Einleitung

Akustische Sensoren zur Strömungsmessung in Gasen und Flüssigkeiten müssen an oder in der Rohrwand so angebracht werden, daß das Strömungsprofil des Meßmediums nicht gestört wird sowie der Übergang des Ultraschallsignals in das Schallausbreitungsmedium möglichst ohne zusätzliche Beeinflussung erfolgen kann. Zur Strömungsmessung werden im folgendem Laufzeitverfahren benutzt. Die bei herkömmlichen Einzelwandlern durch den Einbau bedingten Probleme sollen durch Verwendung von Wandlerzeilen, die einen bündigen Abschluß mit der Rohrwand ermöglichen, umgangen werden. Dies erfordert eine Ansteuerung der Elemente der Wandlerzeile so, daß eine gerichtete Schallabstrahlung schräg zur Strömungsrichtung des Schallausbreitungsmediums erfolgt. Durch zeitverschobene Ansteuerung der Elemente läßt sich eine große Meßdynamik auch bei richtscharfer Schallabstrahlung erreichen, bei Strahlverwehung (bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten) kann die Abstrahlrichtung elektronisch gezielt nachgeführt werden. Dabei sind konstruktive Details zu beachten, um die erforderlichen Schwenkwinkel zu gewährleisten.

1 Probleme herkömmlicher Einbauvarianten

Als Dickenschwinger arbeitende Ultraschallwandler weisen eine Schallabstrahlung in Normalenrichtung auf. Um eine von der Strömungsrichtung abhängige Komponente bei Nutzung des Mitnahmeeffektes auswerten zu können, ist eine Schalleinkopplung schräg zur Strömung erforderlich. Bekannt sind zum einen clamp-on-Systeme (Bild 1), die von außen angeklemt werden, wobei die Rohrwand zweimal durchschallt wird. Ein entscheidender Nachteil der **Anklemm**-Systeme ist die in der Regel unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Rohrwand und Medium. Der Schallstrahl erfährt auf der Sender- und auf der Empfängerseite jeweils eine zusätzliche Reflexion und Brechung an den Grenzflächen Wandler - Rohrwand und Rohrwand - strömendes Medium. Der Einstrahlwinkel in das Medium ist begrenzt. Reflexion und Brechung des Schalls an den Grenzflächen sowie die mögliche Aufspaltung in Transversal- und Longitudinalwellen in der Rohrwand führen zur Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses. Bei zweimaligem Durchgang durch ein Eisenrohr muß beispielsweise mit 80dB Dämpfung ge-

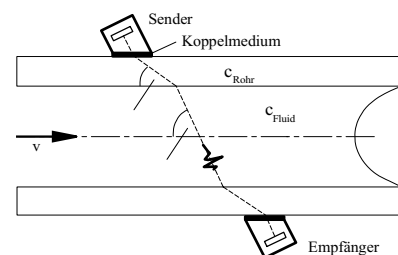


Bild 1 Anklemm-Befestigung

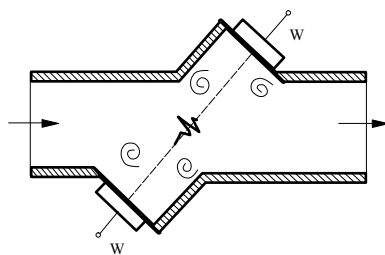


Bild 2 Herkömmlicher Einbau

Der Schallstrahl erfährt auf der Sender- und auf der Empfängerseite jeweils eine zusätzliche Reflexion und Brechung an den Grenzflächen Wandler - Rohrwand und Rohrwand - strömendes Medium. Der Einstrahlwinkel in das Medium ist begrenzt. Reflexion und Brechung des Schalls an den Grenzflächen sowie die mögliche Aufspaltung in Transversal- und Longitudinalwellen in der Rohrwand führen zur Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses. Bei zweimaligem Durchgang durch ein Eisenrohr muß beispielsweise mit 80dB Dämpfung ge-

rechnet werden [1]. Mit **Fluidkontakt**-Systemen (Bild 2) wird üblicherweise eine höhere Genauigkeit als mit Anklemm-Systemen erreicht. Nachteilig sind aber Abrißkanten, an denen sich störende Wirbel ablösen. Außerdem können sich in dem durch den Einbau bedingten Hohlraum Luftblasen, Schwebstoffe und Verunreinigungen absetzen, die entweder eine stetige Wartung erforderlich machen, oder aber prinzipiell ausgeschlossen werden müssen, beispielsweise in Nahrungsmittelindustrie oder Medizin.

2 Einbau von Mehrelementwandlern

Werden Wandler mit einer steuerbaren Abstrahlcharakteristik schräg zur Normalenrichtung des Wandlers bündig in die Rohrwand eingebaut (Bild 3), können einige der angesprochenen Probleme vermieden werden:

- Durch direkte Kopplung Wandler-Fluid lassen sich die Verluste an der Grenzfläche gering halten.
- Eine Beeinflussung des Meßergebnisses durch mehrfach reflektierten Schall wird weitgehend ausgeschlossen, höhere Meßwiederholraten sind erreichbar.
- Durch den zur Rohrwand bündigen Einbau werden Wirbelablösungen sowie Ablagerungen von Verunreinigungen in Hohlräumen vermieden.
- Eine elektronisch steuerbare bzw. nachführbare Abstrahlcharakteristik gewährt die Möglichkeit der Strahlaufrichtung bei Strahlverwehung.

Dies wird realisiert mit einer Mehrelement-Anordnung (MEW), wobei die Einzelelemente separat ansteuerbar sind. Durch mehrmalige Reflexion an der Rohrwand kann der Meßweg verlängert und so die Genauigkeit der Laufzeitmessung erhöht werden (Bild 4).

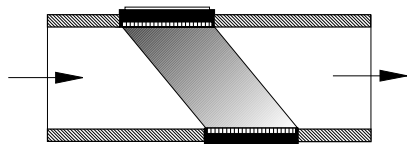


Bild 3 Meßrohrausführung mit MEW

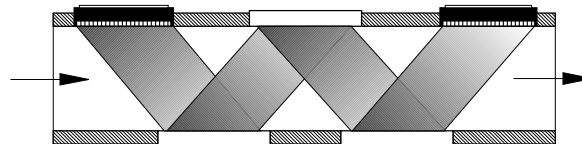


Bild 4 Durchflußmessung mit gefaltetem Strahlengang

3 Zeitverschobene Ansteuerung der Wandlerelemente

Für die richtungsselektive Abstrahlung von Mehrelementwandlern gelten prinzipiell die gleichen Überlegungen wie für die Richtcharakteristik eines Linienstrahlers [2]. Allerdings können die einzelnen Elemente des Mehrelementwandlers aufgrund der endlichen Breite l (Bild 5) nicht als Punktstrahler angesehen werden. In diesem Fall überlagert sich die Richtcharakteristik des Einzelements Γ mit der der Strahlergruppe R_G wie folgt zur Gesamtrichtcharakteristik R_{ges} :

$$R_{ges} = (R_G \cdot \Gamma) \quad (1)$$

Es existiert ein geometrisch und ein elektrisch (durch zeitverschobene Ansteuerung) bedingter Gangunterschied. Die zeitverschobene Ansteuerung der Einzelemente bewirkt die Überlagerung der Beträge des Schalldrucks gleichphasig in der gewünschten Richtung (Bild 5). Voraussetzung für n-fache Superposition ist eine identische Signalform aller Elemente in der ge-

wünschten Abstrahlrichtung. Aus der grundlegenden Beziehung der Abstrahlcharakteristik des Mehrelementwandlers nach Gleichung (1) ergeben sich für eine elektronisch steuerbare Schallabstrahlung Anforderungen an die Einzelemente (Bild 6). Die geometrischen Abmessungen der Einzelemente müssen klein gegenüber der Schallwellenlänge sein. Mit kleiner werdenden Wandlerflächen sinkt zwar die erreichbare Schalldruckamplitude und damit der Signal-Rauschabstand für das empfangene Signal. Dies läßt sich jedoch durch eine Erhöhung der Anzahl der Elemente wieder kompensieren. Ein Kompromiß ist in Bezug auf den elektronischen Aufwand für die Ansteuerschaltung zu finden. Für Wandler mit großer Übertragungsbandbreite ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Ansteuerung, wie

- zeitverschobene Ansteuerung im Impulsbetrieb zur steuerbaren gerichteten Schallabstrahlung oder Schallfokussierung,
- gewichtete Amplituden der Ansteuerspannung der Einzelemente zur Beeinflussung der Form der Richtcharakteristik
- Austastung bestimmter Elemente.

Die theoretischen Minima und Maxima die sich bei phasenverschobener cw-Anregung durch konstruktive und destruktive Überlagerung von Wellenzügen ergeben, bilden sich bei Impulsanregung nicht aus, sofern das Zeitsignal der Wandler kurz ist [3].

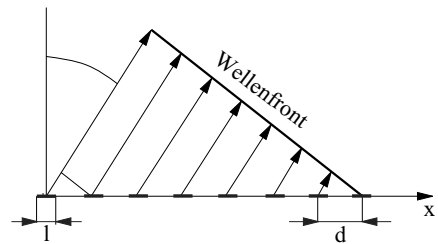


Bild 5 Richtungsselektive Abstrahlung von Mehrelementwandlern

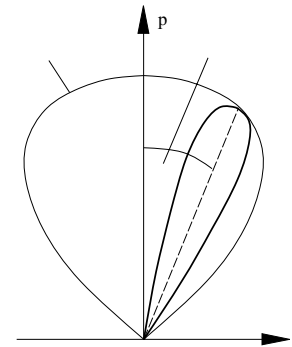


Bild 6 Richtcharakteristik

4 Aufbau der Mehrelementwandler

Als aktives Sensormaterial wird für die Wandlerzeile das Piezopolymer PVDF (Polyvinylidenfluorid) eingesetzt, das für die Realisierung von Wandlern großer Bandbreite besonders geeignet ist [4]. Schmalbandige Wandler, z.B. Piezokeramiken zeigen bei Einzelimpulsanregung ein ausgeprägtes Ein- und Ausschwingverhalten (Bild 7).

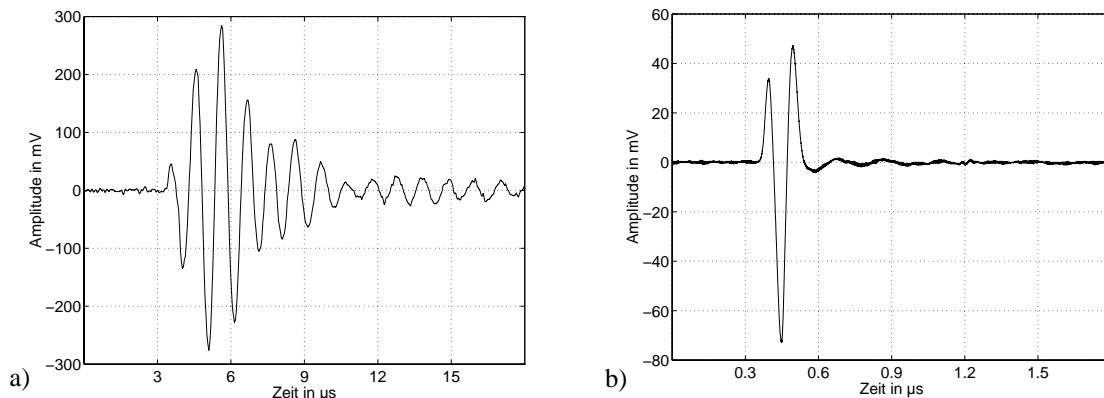


Bild 7 Impulsantwort eines a) Keramik- und b) PVDF-Wandlers bei Schalleinkopplung in Wasser

Hohe Auflösungen sowie kleine Totzeiten bei Einkopfsystemen werden nur mit kurzen steilflankigen Impulsen erreicht, die Verwendung breitbandiger Wandler ist dazu Voraussetzung. Ein Hauptproblem bei Zeilen aus keramischen Wandlern ist das Übersprechen, wobei zwischen akustischem (durch die Ausbreitung der Schallwellen an der Oberfläche der Zeile) und elektrischem Übersprechen (durch die dielektrische Kopplung zwischen den Elementen) unterschieden werden kann. PVDF hat sich aufgrund seiner hohen inneren Dämpfung und seiner niedrigen Dielektrizitätskonstante für derartige Zeilen als besonders geeignet erwiesen.

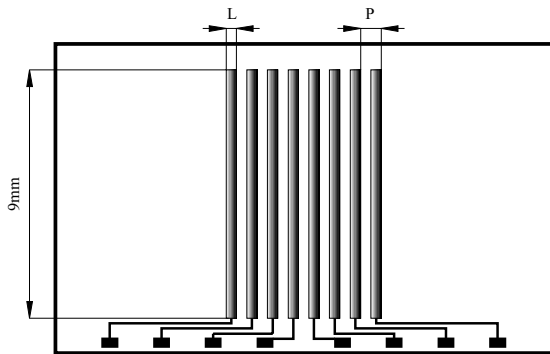


Bild 8 Struktur der Si-Träger

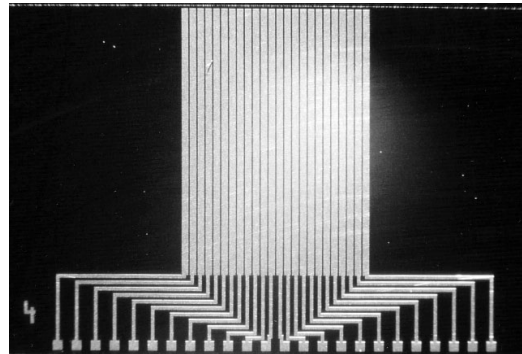


Bild 9 Foto eines 24-Element-Trägers

Die Strukturierung des Mehrelementwandlers wird durch eine entsprechende Elektrodenanordnung auf einem Silizium-Träger vorgegeben, wobei die gewünschte Strukturierung des Trägers zwecks mechanischer Entkopplung benachbarter Elemente durch anisotropes Ätzen hergestellt wird (Bild 8 und 9). Die Elektrodenbreite L wird beispielsweise zwischen 100 und 400 μm und die Interelementabstände P zwischen 0,1 und 1 mm variiert.

5 Ergebnisse

Aus den Darstellungen in den Bildern 10 und 11 sind die akustischen Eigenschaften der PVDF-Wandlerelemente für Schalleinkopplung in Wasser ersichtlich. Sie erfüllen die in den Abschnitten 3 und 4 angesprochenen Anforderungen an die akustischen Sensoren wie Breitbandigkeit und Signaluniformität. Die Darstellung im Bild 11 enthält aus Gründen der Übersichtlichkeit

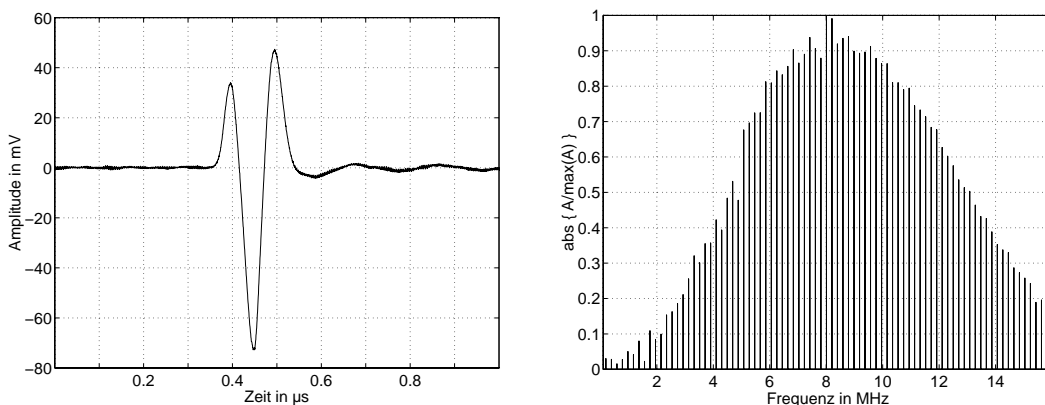


Bild 10 Impulsantwort und Frequenzgang bei Schalleinkopplung in Wasser (Sensorfolie $9\mu\text{m}$)

nur jedes zweite Signal der insgesamt 8 Elemente einer Struktur gemäß Bild 8. Die Anregung erfolgte mit einem positiven Impuls der Breite 70 ns, Impulsamplitude 300 Volt. Durch die Notwendigkeit der Passivierung der Wandleroberfläche gegenüber dem Meßmedium wird eine Vergußschicht vorgesehen, in der sich jedoch unerwünschte Reflexionen ausbilden können. Durch den mehrschichtigen Aufbau kommt es zu einer mehrfachen Überlagerung der reflektierten und durchgelassenen Wellenanteile an den einzelnen Grenzflächen zwischen den Schichten (Rückwandmaterial-Sensorfolie, Sensorfolie-Vergußmaterial, Vergußmaterial-Meßmedium). Sind die Vergußschichten des Senders und des Empfängers gleich dick, so sind auch die Laufzeiten der Reflexionen gleich lang, es ergibt sich eine unerwünschte konstruktive Überlagerung. Zur Darstellung beider Echos wurden zwei unterschiedlich dicke Passivierungsschichten gefertigt (Bild 12).

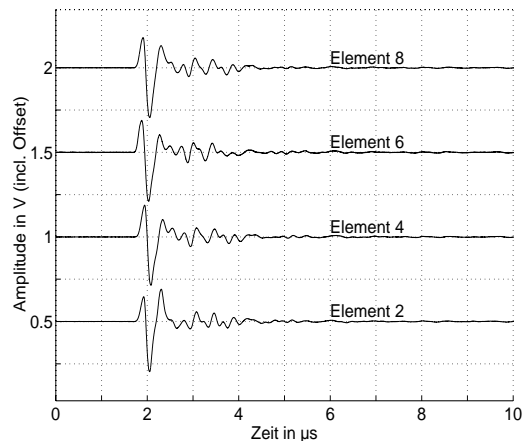


Bild 11 Uniformität der Einzelemente

Anhand der Impulsantwort der Wandler (Bild 10) wurde die ermittelte Mittenfrequenz zur Simulation der Richtcharakteristik benutzt. Der Öffnungswinkel der Hauptschallkeule wird entsprechend Abschnitt 3 dabei im wesentlichen von 2 Faktoren beeinflusst, von den Abmessungen der Einzelemente und von der Schallwellenlänge. Die nach diesem Prinzip gefertigten Zeilen

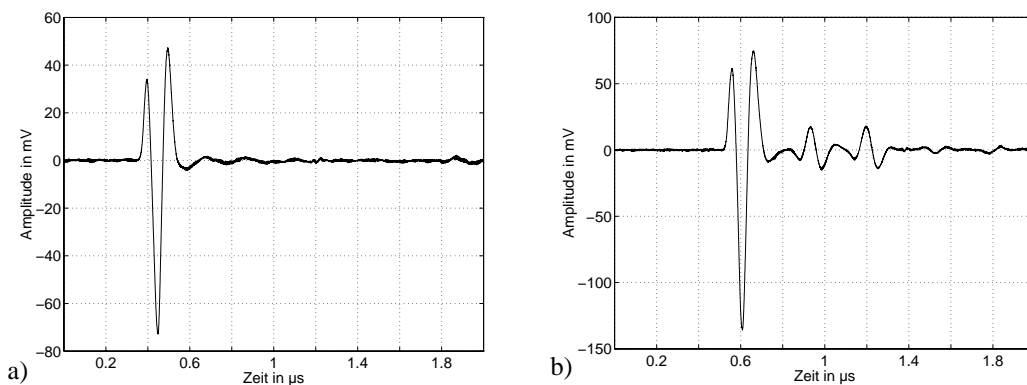


Bild 12 Betrieb zweier Wandler a) ohne Passivierung b) mit Passivierung unterschiedlicher Dicke

weisen eine Mittenfrequenz nach Bild 10 von ca. 8 MHz auf, die unter anderem von der Dicke der verwendeten Schutzschicht beeinflusst wird. Auf die Richtcharakteristik hat die Vergußschicht einen geringen Einfluß. Experimentell ergeben sich stets kleinere Öffnungswinkel als simuliert (Bild 13), zusätzlich nimmt mit größerem Öffnungswinkel die Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Winkel zu. Der größte gemessene Öffnungswinkel für bisher realisierte Wandlerstrukturen beträgt 35° für ein $200 \mu\text{m}$ -Element. Das vorgestellte Prinzip der steuerbaren gerichteten Schallabstrahlung wurde mit Hilfe von zylindrisch gewölbten Luftwandlerzeilen nachgewiesen [4]. Durch die vergleichsweise niedrigen Mittenfrequenzen dieser Wandler zwischen 150 und 300 kHz läßt sich der erforderliche Öffnungswinkel für die Richtcharakteristik für geometrische Abmessungen des Einzelements im mm-Bereich problemlos

erreichen [4]. Der Aufbau und die geschwenkte Schallkeule für eine Luftwandlerzeile sind in Bild 14 dargestellt.

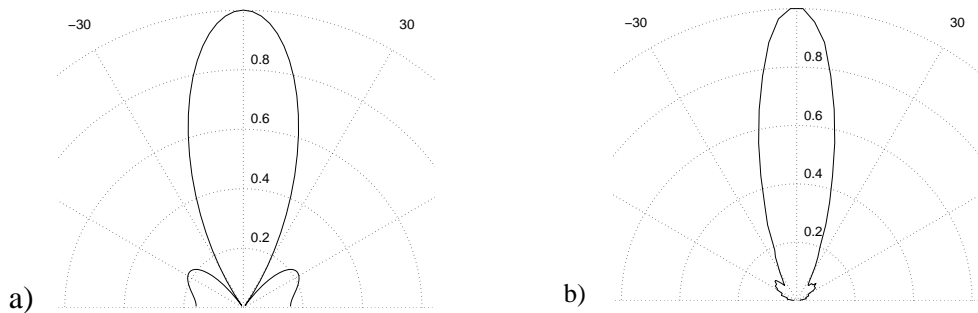


Bild 13 Richtcharakteristik a) simuliert und b) gemessen für ein 300µm-Element

Die vorliegenden experimentellen Ergebnisse zeigen, daß Probleme der Anwendung der vorgestellten PVDF-Wandlerzeile für Flüssigkeiten aus der hohen Mittenfrequenz resultieren. Aufgrund des Schaltungsaufwandes für die Ansteuerung einer großen Anzahl von Einzelelementen ist nur die Impulsansteuerung zu empfehlen. Deshalb führt nur eine Verringerung der Elementbreiten zu der gewünschten Vergrößerung des Öffnungswinkels.

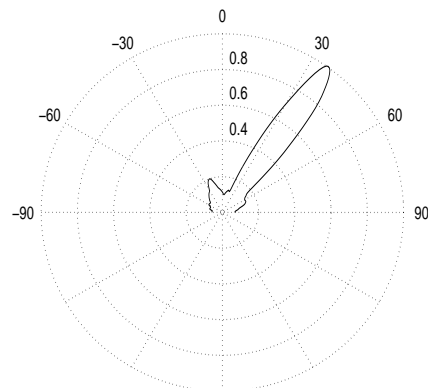


Bild 14 Aufbau und geschwenkte Schallkeule für zylindrisch gewölbte Luftwandler

6 Literatur

- [1] Fiedler, O., *Eingriffsfreie Durchflußmessung* msr, Berlin 34 (1991) 5, S. 194
- [2] Reichardt, W., *Grundlagen der technischen Akustik* Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1968
- [3] Manthey, W.; Kroemer, N., *Luftultraschall-Arrays für Anwendungen im Nahdistanzbereich* ITG-Fachbericht 126 - Sensoren, Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 1994
- [4] Kroemer, N., *Untersuchungen an Luftultraschallwandlern mit gewölbter piezoelektrischer Polymerfolie* Dissertation TU Chemnitz, Fachbereich Elektrotechnik 1990