

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Durchflussmessung	4
2.1	Das kreuzkorrelative Messverfahren	6
2.2	Das Vortexverfahren	7
2.3	Die Beschreibung der Messstrecke	8
3	Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung	10
3.1	Modulation von Ultraschallsignalen in Strömungen	10
3.1.1	Die Physik des Schalls	10
3.1.2	Modulation der Ultraschallsignale	11
3.2	Auswertung der demodulierten Signale	18
3.3	Phasenrekonstruktion	18
4	Signalrekonstruktion	20
4.1	Theoretische Modellbeschreibung	20
4.2	Modellierung der Ultraschallschranke	22
4.3	Kalmanfilter	24
4.4	Komplexe Bandpassabtastung	29
4.5	Ergebnisse der Phasenrekonstruktion	31
4.5.1	Die ungestörte Strömung	31
4.5.2	Die gestörte Strömung	32
4.6	Simulation des Signalverlaufs	36
5	Die kreuzkorrelative Durchflussmessung	42
5.1	Das kreuzkorrelative Messverfahren	42
5.1.1	Auswertung der demodulierten Ultraschallsignale	42
5.1.1.1	Die ungestörte Strömung	42
5.1.1.2	Die gestörte Strömung	44
5.2	Dreidimensionale Darstellung des Geschwindigkeitsprofils	49
5.2.1	Das Prinzip der Tomographie	49
5.2.2	Aufbau der Messkammer	50
5.3	Rekonstruktionsalgorithmen	51
5.3.1	Die Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART)	51
5.3.2	Das Kollokationsverfahren	53
5.3.3	Ein einfaches Interpolationsverfahren zur schnellen tomographischen Darstellung	57

Inhaltsverzeichnis

5.4	Rekonstruktionen mit verschiedenen Algorithmen	58
5.4.1	Darstellung der Ergebnisse	58
5.4.2	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse	62
5.5	Anpassung der Polynome	64
5.6	Weitere Störungsformen	65
5.7	Schlussfolgerung	65
6	Die Vortex-Durchflussmessung	67
6.1	Theoretische Aspekte und Simualtion	67
6.2	Gemessene Ultraschallsignale	70
6.2.1	Die demodulierte Amplitude	70
6.2.2	Die demodulierte Phase	72
6.2.3	Die Modulationsintensität	74
6.3	Analoge Demodulationsverfahren	76
6.3.1	Verfahren zur Demodulation amplitudenmodulierter Trägersignale	76
6.3.2	Verfahren zur Demodulation phasenmodulierter Trägersignale	79
6.3.3	Vergleich der analogen und digitalen Demodulationsverfahren	83
6.4	Unterschiedliche Trägerfrequenzen	84
6.4.1	Die demodulierte Amplitude	85
6.4.2	Die demodulierte Phase	87
6.5	Unterschiedliche Störkörpergeometrien	89
6.5.1	Der Delta-Störkörper	90
6.5.1.1	Der flach angeströmte Störkörper	90
6.5.1.2	Der spitz angeströmte Störkörper	92
6.5.2	Die Gewindestange	92
6.5.3	Das T-Profil	93
6.5.3.1	Das flach angeströmte T-Profil	94
6.5.3.2	Das spitz angeströmte T-Profil	94
6.6	Ursachen für unterschiedliche Empfindlichkeiten	95
6.7	Vergleich der Störkörpergeometrien	97
6.8	Kalibrierung von Vortexmetern	100

Inhaltsverzeichnis

6.9	Störeinflüsse	102
6.9.1	Umlenkung der Strömung	103
6.9.2	Pulsation	105
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
8	Literaturverzeichnis	112