

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Verfahren der Durchflußmessung	4
1.2.1	Drosselgeräte, Blenden, Düsen	4
1.2.2	Schwebekörperdurchflußmesser	6
1.2.3	Wirbelfrequenzdurchflußmesser (Vortex-Durchflußmesser)	7
1.2.4	Magnetisch-induktiver-Durchflußmesser	8
1.2.5	Ultraschalldurchflußmesser	10
1.2.6	Ovalradzähler	12
1.2.7	Thermischer Massenstrommesser	12
1.2.8	Coriolis-Massendurchflußmesser	13
	Coriolis-Kraft	13
	Benutzung der Coriolis-Kraft zur Durchflußmessung	13
	Ausführungsformen von Coriolis-Massendurchflußmessern	16
2	Berechnung und Modellierung des schwingenden Rohres	21
2.1	Berechnung als kontinuierlicher Schwinger	21
2.1.1	Zielsetzung und Vorgehen	21
2.1.2	Schwingungsdifferentialgleichung	22
	Bewegungsgleichung des Meßrohres	23
	Bewegungsgleichung des Mediums	25
	Bewegungsgleichung des Gesamtsystems	26
2.1.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen	27
	Randbedingungen bei Balkentheorie	28
	Randbedingungen bei Saitentheorie	29
2.1.4	Ritz-Ansatz	31
2.1.5	Abschätzung des Meßeffectes	33
2.1.6	Auslegung eines geraden Meßrohres	34
	Edelstahlrohr 1.4301	34
	Titanrohr	35
	Meßeffect	36

Position der Sensoren	37
2.1.7 Störgrößen	38
Axialkraft	38
Innendruck	41
Temperatur	43
2.2 Modellierung mit Hilfe von diskreten Elementen	45
2.2.1 Vorüberlegungen zur Modellbildung	46
elektromechanische Entsprechungen	47
Ersatzschaltbild des Durchflußmessers	47
2.2.2 Simulation eines Einrohr-Durchflußmessers	48
Meßeffect	48
Massenunsymmetrie	49
unsymmetrische Temperaturverteilung	49
Einflüsse durch Dämpfung	50
2.2.3 Folgerungen aus den Simulationen	52
2.2.4 Simulation eines Doppelrohr-Durchflußmessers	53
Simulationsmodell	53
Einfluß der Dämpfung	55
Kopplung der beiden Rohre	56
2.2.5 Abstimmung des Tilgerrohres	58
elektrische Feder	58
erzwungene Anregung	59
2.2.6 Schwingungsverhalten einer Doppelrohranordnung	59
Betrachtung als Zwei-Massen-Modell	60
Differentialgleichung	60
Eigenfrequenzen	61
Optimaler Betriebspunkt	62
3 Realisierung des Meßsystems	64
3.1 mechanischer Aufbau	64
3.1.1 Vorüberlegungen	64
Materialwahl	64
Einspannung des Meßrohres	66

3.1.2	Aufbau des Aufnehmers	69
3.1.3	Erregersystem	69
	Anregung des Tilgerrohres	69
	Elektrische Feder	72
	Erzwungene Schwingung	75
3.1.4	Regelung des Tilgerrohrantriebs	77
3.1.5	Messung der Gehäuseschwingung mit einem Beschleunigungssensor	76
	Einfacher Beschleunigungssensor	80
3.2	Sensorik	82
3.2.1	Messung der Rohrschwingung	82
	Optischer Sensor	82
	Photostromverstärker	83
	Delta-Sigma Analog/Digital-Umsetzer	92
	Phasenregelung bei 1000-facher Testfrequenz	97
3.2.2	Messung der Axialkraft	99
	magnetoelastischer Sensor	100
3.2.4	Messung der Temperatur	112
	Temperatur des Meßrohres	112
	Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Meßrohr	112
3.2.5	Messung der Durchflußreferenz	112
3.2.6	Messung der Frequenz	113
3.3	Signalverarbeitung	114
3.3.1	Aufbau des Gesamtsystems	114
3.3.2	Verfahren der Phasenmessung	115
3.3.3	Ausgleichsrechnung mittels Fourierreihe	116
	Grundlagen	116
	Fehlerabschätzung	118
3.3.4	Synchrone Abtastung	121
	Frequenzvervielfachung mit Oszillator und Teiler	122
	Frequenzvervielfachung mit VCO und Teiler	124
	Meßergebnisse	126
3.3.5	Fensterung des Datensatzes	127
	Berechnung des Spektrums	128

Verbesserung im Realbetrieb	133
3.3.6 korrelative Phasenmessung	134
Grundlagen	134
Fehlerabschätzung	138
3.3.7. Vergleich der Verfahren	141
3.3.8 Ermittlung der Frequenz aus dem Datensatz	142
3.3.9 Realisierung mit DSP	144
Dynamik	144
Nullpunktstabilität	145
Linearität	146
Abhängigkeit der berechneten Phasendifferenz von der Signalfrequenz	148
Abhängigkeit der berechneten Phasendifferenz von der Signalamplitude	149
4 Eigenschaften des Meßsystems	151
4.1 Kennlinie, Meßunsicherheit	151
4.2 Nullpunktstabilität	152
ADU	152
Vorverstärker	152
Gesamtsystem	153
Vergleich mit industriellen Geräten	154
4.4 Dynamik	155
4.5 Temperaturempfindlichkeit	155
Nullpunkt	156
Kalibrierfaktor	157
4.6 Druckempfindlichkeit	160
Nullpunkt	161
Grundfrequenz	161
4.7 Dichteabhängigkeit	162
4.8 Abhängigkeit von der Viskosität	163
5 Zusammenfassung	165
Literatur	168