

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung .....	11
2. Akustische Effekte .....	15
2.1. Drifteffekt .....	15
2.1.1. Ablenkeffekt .....	17
2.1.2. Mitführeffekt .....	20
2.2. Dopplereffekt .....	21
2.3. Dämpfungs- bzw. Beugungseffekt .....	25
3. Allgemeines zu akustischen Strömungsmeßverfahren .....	27
3.1. Übersicht .....	27
3.2. Allgemeine Feststellungen zu Verfahren nach dem Mitführeffekt .....	27
4. Akustische Strömungsmeßverfahren .....	33
4.1. Impulsverfahren .....	33
4.1.1. Laufzeitdifferenzverfahren .....	33
4.2. Sing-around-Verfahren (Impulsurlaub- oder Impulsfolgeverfahren) .....	34
4.2.1. Sing-around-Prinzip .....	34
4.2.2. Grundsätzliche Meßregime .....	36
4.2.3. Frequenzdarstellung .....	36
4.2.4. Anwendung der Zähltechnik .....	37
4.2.5. Verfahren mit höherer Auflösung .....	39
4.2.5.1. Höhere Auflösung durch Frequenzvervielfachung; Frequenzdifferenzverfahren .....	40
4.2.5.2. Höhere Auflösung durch Untersetzung der Sing-around-Frequenz mit einer Hilfsfrequenz $f_H$ ; „Phasendifferenzverfahren“ bei Impulsbetrieb; Periodendauerdifferenzverfahren .....	40
4.2.5.3. Höhere Auflösung durch virtuelle Zählakterhöhung .....	44
4.2.6. Systematik der technisch unterschiedlichen Sing-around-Verfahren .....	45
4.2.7. Erforderlicher minimaler Driftweg .....	46
4.2.8. Zeitserielle Messung – zeitparallele Messung; Einstreckenverfahren – Doppelstreckenverfahren .....	48
4.2.9. Hinweise für technische Realisierungen von Strömungsmeßeinrichtungen .....	49
4.2.10. Schallgeschwindigkeitskompensation .....	50
4.2.10.1. Aktueller Schallgeschwindigkeitswert .....	51

4.2.10.2.	Fehlerminimierung durch gezielten Meßablauf; Pascal- und Spiegelverfahren .....	51
4.2.11.	Totzeit .....	55
4.2.11.1.	Ursachen .....	55
4.2.11.2.	Berücksichtigung der Totzeit in den grundsätzlichen Darstellungen .....	56
4.2.11.3.	Ermittlung der Totzeit .....	58
4.2.11.4.	Abschätzen der Totzeit und der Fehlereinfluß auf das Meßergebnis .....	60
4.2.12.	Schwingeranregung und Triggerung .....	61
4.3.	Impulsreflexions- oder Impulsprellverfahren (Pingpongverfahren) .....	64
4.4.	Strömungsmessung im kontinuierlichen Betrieb; cw-Verfahren .....	66
4.4.1.	Phasendifferenzverfahren .....	67
4.4.2.	Frequenzdifferenzverfahren bei konstanter Wellenlänge; LLL-Verfahren (lambda locked loop) .....	69
4.4.3.	Dopplerverfahren .....	71
4.5.	Vergleich von Strömungsmeßverfahren .....	75
5.	Akustische Meßstrecken .....	80
5.1.	Reflexstrecken .....	80
5.1.1.	Ausführungsformen .....	80
5.1.2.	Justage .....	84
5.1.3.	Meßfehlerinflüsse .....	87
5.1.4.	Druckstabilität der Schwingerplättchen .....	89
5.1.5.	Ergebnisse praktischer Erprobung .....	89
6.	Akustische Strömungsmesser .....	96
6.1.	Praktische Ausführungen .....	96
6.2.	Messung bei extrem kleinen Strömungsgeschwindigkeiten .....	102
6.3.	Akustische Fahrtmesser .....	102
6.3.1.	Fahrtmesser mit fester Meßstrecke .....	102
6.3.2.	Doppler-Fahrtmesser .....	103
7.	Akustische Durchflußmessung .....	104
7.1.	Allgemeines .....	104
7.1.1.	Zur Definition des Durchflusses .....	104
7.1.2.	Allgemeines zur akustischen Durchflußmessung (Acoustic Flow Measurement) .....	105
7.2.	Definition des Kalibrierungsfaktors .....	106
7.3.	Analytische Darstellung der Strömungsprofile .....	108
7.4.	Kritik der Strömungsprofilardarstellungen .....	110
7.5.	Beziehungen zwischen den charakteristischen Faktoren bzw. Exponenten der unterschiedlichen Profildarstellungen .....	111
7.6.	Beziehungen zur Reynoldszahl .....	113
7.6.1.	Lineare Regression für $k$ .....	115
7.6.2.	Lineare Regression für $k'^{-1}$ .....	117
7.6.3.	Die Darstellung $m, n, p, q = f(\lg Re)$ .....	117

8.	Volumenstrommessung an geraden zylindrischen gefüllten Rohren nach Laufzeitverfahren .....	121
8.1.	Parabolisches Strömungsprofil im geraden zylindrischen gefüllten Rohr .....	121
8.2.	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit .....	124
8.2.1.	Mittlere Flächengeschwindigkeit .....	124
8.2.2.	Strömungsprofilardarstellung bei jeweils gleicher Durchflußmenge .....	124
8.2.3.	Schallstreckenordnungen .....	125
8.2.4.	Akustische Messung parallel zur Rohrachse .....	129
8.2.5.	Akustische Messung schräg zur Rohrachse .....	132
8.2.5.1.	Zentrische Anordnung .....	132
8.2.5.2.	Exzentrische Anordnung .....	134
9.	Akustische Doppler-Durchflußmessung .....	142
10.	Clamp-on-Meßsysteme .....	145
10.1.	Gegenüberstellung der Einbaustrecke (Fluid-Kontakt-Strecke) und der Anklemmstrecke (Clamp-on-Strecke) bei Laufzeitverfahren .....	146
10.1.1.	Einige akustische Probleme bei der Clamp-on-Technik .....	149
10.1.2.	Technische Ausführungen .....	156
10.1.3.	Praktische Handhabung und Meßergebnisse .....	159
10.2.	Clamp-on-Durchflußmesser nach dem Dopplereffekt .....	160
11.	Durchflußmessung nach anderen akustischen Verfahren .....	164
11.1.	Ablenkverfahren .....	164
11.2.	Korrelationsverfahren .....	166
11.3.	Wirbelfrequenzabastung mit Ultraschall .....	167
12.	Durchflußmessung an Gerinnen .....	168
12.1.	Aufwandsreduzierte Meßmethode .....	170
12.2.	Durchflußmessungen an Kanälen mit rechteckigem Querschnitt .....	174
13.	Wertung der Ultraschall-Strömungs- und Durchflußmeßtechnik; Entwicklungstendenzen .....	177
13.1.	Wertung der Strömungsmeßtechnik .....	177
13.2.	Wertung der Durchflußmeßtechnik .....	177
14.	Kurzer geschichtlicher Abriß der Entwicklung der Ultraschall-Meßverfahren für Strömung und Durchfluß .....	182
	Literaturverzeichnis .....	184
	Sachwortverzeichnis .....	191