

Dipl.-Phys. Herbert Köchner, Erlangen

**Modellierung der
Wechselwirkung zwischen
Ultraschall- und
Geschwindigkeitsfeldern
von Fluiden und deren
Anwendung auf die
Auslegung von Ultraschall-
Durchflußmessern für Gase**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **609**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzungen	1
1.2	Literaturübersicht	2
1.3	Ziel der Arbeit	4
1.4	Aufbau der Arbeit	5
2	Ultraschall-Durchflußmessung in Fluiden	6
2.1	Ultraschall-Meßverfahren	6
2.1.1	Laufzeitverfahren	10
2.1.2	Dopplerverfahren	12
2.1.3	Andere akustische Verfahren	13
2.1.4	Bewertung der Meßverfahren	15
2.2	Anordnungen	16
2.2.1	Meßkopfausführung	16
2.2.2	Meßpfadanordnungen	17
2.3	Durchflußmessung in Gasen	18
2.3.1	Geschichte der Gaszählung	18
2.3.2	Balgengaszähler	19
2.3.3	Ultraschall-Gaszähler	21
3	Ultraschallfeld	26
3.1	Ultraschallausbreitung in Fluiden	26
3.1.1	Schallfeldgrößen	26
3.1.2	Schallausbreitung im ruhenden Medium	28
3.1.3	Punktquellensynthese	31
3.2	Ultraschallwandler	32
3.2.1	Piezoelektrische Wandler	33
3.2.2	Schallabstrahlung	34
3.2.3	Energetische Charakteristika des Ultraschallfeldes	35
3.3	Modellierung der Ultraschallausbreitung	37
3.3.1	Wellentheoretische Modellierung der Schallausbreitung	37
3.3.2	Modellierung der Schallausbreitung durch Strahlverfolgung	39
3.4	Verfolgung eines Schallstrahls	41
3.4.1	Raumgeometrie	41
3.4.2	Schallquelle	42
3.4.3	Reflexion der Schallwellen	44
3.4.4	Schwächung der Schallwellen	44
3.4.5	Schallempfänger	46

4	Strömungsverhältnisse	48
4.1	Theoretische Überlegungen zur Strömung im Meßrohr	49
4.1.1	Laminare Strömung im geraden Rechteckrohr	50
4.1.2	Turbulente Strömung im geraden Rechteckrohr	51
4.1.3	Strömung im stark gekrümmten Rechteckrohr	53
4.1.4	Strömungsentwicklung	54
4.2	Geschwindigkeitsmessungen	56
4.2.1	Meßtechnik	56
4.2.2	Meßergebnisse	58
4.3	Partikeltransport	68
5	Numerische Modellierung eines Ultraschall-Durchflußmessers mit einem aleatorischen Schallstrahlenverfahren	72
5.1	Monte-Carlo-Verfahren	73
5.1.1	Grundlagen des Monte-Carlo-Verfahrens	73
5.1.2	Erzeugung von Zufallszahlen	76
5.2	Anwendung des Strahlverfolgungsverfahrens	77
5.3	Auswahl der Schallstrahlen	80
5.3.1	Deterministisches Verfahren	81
5.3.2	Halbdeterministisches Verfahren	82
5.3.3	Aleatorisches Verfahren	82
5.3.4	Modellierung der Schallintensitätsverteilung auf der Wandlerober- fläche	84
5.3.5	Bewertung der Rechenverfahren	86
5.4	Berechnung des Strömungseinflusses	88
5.5	Bestimmung der Signallaufzeit	91
5.5.1	Laufzeitverteilung	91
5.5.2	Empfangssignal	93
5.5.3	Berechnung der Laufzeitdifferenz	96
5.6	Linearität, Gas- und Temperaturabhängigkeit	98
5.6.1	Linearität	99
5.6.2	Gasabhängigkeit	104
5.6.3	Temperaturabhängigkeit	105
6	Entwicklung eines verbesserten Ultraschall-Durchflußmessers für Gase	108
6.1	Anforderungen	109
6.2	Modifikationen	110
6.2.1	Strömungsführung	111
6.2.2	Meßrohr	112
6.3	Numerische Modellierung	117
6.3.1	Schallausbreitung	117
6.3.2	Meßeigenschaften	118
6.4	Experimentelle Verifikation	119
6.4.1	Strömungsführung	119
6.4.2	Meßeigenschaften	125
6.4.3	Zusammenfassung	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	129

Anhang	132
A.1 Ableitung der Geschwindigkeitsverteilung im laminar durchströmten Rechteckrohr	132
A.2 Bemerkungen zur Wechselwirkung zwischen Ultraschall und Strömung . . .	135
A.2.1 Schallinduzierte Strömung	135
A.2.2 Schallanregung durch Turbulenz	135
A.3 Testgase	136
A.3.1 Gaszusammensetzung	136
A.3.2 Kinematische Viskosität der Testgase	136
Literaturverzeichnis	138