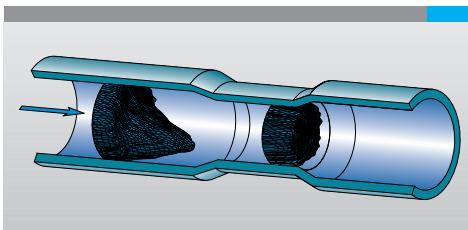


Grundlagen der Ultraschall- Durchfluss- messung für den industriellen Einsatz

Dipl.-Ing. Friedrich Hofmann

KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG
Duisburg, 2000



Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Zusammenfassung	3
2 Akustische Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen	4
3 Ultraschall-Dopplerdurchflussmesser	5
Das Prinzip:	5
Vorteile der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung:	6
Nachteile und Grenzen der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung:	6
Einsatzgebiete der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung	6
4 Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeit-Differenzverfahren, Messprinzip:	7
Im Prinzip ganz einfach:	7
Messprinzip:	7
5 Bauformen von Ultraschall-Durchflussmessern nach dem Laufzeit-Differenz-Verfahren.	11
Aufschnall-(Clamp On)-Durchflussmesser:	11
In-Line-Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeit-Differenzverfahren für Flüssigkeiten	13
In-Line-Ultraschall-Durchflussmesser für Gase nach dem Laufzeit-Differenzverfahren	17
6 Einschweiß-Messköpfe	20
7 Ultraschall-Volumenzähler ALTOSONIC V für den eichpflichtigen Verkehr:	21
Aufgabenstellung:	21
5 Messpfade bei ALTOSONIC V:	22
Zulassungen, Prüfungen	24
Einsatz des eichfähigen Ultraschall-Volumenzählers in einer Multiproduct-Pipeline	24
8 Praxisbewährung der Ultraschall-Durchfluss-Messtechnik	25
9 Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeitdifferenz-Verfahren, Einsatzgrenzen heute:	28
10 Abbildungsverzeichnis	29

Zusammenfassung

Ultraschall-Durchflussmesser werden seit mehr als 20 Jahren in der industriellen Volumendurchflussmessung für Flüssigkeiten, Gase und neuerdings auch Dampf eingesetzt. Prinzipiell werden zwei Verfahren unterschieden:

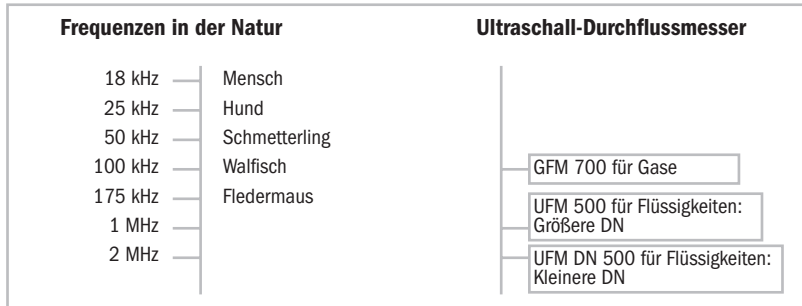


Abb. 1:
Schallfrequenzen in der Natur und in der Ultraschall-Durchflussmessung

Das Dopplerverfahren.

Dieses Verfahren benötigt Reflektoren im Medium. In den 70-er Jahren hat es aufgrund von Fehlfunktionen, Fehlapplikation und daraus resultierender Unsicherheit den Ruf der gesamten Ultraschall-Durchflussmessung geschädigt. Es wird heute nur noch in wenigen speziellen Anwendungen eingesetzt.

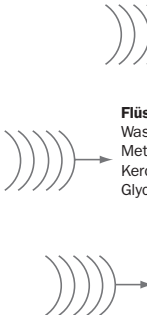
Das Laufzeit-Differenzverfahren.

Dieses Verfahren hat sich über mehr als 20 Jahre im industriellen Einsatz bewährt. Es ist genau und zuverlässig. Dieses Verfahren bietet neben der Messung des Volumendurchflusses die Möglichkeit, aus der parallel mitgemessenen Schallgeschwindigkeit Aussagen über die Art des Messstoffes abzuleiten.

Ultraschall-Durchflussmessung nach dem Laufzeit-Differenzverfahren ist heute eines der universellsten Durchfluss-Messverfahren. Dieses Verfahren wird eingesetzt für die Messung kryogener Gase bei -200°C , heißen Flüssigkeiten, Gasen und Dampf bis über 500°C , bei Drücken bis zu 1500 bar und im eichpflichtigen Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser. Spezielle Ausführungen haben die Zulassung zum eichpflichtigen Verkehr für die Gas-mengen-Zählung (vom Haushalts- bis zum Großzähler), als Volumenmessteile für die Messung thermischer Energie und sogar für Flüssigkeiten außer Wasser mit Genauigkeitsanforderungen unterhalb 0,2 % vom Messwert erhalten. Es gibt außerdem spezielle Ausführungen als Volumenmessteile von Haushaltswärmezählern oder als Haushaltsgaszähler. Diese werden hier nicht behandelt.

Akustische Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen

Ultraschall ist Schall mit Frequenzen, die oberhalb des vom Menschen hörbaren Frequenzbereiches (typ 18 kHz) liegen (s. Abb. 1) zeigt in der Natur und bei der Ultraschall-Durchflussmessung auftretende Schallfrequenzen. Die Schallwellen breiten sich mit der Schallgeschwindigkeit c aus (s. Abb. 2) zeigt Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Materialien.



Gase		
Luft	330 m/s	
Chlor	210 m/s	
Methan	430 m/s	
Wasserstoff	1280 m/s	

Flüssigkeiten		
Wasser	1480 m/s	
Methanol	1100 m/s	
Kerosin	1320 m/s	
Glycerin	1900 m/s	

Feststoffe		
Stahl	5900 m/s	3200 m/s
Glas	5600 m/s	3200 m/s
Beryllium	12900 m/s	8900 m/s

Abb. 2:
Schallgeschwindigkeit c
in verschiedenen
Medien (unter Normal-
bedingungen)

Damit die Schallwellen möglichst ungedämpft übertragen werden, arbeiten

- Ultraschall-Durchflussmesser für Flüssigkeiten mit Schallfrequenzen in der Größenordnung „Megahertz“,
- Ultraschall-Durchflussmesser für Gase mit Schallfrequenzen in der Größenordnung „100 Kilohertz“.

Ultraschall-Dopplerdurchflussmesser

Das Prinzip:

Doppler-Durchflussmesser arbeiten ähnlich wie die Radar-Geschwindigkeitsmessung im Straßenverkehr.

Ein Sende-Element schickt Ultraschallwellen mit Frequenz f_1 (ca. 1–5 MHz) unter einem Winkel α in das strömende Medium. Diese Ultraschallwelle trifft auf Partikel, die sich mit der Geschwindigkeit v_p durch das Schallfeld bewegen. Die Wellenlänge der ausgestrahlten Welle mit Frequenz f_1 beträgt:

$$\lambda_1 = c / f_1$$

Das Partikel, das sich vom Sende-Element wegbewegt, sieht aufgrund seiner Bewegungsgeschwindigkeit v_p die Wellenlänge:

$$\lambda_p = (c - v_p \cdot \cos \alpha) / f_1$$

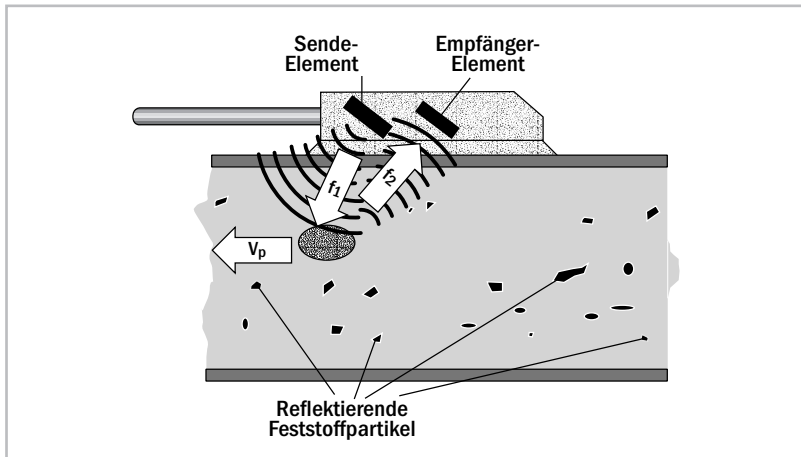


Abb. 3:
Prinzip des Doppler-Durchflussmessers

Der Empfänger sieht nun die zurückgestrahlte Frequenz wieder verschoben, weil sich das abstrahlende (reflektierende) Partikel weiter von ihm weg bewegt und sich damit die Wellenlänge ändert zu:

$$\lambda_2 = (c - 2 \cdot v_p \cdot \cos \alpha) / f_1$$

Damit wird:

$$f_2 = \frac{f_1 \cdot c}{c - 2 \cdot v_p \cdot \cos \alpha}$$

Für v_p « c erhält man:

$$f_2 - f_1 = \Delta f = \frac{2 \cdot v_p \cdot f_1 \cdot \cos \alpha}{c}$$

Diese Frequenzdifferenz ist also ein lineares Maß für die Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel.

Vorteile der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung

- Einfache Montage auf existente Rohrleitungen (bei Aufschnall-Versionen)
- Nicht-intrusiv, keine bewegten Teile, verschleißfrei

Nachteile und Grenzen der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung:

- Das Messverfahren benötigt kontinuierlich eine ausreichende Zahl reflektierender Partikel im Medium.
- Die Partikel müssen ausreichend groß sein, damit sie ausreichend gut reflektieren ($> \lambda/4$).
- Die Schallgeschwindigkeit des Partikelmaterials muss sich von der der Flüssigkeit stark unterscheiden.
- Die Schallgeschwindigkeit des Mediums geht direkt in das Messergebnis ein.
- Die Partikelgeschwindigkeit weicht häufig spürbar von der Geschwindigkeit der Flüssigkeit ab.
- Das Ultraschallfeld reicht meist nur in die Randströmung hinein. Deswegen ist die Anzeige stark abhängig vom Strömungsprofil.
- Die Geschwindigkeit muss viel größer sein als die kritische Geschwindigkeit, bei der Absetzen auftritt.
- Für Rückschluss auf den Durchfluss sind sehr lange ungestörte Einlaufstrecken nötig (20 D).

Einsatzgebiete der Ultraschall-Doppler-Durchflussmessung

Medizinische Anwendungen (Blutdurchflussmessung)

Die Absolutgenauigkeit spielt hier keine Rolle. Es wird nur gutes dynamisches Verhalten gefordert, das die Blut-Pulsationen in den Adern für die Diagnostik detailreich wiedergibt (ähnlich einem EKG). Der Messkopf wird ohne Eingriffe einfach und unblutig auf die Haut gesetzt (mit Koppelfett).

Messung des Durchflusses von Trüben (z. B. Eisenerz)

Dabei ist die Partikelkonzentration von Natur aus hoch. Die Schallgeschwindigkeit der Partikel weicht auch ausreichend von der des Trägermediums ab. Der Durchflussmesser wird hier oft eingesetzt, um Unterschreitung der kritischen Geschwindigkeit zu signalisieren. Die von der Konzentration abhängige Eindringtiefe des Ultraschall-Strahles und das Strömungsprofil führen auch hier zu spürbaren Messabweichungen.

Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeit-Differenzverfahren, Messprinzip:

Im Prinzip ganz einfach:

Bei schräger Überquerung eines Flusses mit der Strömung benötigt man weniger Zeit als bei Überquerung gegen die Strömung (s. Abb. 4). Je stärker die Strömung wird, um so länger braucht man gegen sie und um so schneller wird man mit ihr. Die Differenz zwischen den Fahrzeiten mit der Strömung bzw. gegen sie hängt also direkt von der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses ab.

Diesen Effekt nutzen Ultraschall-Durchflussmesser zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeit und Durchfluss. Dabei senden und empfangen elektro-akustische Wandler („Piëzos“, ähnlich piëzoelektrischen Hochtonlautsprechern und Mikrofonen) kurze Ultraschallimpulse durch das im Rohr strömende Produkt. Die Wandler sitzen in Längsrichtung versetzt an beiden Seiten des Messrohres (s. Abb.



Abb. 4:
Gegen den Strom
braucht man länger ...

Messprinzip:

Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit v

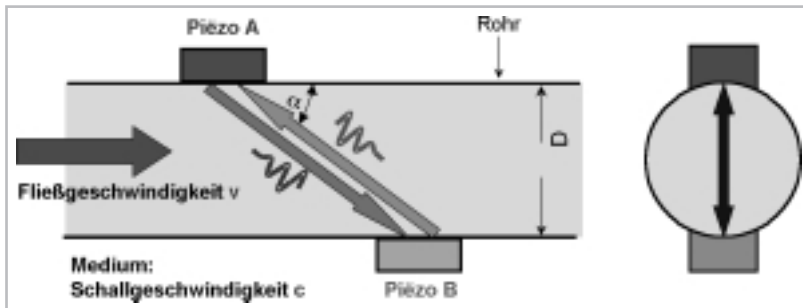


Abb. 5:
Prinzip der Ultraschall-
Durchflussmessung
nach dem Laufzeit-
Differenzverfahren

Der Puls, der mit der Strömung von Piëzo A nach B läuft, benötigt eine Laufzeit von:

$$T_{A \rightarrow B} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c + v \cdot \cos \alpha)}$$

Der Puls, der gegen die Strömung von Piëzo B nach A läuft, benötigt eine Laufzeit von:

$$T_{B \rightarrow A} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c - v \cdot \cos \alpha)}$$

Die Zeitdifferenz beider Pulse beträgt:

$$\Delta T = T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B} = v \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B} \cdot \sin(2\alpha)}{D}$$

$$v = \frac{D}{\sin(2\alpha)} \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B}}{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B}}$$

Aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit wird der Durchfluss q bestimmt.
In einer Rohrleitung mit kreisförmigem Querschnitt gilt:

$$q = v \cdot A = v \cdot \pi \cdot D^2/4$$

$$q = \frac{\pi \cdot D^3}{4 \cdot \sin(2\alpha)} \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B}}{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B}}$$

Die Laufzeitdifferenz ist also ein präzises lineares Maß für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v entlang dem Messpfad (Ultraschallstrahl). Die Laufzeitdifferenz ist sehr klein (s. Abb. 6).

Beispiele für Laufzeiten, Laufzeitdifferenzen:

Rohr lichte Weite:	100 mm	Laufzeitdifferenz ΔT :	91.29 ns
Einstrahlwinkel α :	45°	Für Auflösung 0.5%:	Zeitauflösung <500 ps nötig!
Messstoff:	Wasser	Die Laufzeitmessung von ...	
Schallgeschwindigkeit:	1480 m/s	$T_{A \rightarrow B}$	= 95.4949 μ s und
Fließgeschwindigkeit:	1 m/s	$T_{B \rightarrow A}$	= 95.5862 μ s muss sehr genau sein!
Laufzeit mit der Strömung:	95.49 μ s		
Laufzeit gegen die Strömung:	95.59 μ s		

Abb. 6:

Beispiel für Größe der Laufzeiten

Der Messumformer, der die Piezos mit Pulsen ansteuert und die empfangenen Signale auswertet, muss diese hohe Zeitauflösung gewährleisten. Dafür werden heute verschiedenen Verfahren eingesetzt, von der über Jahrzehnte bewährten Nulldurchgangsmethode über Korrelationsverfahren bis hin zu neuen komplexen DSP-Verfahren, mit denen Störsicherheit und Genauigkeit verbessert werden sollen.

Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c

Aus der Summe der Laufzeiten $T_{A \rightarrow B}$, $T_{B \rightarrow A}$ kann on-line zusätzlich die Schallgeschwindigkeit c bestimmt werden:

$$\Sigma T = T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B} = \frac{1}{c} \cdot \frac{2D}{\sin \alpha} \quad c = \frac{2 \cdot D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B}}$$

Bestimmung von Messstoff-Eigenschaften über die Schallgeschwindigkeit c

Die Schallgeschwindigkeit c ist abhängig von der Art des Produktes im Messrohr. Bei Produktwechsel in Multiprodukt-Pipelines signalisiert eine Änderung von c das Passieren der Mischphase. Mit der parallel gemessenen Strömungsgeschwindigkeit v kann vorausgerechnet werden, wann diese Mischphase im Tanklager eintreffen wird. Dadurch kann die Mischphase gezielt in separate Tanks umgeleitet werden. Die Schallgeschwindigkeit c erlaubt z.B. auch Aussagen über den Wassergehalt in einem bekannten Öl oder z.B. der Konzentration von NaOH (Natronlauge).

Einsatzgrenzen Gasanteil / Viskosität:

Bei Ultraschall-Durchflussmessern für Flüssigkeiten dürfen Gas- und Feststoffanteil im Medium bestimmte Grenzen nicht überschreiten, weil die Dämpfung (auch durch Reflexion an den Störkörpern) zu hoch wird (s. Abb. 7).

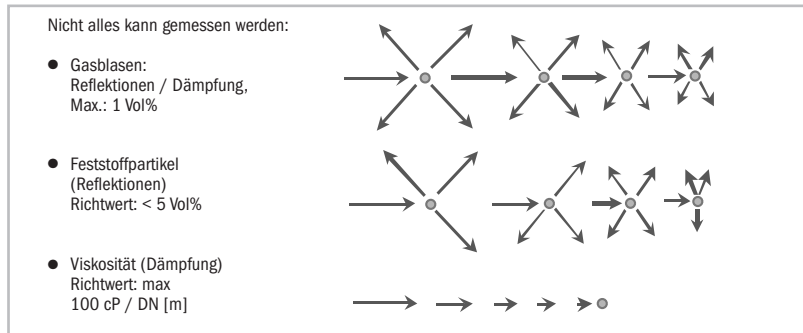


Abb. 7:
Messstoffbedingte
Einsatzgrenzen

Schallwellen sind Druckwellen, die aufgrund der Kompressibilität des Messstoffes mechanische Wellen erzeugen. Extrem hohe Viskosität dämpft diese Bewegung und damit die Ausbreitung der Schallwellen. Deswegen gibt es Grenzen für die Viskosität. In der Regel liegt diese Grenze weit über den in der Praxis auftretenden Werten, sie spielt nur in einer sehr geringen Zahl von Einzelfällen eine Rolle. Hohe Gasanteile führen zu einer erhöhten Kompressibilität des Messstoffes und zu extrem niedriger Schallgeschwindigkeit. Beide Effekte können zum Ausfall der Messung führen.

Unabhängigkeit von der Reynoldszahl (Strömungsprofil)

Abb. 8 zeigt ein laminares und ein turbulentes Strömungsprofil bei gleichem Volumendurchfluss. Petrochemische Produkte haben zum Teil sehr hohe Viskosität. Daher kann auch in großen Rohrleitungen laminarer Durchfluss auftreten. Wird dann ein Produkt mit niedriger Viskosität gefahren, kann der Durchfluss wieder turbulent sein (s. Abb. 8).

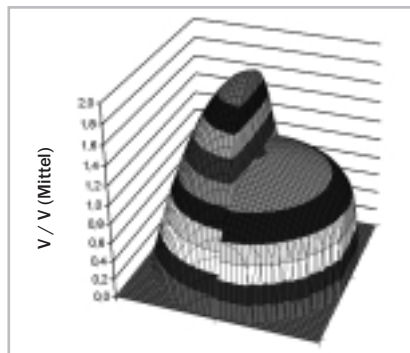


Abb. 8:
Strömungsprofile bei
gleichem Durchfluss:
Links laminar,
rechts turbulent
($Re = 100.000$)

Ein Durchflussmesser in so einer Rohrleitung soll den Volumendurchfluss richtig und unabhängig vom Strömungsprofil anzeigen.

Der Ultraschall-Durchflussmesser integriert oder mittelt die Geschwindigkeit entlang seinen Messpfaden.

Bei Messung mit nur einem Ultraschallstrahl durch die Rohrmitte mittelt er bei laminarer Strömung über die Spitze des parabolischen Strömungsprofils.

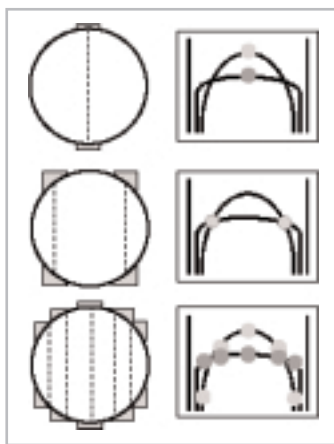
Bei turbulenter Strömung mittelt er über das viel flachere Profil. Er kommt zwangsläufig zu einem anderen Messergebnis.

Für genaue Durchflussmessung unabhängig von der Reynoldszahl gibt es Ultraschall-Durchflussmesser mit einer der Aufgabenstellung angepassten Zahl von Messkanälen.

Höhere Zahl Messpfade = höhere Messgenauigkeit bei variierender Reynoldszahl

Abb. 9 zeigt links jeweils die Lage der Messpfade, rechts einen Längsschnitt durch das Rohr mit angedeutetem laminarem und turbulentem Strömungsprofil in Rohrmitte. Die von den Messstrahlen erfassten Werte bei laminarem Durchfluss sind mit Punkten auf der jeweiligen Profil-Linie markiert.

Abb. 9:
Mittelung des
Strömungsprofils
durch mehrstrahlige
Messung



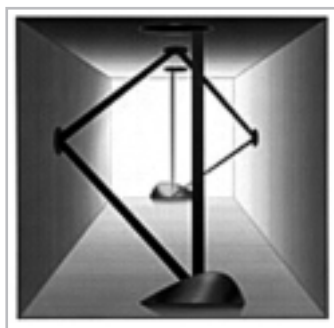
Einstrahl-Ultraschall-Durchflussmesser in Abb. 9 oben werden meist nur bei turbulentem Durchfluss eingesetzt, z.B. für Wasser. Sie zeigen eine Messabweichung von ca. 30% bei Übergang von turbulentem zu laminarem Durchfluss.

Zweistrah-Ultraschall-Durchflussmesser in Abb. 9 (Mitte) zeigen eine Messabweichung von nur noch 0,5% bei diesem Übergang „turbulent“/„laminar“. Sie werden seit mehr als 15 Jahren für Prozessmessungen eingesetzt. Sie überwachen auch amtlich geeichte Wirkdruck-Durchflussmesser, die aufgrund der Schmutzpartikel im Rohöl verschleifen und dann spürbare Messfehler aufweisen.

Der Ultraschall-Volumenzähler ALTOSONIC V mit 5 Messpfaden (unten in Abb. 9) erfasst das Strömungsprofil so fein, dass er dessen Einflüsse

auf die Messgenauigkeit vollständig kompensieren kann und auch bei Änderungen von „laminar“ nach „turbulent“ weit innerhalb seiner zulässigen Messabweichung von $\pm 0,15\%$ bleibt.

Abb. 10:
Mehrere Strahlen
durch Mehrfach-
reflektion eines
Strahls



Es gibt heute Ausführungen von Ultraschall-Durchflussmessern, bei denen der Messstrahl mehrfach an der Wand des Messrohres reflektiert wird, um den Strömungsprofil-Einfluss zu reduzieren (Abb. 10). Dieses Verfahren hat auf der einen Seite Vorteile:

- Der Messstrahl wird verlängert gegenüber Verfahren mit direkter Durchschallung (Abb. 9),
- Damit wird vor allem bei kleinen Nennweiten keine so hohe Zeitauflösung der Signalverarbeitung nötig.
- Die Strahlen schneiden das Strömungsprofil

mehrfach, damit erscheint die versprochene Unabhängigkeit von der Reynoldszahl möglich.

Diese Konstruktion birgt aber auch Risiken:

- Bei verschmutzten Rohrwänden wird der Messstrahl aber bei jeder Reflektion weiter aufgefächert, so dass eventuell bei stärkeren Ablagerungen an den Rohrwänden auf der Empfängerseite kein ausreichend starker Ultraschall-Impuls mehr ankommt.
- Dazu kann die viereckige Rohrform zu verstärkten Ablagerungen in den Ecken führen. Vermutlich führen die dadurch verursachten Querschnittsänderungen zu Messabweichungen.

Bauformen von Ultraschall-Durchflussmessern nach dem Laufzeit-Differenz-Verfahren.

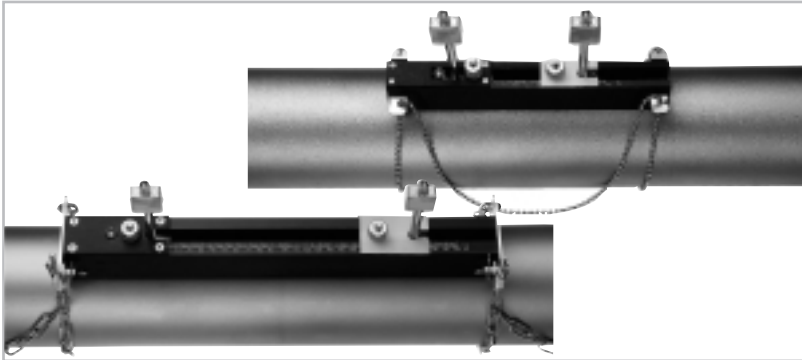


Abb. 11:
Aufschnall-Schienen
eines Clamp-On-
Ultraschall-
Durchflussmessers
(KROHNE UFM 610 P)

Aufschnall-(Clamp On)-Durchflussmesser:

Für Flüssigkeits-Durchflussmessungen an Rohrleitungen DN 15 bis 5000, bei denen

- gelegentlich der Durchfluss, z.B. die Förderleistung von Pumpen, kontrolliert werden soll,
- oder bei denen ein Eingriff in eine existente Rohrleitung für Installation eines Durchflussmessers nicht möglich ist,

gibt es Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmesser zum Aufschnallen auf die Rohrleitung.

Bei diesen Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmessern werden wieder zwei Varianten unterschieden:

- portable Geräte für Kontroll-Messungen (s. Abb. 12)
- fest installierte Betriebsmessgeräte

Abb. 11 zeigt die Schienen mit den Sensoren, die mit Spannbändern, Ketten oder ähnlichem auf eine glatte Stelle der Rohrleitung montiert werden. Zur akustischen Ankopplung muss zwischen den Sensor-Kontaktflächen und der Rohraußenwand ein Koppelfett aufgetragen werden.



Abb. 12:
Akku-Messumformer
eines Clamp-On-
Ultraschall-
Durchflussmessers
(KROHNE)

Bei der Auswahl des Montage-Ortes ist zu beachten:

- Gerade Einlaufstrecke $> 10 D$ (Details siehe Herstellerangaben)
- Reynoldszahl > 10.000

Parameter wie

- Art des Messtoffes (bzw. seine Schallgeschwindigkeit),
- Stärke und Material der Rohrwand und
- Durchmesser der Rohrleitung beeinflussen den Einstrahlwinkel (s. Abb. 13), die Schallweglänge, und damit die Laufzeiten sowie die notwendige Sensordistanz.

Daher fragt der Messumformer (s. Abb. 12) diese Parameter im Dialog ab, errechnet den Sensorabstand, auf den die beiden Messköpfe eingestellt werden müssen und bezieht diese Daten in die Durchflussberechnung ein. Die Messstellendaten können gespeichert werden, so dass man sie bei späteren Messungen nicht neu eingeben muss. Der portable Messumformer besitzt einen internen Datenlogger, mit dem der Durchfluss aufgezeichnet werden kann. Über eine Schnittstelle können diese Daten dann später auf einen PC übertragen werden.

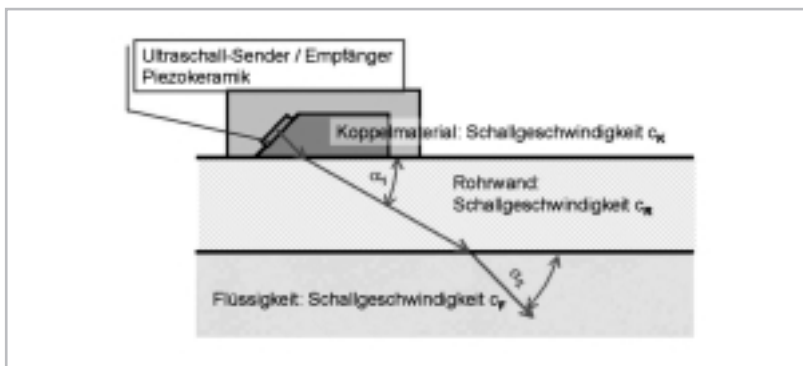


Abb. 13:

Schall-Einkopplung bei
Clamp-On-Ultraschall-
Durchflussmessern

Je nach Anwendungsfall liegt die erreichbare Messgenauigkeit bei 2...5% vom Messwert, bei kleinen DN und höheren Viskositäten kann die Messabweichung auch größer werden. Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmesser können auf nahezu allen Rohrleitungsmaterialien (außer bei Rohren mit eingezogenen losen Auskleidungen) eingesetzt werden. Zulässige Medientemperaturen liegen je nach Hersteller bei $-40 \dots +300^\circ\text{C}$.

In-Line-Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeit-Differenzverfahren für Flüssigkeiten

Für kontinuierliche Prozessmessungen, die hohe Genauigkeit, vollständige Wartungsfreiheit und weitestgehende Unabhängigkeit von Reynoldszahl und anderen Prozessbedingungen bieten sollen, werden Messgeräte fest in die Rohrleitung (in line) installiert.



Abb. 14:
Zweistrahl-Ultraschall-
Durchflussmesser
ALTOSONIC UFM 500 K,
DN 600, PN 10,
Kompaktversion
mit integriertem
Messumformer

Flansch- und Einschweißversionen

Diese Geräte gibt es mit Flanschanschlüssen oder auch als Rohrstücke zum Einschweißen in die Rohrleitung (s. Abb. 14). Solche Flansch-Ausführungen mit zwei Messpfaden werden z.B. für die Volumendurchflussmessung von Trink- oder Fernwärmewasser bis hin zu Rohöl eingesetzt.

Zwei Messpfade sind heute Standard:

Abb. 15 zeigt die Lage der zwei parallelen Messpfade im Messrohr. Die Anordnung dieser Pfade in einer bestimmten Distanz zur Rohrmitte sichert praktisch vollständige Unabhängigkeit von der Reynoldszahl, also gleiche Messgenauigkeit bei laminarem und turbulentem

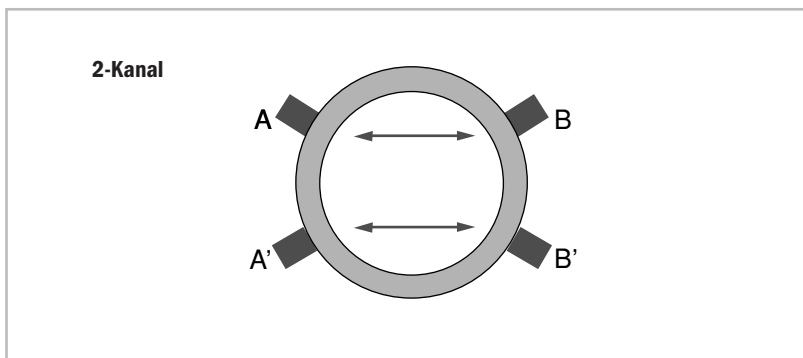


Abb. 15:
Lage der Messpfade
beim Zweistrahl-
Ultraschall-
Durchflussmesser

Strömungsprofil. Außerdem wird der Einfluss unsymmetrisch verzerrter Strömungsprofile auf die Messgenauigkeit durch zwei Messpfade erheblich reduziert.

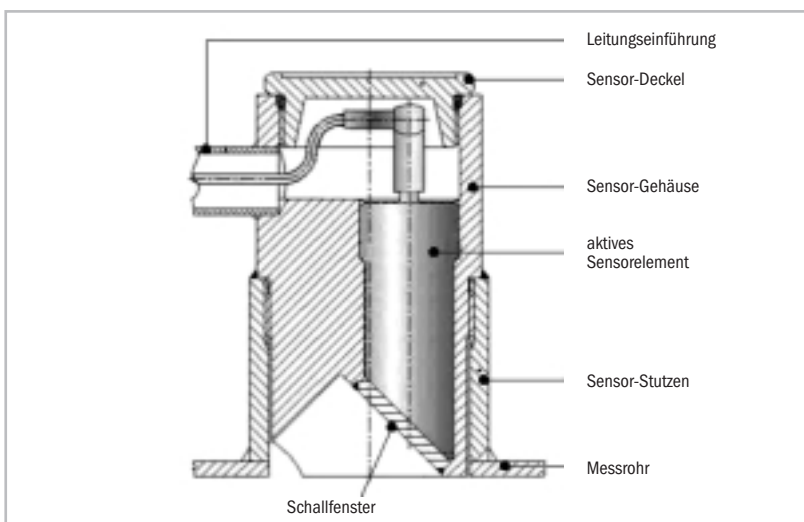
Unter Betriebsbedingungen austauschbare Sensoren

Die aktiven Sensorelemente sind durch die Konstruktion des zum Messrohr hin vollständig verschweißten Sensorgehäuses und des ebenfalls fest eingeschweißten Schallfensters auch unter Betriebsbedingungen austauschbar (Abb. 16).

Großer Nennweiten- und Durchflussbereich

Diese Geräte gibt es von DN 25 bis DN 3000. Sie können also für genaue Durchflussmessungen im Bereich von ca. 1 m³/h bis weit über 100.000 m³/h eingesetzt werden.

Abb. 16:
Das aktive Sensorelement ist unter Betriebsbedingungen austauschbar



Die Nennweiten-Obergrenze „3000 mm“ wird nur durch die Kalibriermöglichkeiten gesetzt. Es sind auch weit größere Ausführungen möglich. So große Geräte können dann aber nicht mehr nass kalibriert werden. Die Kalibrierdaten müssen dann rechnerisch aus Vermessung der Sensorabstände und Innendurchmesser des Rohres ermittelt werden. Damit lassen sich Messabweichungen von ca. 2% vom Messwert erreichen.

Genaue Messung über weite Spannen

Ultraschall-Durchflussmesser in dieser Bauform, die mit Wasser auf genauen Prüfständen kalibriert werden, bieten heute für Prozessanwendungen ausreichend hohe Genauigkeit und vor allen Dingen eine weite Messspanne (s. Abb. 17)

Sie ersetzen damit immer mehr Verdrängerzähler und Wirkdruck-Durchflussmesser, die weit kleinere Messspannen, geringere Langzeitstabilität und Lebensdauer durch mechanischen Verschleiß zeigen.

„Normale“ Ausführungen dieser In-Line-Durchflussmesser lassen je nach Hersteller und Bauform Medientemperaturen bis zu 150°C oder 200°C zu.

Gerade in der Petrochemie gibt es viele Rohrleitungen mit Medientemperaturen bis über 500°C oder auch Drücken bis 1500 bar, bei denen der Durchfluss gemessen werden soll. Dafür wurden spezielle Ausführungen entwickelt.

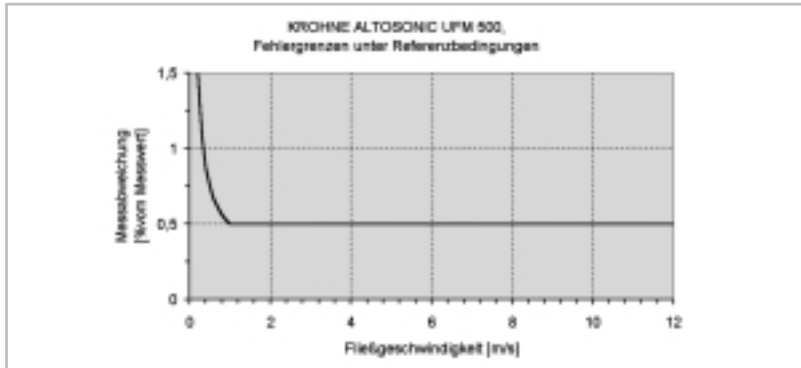


Abb. 17:
Fehlergrenzen eines
Zweistrahl-Ultraschall-
Durchflussmessers für
Flüssigkeiten

Ultraschall-Laufzeitdifferenz-Durchflussmesser:

Temperaturen bis 500°C, Drücke bis 1500 bar:

Diese Ausführungen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie oben beschrieben. Um die Piëzo-Sensoren vor diesen hohen Temperaturen zu schützen und die Begrenzung der Druckbelastbarkeit durch das normalerweise nur wenige Millimeter dicke Schallfenster am Sensor (s. Abb. 16) zu umgehen, werden diese Sensoren weit nach außen an das Ende eines Koppelstabes verlegt (Abb. 18).

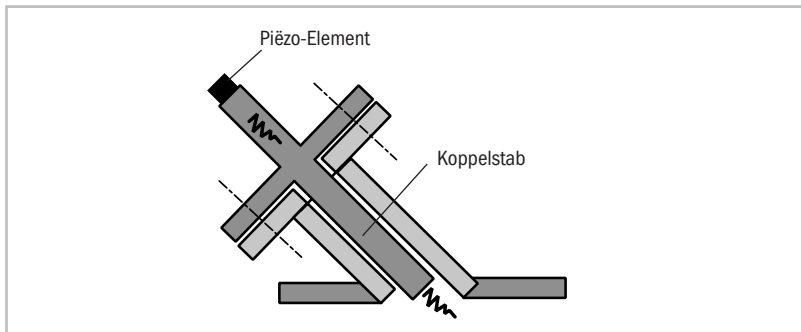


Abb. 18:
Prinzipskizze eines
Ultraschall-
Hochtemperatur-/
Hochdruck-Sensors

Die Schallwellen werden über diesen Koppelstab in das Medium eingekoppelt. Die Piëzo-Sensoren sitzen damit weit vom heißen Messrohr entfernt. Die Auslegung der Montage-Flansche dieses Koppelstabes und des Rohres kann für Druck bis 1500 bar damit normgerecht erfolgen. Überhitzung des Piëzo-Elementes wird sicher vermieden.

Die Konstruktion dieser Koppelstäbe ist je nach Hersteller unterschiedlich. Es gibt Massiv-Stäbe, die durch spezielle Formgebung der Außenkontur die Ultraschallwellen im Stab bündeln und seitliche Abstrahlung verhindern. Andere Konstruktionen verwenden in den Koppelstab eingebrachte Bündel von dünnen Metallstäben, die den gleichen Effekt erzielen sollen.

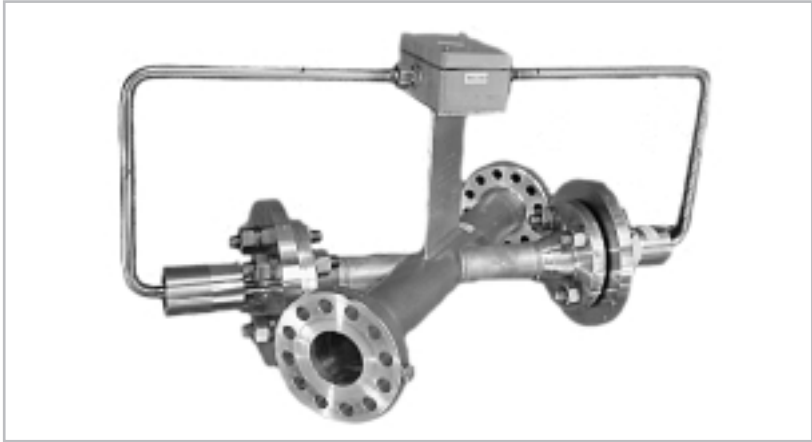


Abb. 19:
Hochtemperatur-
Version mit Heizmantel
für Flüssig- oder
Dampf-Begleitheizung

Die zusätzlichen Laufzeiten der Ultraschall-Impulse beim Durchgang durch den Koppelstab werden vom Messumformer bei der Bestimmung der Zeiten $T_{A \rightarrow B}$ und $T_{B \rightarrow A}$ automatisch berücksichtigt.

Für Medien, die bei niedriger Wandtemperatur stocken oder auskristallisieren, gibt es diese Durchflussmesser auch mit Heizmantel (Abb.19).

In-Line-Ultraschall-Durchflussmesser für Gase nach dem Laufzeit-Differenzverfahren

Das gleiche Prinzip wie bei Flüssigkeiten:

Das Prinzip der Laufzeitdifferenzmessung für Gase ist identisch mit dem für Flüssigkeiten. Lediglich die Schallfrequenz ist niedriger (typ. 100 kHz).

Zwei Messpfade sind heute Standard:

Die bessere Unterdrückung des Einflusses der Reynoldszahl und asymmetrisch verzerrter Strömungsprofile auf die Messgenauigkeit haben hier die früher oft eingesetzte Einstrahl-Bauform fast vollständig vom Markt verdrängt.

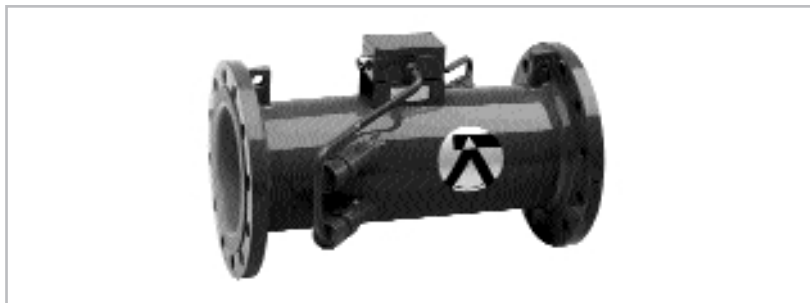


Abb. 20:
Zweistrahle-Ultraschall-
Durchflussmesser für
Gase



Abb. 21:
Messumformer für
Ultraschall-Gasdurch-
flussmesser

Genaue Messung über weite Spannen:

Wirkdruck-Durchflussmessungen haben eine nutzbare Messspanne von ca. 1:3. Der Ultraschall-Durchflussmesser für Gase bietet unabhängig von Dichte und Viskosität eine Messspanne von ca. 1:10. Die Messstabilität wird nicht beeinflusst durch Partikel im Gas, Vibrationen, Druck- oder Durchfluss-Schläge.

Anzeige des Durchflusses in Betriebs-Einheiten.

Die Anzeige und Ausgänge von Ultraschall-Durchflussmessern für Gase erfolgt in Betriebs-Einheiten (also entsprechend Druck und Temperatur an der Messstelle). Für Durchfluss-anzeige und Mengenzählung „unter Normalbedingungen“ muss ein Mengenumwerter eingesetzt werden.

Warum Ultraschall-Durchflussmesser für Prozessgase?

Berührungslose Durchflussmessung und Mengenzählung

Ausser der Rohrwand und den Schallfenstern stehen keine Teile mit dem strömenden Gas in Kontakt. Die Messung erfolgt ohne mechanisch bewegte Teile und ohne zusätzlichen Druckverlust aller Gase für die Nennweiten DN 50-600 Durchflussmessung in beiden Richtungen ist möglich.

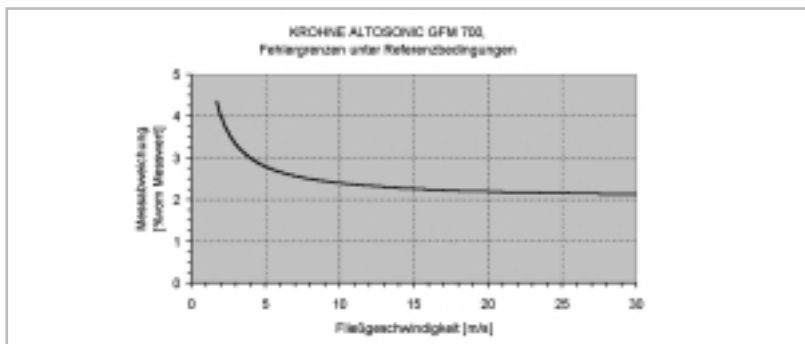


Abb. 22:

Zweistrahul-Ultraschall-
Durchflussmesser,
Messabweichungen

Breites Anwendungsspektrum

Einige Beispiele aus der großen Palette der Messstoffe und Aufgabenstellungen, für die Ultraschall-Durchflussmesser bisher erfolgreich eingesetzt wurden.

- Messstoffe:
Erdgas, Luft, Methan, Stickstoff ...
- Optimierung der Verbrennung von Restgasen in Raffinerien: Durchflussmessung über die Laufzeitdifferenz, parallel dazu Bestimmung des Molekulargewichtes von Gasen aus der gemessenen Schallgeschwindigkeit und anderen Messgrößen.

Randbedingungen für den Einsatz von Ultraschall-Durchflussmessern für Gas:

Vakuum überträgt keinen Schall. Die Schallübertragung zwischen den Sensoren setzt also eine Mindest-Dichte des Gases voraus. Deswegen sollte im Vorfeld geklärt werden, mit welchen Gasen bei welchem Mindestdruck und welcher Temperatur der Ultraschall-Durchflussmesser eingesetzt werden soll.

Einbauten in die Rohrleitung, z.B. die Kanten von Klappen, wirken wie die Lippen von Orgelpfeifen oder Zungen einer Mundharmonika und können hohe Schallpegel bis weit über den Frequenzbereich von 100 kHz hinaus erzeugen. Deswegen muss vor allem stromaufwärts für eine ungestörte gerade Einlaufstrecke ohne Einbauten gesorgt werden, an denen die Gasströmung abreißen kann.

Ultraschall-Gasdurchflussmesser sind unempfindlich gegen

- Druck- und Durchfluss-Schläge
- Vibrationen
- Schmutzpartikel im Gasstrom

Das erlaubt auch den Einsatz in solchen Fällen, wo konventionelle Methoden der Gasmengenmessung, z.B. Wirkdruckverfahren oder mechanische Zähler wie Turbinen aufgrund der Prozessbedingungen versagen müssen.

Ultraschall-Gasdurchflussmesser für den eichpflichtigen Verkehr

Hierfür sind Ultraschall-Gasgroßzähler mit Nennweiten bis ca. 600 mm, bis zu 6 Messpfaden und Messabweichungen von ca. 0,3% auf dem Markt.

Hochtemperatur-Ausführungen:

„Normale“ Ausführungen dieser Ultraschall-Gasdurchflussmesser erlauben je nach Hersteller und Bauform Medientemperaturen bis zu 140°C.

In der Petrochemie und in der Energieversorgung gibt es viele Rohrleitungen mit Medientemperaturen bis über 500°C oder auch Drücken bis 1500 bar, bei denen der Durchfluss gemessen werden soll. Spezielle Ausführungen der Ultraschall-Gasdurchflussmesser können auch bis Medientemperaturen von 500°C, z.B. bei überhitztem Dampf eingesetzt werden. Diese Ausführungen sind vom Prinzip und Aussehen her ähnlich zu denen für Flüssigkeiten (Abb. 18, Abb. 19)

Einschweiß-Messköpfe

Vor allem bei großen Rohrleitungen und nicht-kreisförmigen Kanälen ist es wirtschaftlich nicht sinnvoll, komplette In-Line-Durchflussmesser einzusetzen. Dafür gibt es Ultraschall-Durchflusssensoren als Einschweiß-Köpfe.



Abb. 23:
Einschweiß-Sensoren
für metallische
Rohrleitungen

Sensoren zur Messung des Durchflusses in metallischen Rohrleitungen (Abb. 23) werden von außen in entsprechende Bohrungen der Rohrleitung geschweißt. Die Lage der Bohrungen wird vom Lieferanten der Ultraschall-Messköpfe berechnet. Die Ausrichtung dieser Köpfe erfolgt bei Rohr-Nennweiten bis 1000 mm „akustisch“, bei größeren Rohren mit einem Laser-Ausrichtsatz.



Abb. 24:
Ultraschall-Durchfluss-
Sensor FS 800C zum
Einbau in Kanäle

Ultraschall-Durchflussmesser, die mit diesen Einschweiß-Köpfen aufgebaut werden, bieten prinzipiell die gleichen Vorteile wie klassische In-Line-Ultraschall-Durchflussmesser, also:

- Freier Durchgang, kein Druckverlust
- Keine mechanisch bewegten Teile, keine Einbauten ins Rohr, daher hohe Zuverlässigkeit
- Austauschbarkeit der aktiven Sensorelemente unter Betriebsbedingungen

Nachteilig gegenüber komplett kalibrierten In-Line-Durchflussmessern

(„Messrohren“) ist die fehlende Kalibrierung, so dass die Kalibrierfaktoren aus Rohrleitungs-Abmessungen errechnet werden müssen. Das ist der wesentlichste Grund dafür, dass die Fehlergrenze mit ca. 3% vom Messwert angegeben wird.

Sensoren, die fest an die Innen- oder Außenwand eines Kanales oder Gerinnes geschraubt werden können, zeigt Abb. 24. Sie können bis zu Kanalbreiten von 8 m eingesetzt werden. Ein Kugelgelenk erleichtert einfache, präzise Ausrichtung, die bei so großen Strecken auch optisch durchgeführt wird.

Ultraschall-Volumenzähler ALTOSONIC V für den eichpflichtigen Verkehr:

Aufgabenstellung:

Für die Zählung und Verrechnung von Flüssigkeitsvolumen im eichpflichtigen Verkehr, z.B. bei Entladung von Tankschiffen, Lieferung chemischer und perochemischer Produkte über Pipelines wurden bisher im wesentlichen mechanische Verdrängerzähler, Turbinen oder über Differenzdruck wirkende Volumenzähler eingesetzt.



Abb. 25:
Sensor des
eichfähigen Volumen-
zählers ALTOSONIC V
mit 5 Messpfaden

Diese sind in gewissem Umfang viskositätsabhängig, bei Produktwechseln muss neu kalibriert werden. Außerdem unterliegen sie mechanischem Verschleiß und müssen von Zeit zu Zeit ausgewechselt werden. Ihre Baugröße ist begrenzt. Verschmutzung der Messstoffe macht den Einbau von wartungsintensiven Filtern in die Rohrleitung nötig. Eichfähige Coriolis-Massedurchflussmesser sind auf DN 200 limitiert.

Die Baugrößen-Begrenzung dieser klassischen Messverfahren macht zudem Aufteilung großer Pipelines auf mehrere parallele Messstrecken mit Installation ebenso vieler Volumenzähler nötig.

Ziel war es hier, einen Ultraschall-Volumenzähler zu entwickeln, der bis DN 1000 für Durchflüsse bis weit über 10.000 m³/h eingesetzt werden kann und der die hohen Genauigkeitsanforderungen im eichpflichtigen Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser unabhängig von der Viskosität des Messstoffes erfüllt.

5 Messpfade bei ALTOSONIC V:

Fünf parallele Ultraschallstrahlen messen unabhängig voneinander die Strömungsgeschwindigkeiten in fünf Ebenen des Messrohres. Daraus rekonstruiert ein nachgeschalteter Rechner das Strömungsprofil. Spezielle Algorithmen korrigieren den Einfluss des Profils so, dass die Genauigkeit der Volumenzählung in den durch die OIML R 117 und nationale Vorschriften gesteckten engen Grenzen von 0,15% – 0,2% bleibt.

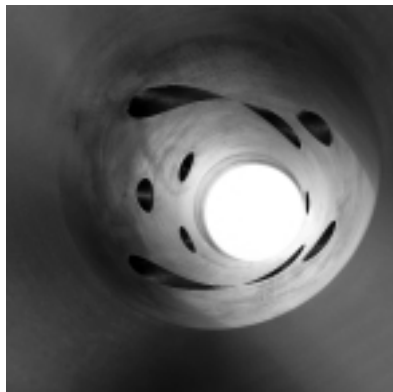


Abb. 26:
Messrohr des
5-Kanal-Ultraschall-
Volumenzählers
ALTOSONIC V:
Freier Querschnitt!

Der Messwertaufnehmer des Volumendurchflusszählers ALTOSONIC V (Abb.25) kann einfach wie ein normales Rohrstück in die Rohrleitung eingebaut werden. Der offene Querschnitt (s. Abb. 26) lässt Schmutzpartikel glatt passieren. Deswegen sind keine Filter vor dem Volumenzähler nötig.

Verschleißfrei und viskositätsunabhängig

Diese Volumenzähler arbeiten verschleißfrei und zuverlässig ohne mechanisch bewegte oder in die Strömung ragende Teile.

Anders als bei konventionellen Volumenzählern bleibt die Messgenauigkeit dieser Ultraschall-Volumenzähler über einen Viskositätsbereich von 0,1 cSt bis 150 cSt voll erhalten. Das ist ideal für Einsatz in Multiprodukt-Pipelines, durch die nacheinander unterschiedliche Produkte transportiert werden.

Die bei konventionellen Volumenzählern nötigen Umkalibrierungen für Produkte mit einer Viskosität, die von der bei der Originalkalibrierung abweicht, sind bei diesem Ultraschall-Volumenzähler nicht mehr nötig.

Ermittelt auch die Viskosität:

Aus dem gemessenen Strömungsprofil wird über die Reynoldszahl grob die Viskosität des Produktes in der Leitung ermittelt. Diese Messgröße kann ebenso wie die on-line gemessene vom Produkt abhängige Schallgeschwindigkeit zur Bestimmung des Produktes und des Durchganges von Mischphasen bei Produktwechseln verwendet werden.

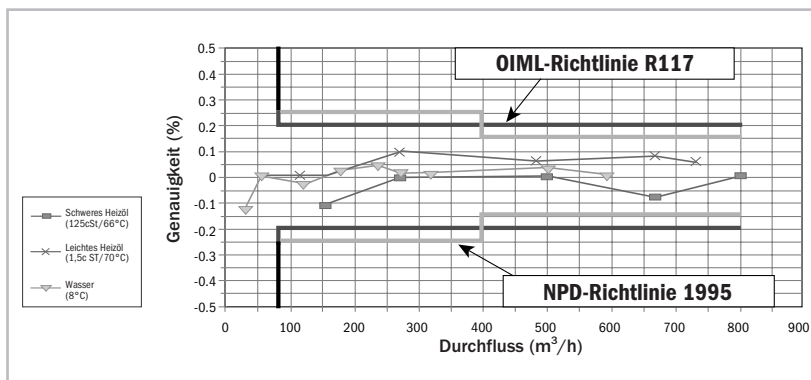


Abb. 27:
Ultraschall-
Volumenzählers
ALTOSONIC V:
Messabweichungen
< 0,2% vom Messwert,
viskositätsunabhängig!

Massedurchflussmessung / Massezählung und weitere Feinheiten:

Bei Anschluss eines externen Dichtemessers kann der Massedurchfluss gemessen werden. Mit Temperatur- und Druckmessung können Einflüsse von Kompressibilität und Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten nach der API/ASTM-Formel korrigiert werden.

Redundanz: Zuverlässig auch nach Ausfall eines Messkanales

Bei Ausfall eines Sensors (Messpfades) löst der Messumformer Alarm aus. Die Messung bleibt aber mit der spezifizierten Genauigkeit in Betrieb, weil die restlichen vier Kanäle ungestört und genau weiterarbeiten.

Austauschbare Ultraschall-Wandler:

Die Ultraschall-Wandler sind durch Edelstahlfenster vom Produkt getrennt. Die Piezos können ohne Betriebsunterbrechung bei Betriebsdruck gewechselt werden (s. Abb. 16)

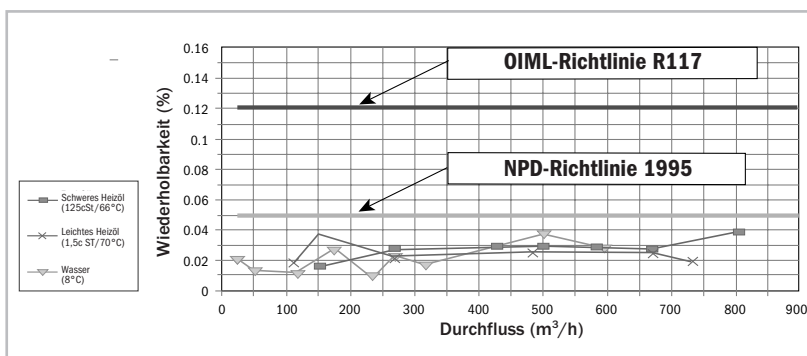
Zulassungen, Prüfungen

NMI (Niederländische Eichbehörde) und die PTB Braunschweig haben ALTOSONIC V für den eichpflichtigen Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser nach OIML R 117 mit einer Eichfehlergrenze von 0,2% vom Messwert zugelassen. Weitere nationale Zulassungen sind in Arbeit. Zusätzlich Labor- und Feldtests bei verschiedenen Unternehmen der Petrochemie und Prüfinstituten durchgeführt. Typische Ergebnisse zeigen Abb. 27 und Abb. 28:

Einsatz des eichfähigen Ultraschall-Volumenzählers in einer Multiproduct-Pipeline

1997 wurde die Pipeline RRB (Rohstoffpipeline Rostock - Böhlen) in Betrieb genommen. Die RRB ist die erste in Deutschland für den Transport von brennbaren Flüssigkeiten und von Flüssiggas zugelassene Fernleitung. Sie transportiert Naphtha / Kondensat, Pentan, Flüssiggas C3+ und Rohöle.

Abb. 28:
Ultraschall-
Volumenzählers
ALTOSONIC V:
Wiederholbarkeit:
< 0,05% vom
Messwert!



In dieser 430 km langen Multiproduct-Pipeline DN 400, PN 90 bar sind die bisher einzigen zum eichpflichtigen Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser zugelassenen Ultraschall-Volumendurchflusszähler (ALTOSONIC V von KROHNE) eingesetzt. Sie tragen ganz wesentlich zur Wirtschaftlichkeit und Sicherheit dieser Rohrleitung bei (s. Abb. 29).

Die Messdaten dieser 5-Kanal-Ultraschall-Volumenzähler mit der extrem geringen Messunsicherheit von 0,15% und einer Reproduzierbarkeit weit innerhalb 0,05% werden genutzt für

- genaue Abrechnung der transportierten Medien,
- Lecküberwachung, die Leckströme mit einer Größe von 0,5% des Nenndurchflusses erkennt
- Leckortung mit Ortungsfehlern bis herunter zu wenigen hundert Metern, die eine schnelle, erfolgreiche Leckbekämpfung ermöglicht,
- sowie für die Identifizierung von Trennschichten zwischen verschiedenen Medien, die nacheinander die Pipeline durchlaufen.

Praxisbewährung der Ultraschall-Durchfluss-Messtechnik

Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeit-Differenzverfahren sind seit mehr als 20 Jahren im industriellen Einsatz. Sie messen und zählen Volumenströme von Trink-, Brauch- und Fernwärmewasser, Säuren, Ölen und allen fließfähigen Produkten in Petrochemie-Anlagen. Sie kontrollieren die Be- und Entladung von Tankfahrzeugen und Großtankern, auch auf Offshore-Bohrplattformen.



Abb. 29:
Geeichter Ultraschall-
Volumenzähler
ALTOSONIC V mit
5 Messpfaden in einer
Pumpstation der RRB

Portable Aufsnallgeräte nach dem Laufzeit-Differenzverfahren erlauben die mobile, schnelle und einfache Kontrolle von Pumpenleistungen oder anderen Durchflussmessern. Ultraschall-Durchflussmesser für Gase werden zur Messung von Abgasströmen, von Pressluftproduktion und Wirkungsgrad von Kompressoren, der Erdgaszufuhr in Gaskraftwerke eingesetzt. Sie optimieren mit ihrer Durchflussanzeige und dem aus gemessener Schallgeschwindigkeit des Gases und anderen Messgrößen abgeleiteten Molgewicht die Verbrennung von Restgasen in Raffinerien, verbessern so den Wirkungsgrad und reduzieren den Schadstoff-Ausstoß.

Der Ultraschall-Durchflussmesser ist ein robustes Betriebsmessgerät, das nach mehr als 20 Jahren Reife im industriellen Einsatz heute seine hohe Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Stabilität täglich in unterschiedlichsten Anwendungen unter Beweis stellt.

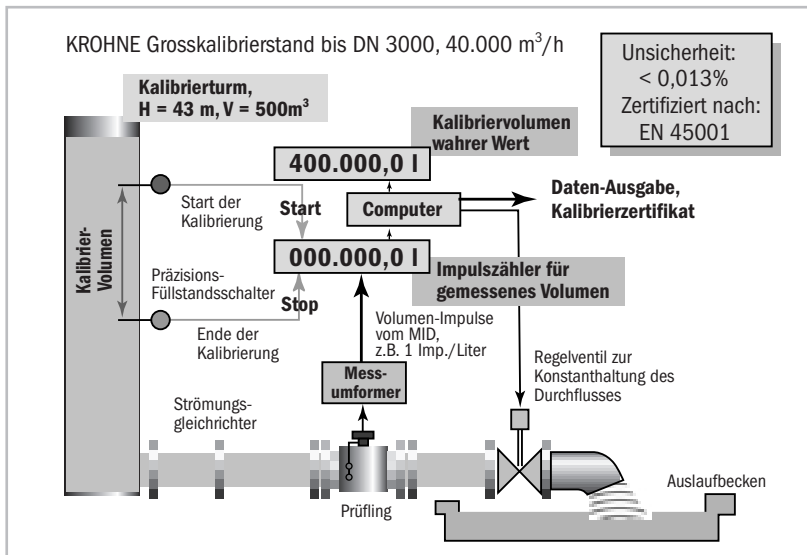
Aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und Genauigkeit, geringen Wartungsanforderungen, niedrigen Leistungsaufnahme und wegen des vernachlässigbaren Druckverlustes gehören Ultraschall-Durchflussmesser zu den Durchflussmessern mit den niedrigsten Betriebskosten („Cost of ownership“).

Abb. 30:
Burn-in Test der
Messumformer sichert
hohe Zuverlässigkeit



Zu dieser hohen Zuverlässigkeit und dem dadurch geringen Aufwand für die Instandhaltung tragen Burn-In-Tests bei, die KROHNE als Standard-Stückprüfung an jedem auszuliefernden Messumformer durchführt (Prinzip s. Abb. 30). Durch diesen Test bei Wechseltemperatur werden Frühausfälle elektronischer Komponenten im Hause vorweggenommen. Die Zuverlässigkeit im Feld steigt dadurch erheblich an. Die Funktion bei Einsatz im Freien kann garantiert werden.

Abb. 31:
Kalibrierstand für
Ultraschall-Durchfluss-
messer bis DN 3000,
40.000 m³/h, Prinzip



Die Kalibrierung jedes einzelnen Durchflussmessers vor Auslieferung auf Prüfständen, die amtlich überwacht werden und nach EN 45001 zertifiziert sind, sichert die messtechnische Qualität und erspart dem Kunden mühsame Einzelprüfungen und „Vor-Ort-Kalibrierungen“ (Prinzip s. Abb. 31).

Der Anwendungsbereich ist in den letzten Jahren durch die Einführung von UFM für Hochtemperatur- und Hochdruckanwendungen für Flüssigkeiten, Gase und Heißdampf spürbar erweitert worden. Damit ermöglichen Ultraschall-Durchflussmesser Messungen in Bereichen, für die bisher kein geeignetes Durchfluss-Messverfahren zur Verfügung stand. Die Ultraschall-Durchflussmessung beginnt, in die klassischen Einsatzbereiche der Wirkdruck-Durchflussmessung und Verdrängerzähler vorzudringen.

Vorteile der Ultraschall-Durchflussmessung gegenüber den meisten dieser klassischen Messverfahren:

- Linear, genau, weite Messspanne,
- verschleiß- und wartungsfrei, langzeitstabil
- einfache Parametrierbarkeit für jede zur Nennweite der Prozessleitung passende Messaufgabe
- zusätzliche Information über den Messstoff durch parallele Ausgabe der Schallgeschwindigkeit
- keine zusätzlichen Druckverluste,
- also niedrige Betriebskosten.

Ultraschall-Durchflussmesser nach dem Laufzeitdifferenz-Verfahren, Einsatzgrenzen heute:

Messstoff	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Gase, Dampf	Flüssigkeiten
Ausführung:	In Line-Zweistrahl-Durchflussmesser	5-Strahl-Durchflussmesser	Zweistrahl-Durchflussmesser	Ultraschall-Clamp-On-Durchflussmesser
Nennweite [DN [mm]	25 bis 5000	100 bis 1000	50 bis 600	13 bis 5000
Für Durchflussmessung von m ³ /h ... bis ... (ca.)	0,5 m ³ /h ... > 500.000 m ³ /h	30 m ³ /h ... > 10.000 m ³ /h	„Betriebs-m ³ “: 7 m ³ /h ... 25.000 m ³ /h	0,3 m ³ /h ... > 500.000
Messfehler, typ.:	< 0,5% v. Messwert	< 0,15% v. Messwert	2% v. Messwert	2% v. Messwert
Reproduzierbarkeit:	< 0,2% v. Messwert	< 0,05% v. Messwert	< 0,5% v. Messwert	< 0,5% v. Messwert
Medientemperaturen:	≤ 170°C (200°C) Optionen: 500°C	≤ 120°C	Standard: 140°C Optionen: 500°C	< 280°C
Reynoldszahl-Bereich:	< 100 ... > 10 ⁶	< 100 ... > 10 ⁶	< 100 ... > 10 ⁶	> 10.000
Betriebsdruck: durch Prozessleitung	< 1500 bar	Auf Anfrage	< 100 bar	nur begrenzt
Medien:	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten
Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen:	Ja	Ja	Ja	Hersteller-abhängig
Zugelassen nach OIML-R 117	Nein	Ja, eichpflichtiger Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser	Nein	Nein

Abbildungsverzeichnis:

Abb.:	Seite:
Abb. 1: Schallfrequenzen in der Natur und in der Ultraschall-Durchflussmessung	3
Abb. 2: Schallgeschwindigkeit c in verschiedenen Medien (unter Normalbedingungen)	4
Abb. 3: Prinzip des Doppler-Durchflussmessers	5
Abb. 4: Gegen den Strom braucht man länger...	7
Abb. 5: Prinzip der Ultraschall-Durchflussmessung nach dem Laufzeit-Differenzverfahren	7
Abb. 6: Beispiel für Größe der Laufzeiten	8
Abb. 7: Messtoff-bedingte Einsatzgrenzen	9
Abb. 8: Strömungsprofile bei gleichem Durchfluss: Links laminar, rechts turbulent ($Re = 100.000$)	9
Abb. 9: Mittelung des Strömungsprofils durch mehrstrahlige Messung	10
Abb. 10: Mehrere Strahlen durch Mehrfachreflektion eines Strahls	10
Abb. 11: Aufschnall-Schienen eines Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmessers (KROHNE UFM 610 P)	11
Abb. 12: Akku-betriebener Messumformer eines Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmessers (KROHNE)	11
Abb. 13: Schall-Einkopplung bei Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmessern	12
Abb. 14: Zweistrahl-Ultraschall-Durchflussmesser ALTOSONIC UFM 500 K, DN 600, PN 10,	13
Abb. 15: Lage der Messpfade beim Zweistrahl-Ultraschall-Durchflussmesser	13
Abb. 16: Das aktive Sensorelement ist unter Betriebsbedingungen austauschbar	14
Abb. 17: Fehlergrenzen eines Zweistrahl-Ultraschall-Durchflussmessers für Flüssigkeiten	15
Abb. 18: Prinzipskizze eines Ultraschall-Hochtemperatur-/Hochdruck-Sensors	15
Abb. 19: Hochtemperatur-Version mit Heizmantel für Flüssig- oder Dampf-Begleitheizung	16
Abb. 20: Zweistrahl-Ultraschall-Durchflussmesser für Gase	17
Abb. 21: Messumformer für Ultraschall-Gasdurchflussmesser	17
Abb. 22: Zweistrahl-Ultraschall-Durchflussmesser, Messabweichungen	18
Abb. 23: Einschweiß-Sensoren für metallische Rohrleitungen	20
Abb. 24: Ultraschall-Durchfluss-Sensor FS 800C zum Einbau in Kanäle	20
Abb. 25: Sensor des eichfähigen Volumenzählers ALTOSONIC V mit 5 Messpfaden	21
Abb. 26: Messrohr des 5-Kanal-Ultraschall-Volumenzählers ALTOSONIC V: Freier Querschnitt!	22
Abb. 27: Ultraschall-Volumenzählers ALTOSONIC V: Messabweichungen < 0,2% vom Messwert	23
Abb. 28: Ultraschall-Volumenzählers ALTOSONIC V: Wiederholbarkeit: < 0,05% vom Messwert!	24
Abb. 29: Geeichter Ultraschall-Volumenzähler ALTOSONIC V mit 5 Messpfaden in einer Pumpstation	25
Abb. 30: Burn-in Test der Messumformer sichert hohe Zuverlässigkeit	26
Abb. 31: Kalibrierstand für Ultraschall-Durchflussmesser bis DN 3000, 40.000 m ³ /h, Prinzip	26

[illegible]

[illegible]