

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Notation	xi
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit	4
1.3 Gliederung der Arbeit	5
2 Modellierung des Sensorsystems	7
2.1 Grundlagen und Funktionsweise des Sensorsystems	7
2.2 Mess einschränkungen von Auswerteverfahren	9
2.3 Modellierung des Sensorsystems	12
2.3.1 Strömungsmodell	13
2.3.2 Reflexionspunktberechnung	15
2.3.3 Elektromechanische Übertragungsfunktion	17
2.3.4 Schallausbreitungs- und Phased-Array-Modellierung	21
2.3.5 Schallabsorptionsmodell	27
2.3.6 Reflexionsmodell	29
2.4 Systemdesign	31
2.5 Mess- und Prozessrauschen	32
3 Laufzeitbasierte Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit	39
3.1 Funktionsweise	40
3.2 Sendesignalform	41
3.3 Signalaufbereitung	45
3.4 Objektverfolgung	50
3.4.1 Zustandsschätzung	50
3.4.2 Datenassoziation	58

3.4.3	Modellansatz	73
3.4.4	Objektreduktion/-erweiterung	75
3.4.5	Geschwindigkeitsextraktion	76
3.5	Räumliche Geschwindigkeitsfilterung	77
3.5.1	Vollgefüllte Rohrströmung	77
3.5.2	Offene Kanalströmung	81
3.6	Analysen zum Auswerteverfahren durch Simulation	83
3.6.1	Konvergenz und Stabilität	84
3.6.2	Variation von SNR und Reflektoranzahl	85
3.7	Messergebnisse zum Auswerteverfahren	87
3.7.1	Vollgefüllte Rohrströmung	87
3.7.2	Offener Kanal	88
3.7.3	Klärwerk Ulm	90
3.8	Abschließende Bewertung	91
4	Dopplerbasierte Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit	93
4.1	Funktionsweise	93
4.2	Sendesignalform und Signalaufbereitung	94
4.3	Dopplerfrequenzbestimmung	96
4.3.1	DFT mit Zero-Padding	97
4.3.2	Kovarianzmethode	99
4.3.3	Pisarenko	101
4.3.4	MUSIC	104
4.4	Analysen der Auswerteverfahren durch Simulation	108
4.4.1	Gegenüberstellung der Auswerteverfahren	108
4.4.2	Variation von SNR und Reflektoranzahl	109
4.5	Messergebnisse zum Auswerteverfahren	113
4.5.1	Vollgefüllte Rohrströmung	113
5	Fusion von laufzeit- und dopplerbasierten Auswerteverfahren	117
5.1	Sendesignalformen und Signalaufbereitung	118
5.2	Erweiterung der Objektverfolgung um die Dopplerfrequenz	123
5.2.1	Funktionsweise	123
5.2.2	Analysen zum Auswerteverfahren durch Simulation	124
5.2.3	Messergebnisse zum Auswerteverfahren	124

5.3	Erweiterung der Dopplerauswertung um die Ortsinformation	128
5.3.1	Funktionsweise	128
5.3.2	Analysen zum Auswerteverfahren durch Simulation	129
5.3.3	Messergebnisse zum Auswerteverfahren	130
6	Realisierung	133
6.1	Implementierung	133
6.2	Optimierung der Phased-Array-Strahler	135
7	Zusammenfassung	137
A	Anhang	141
A.1	Fehlerzuwachs Kreuzkorrelationsfunktion bei großem t_{PRI}	142
A.2	Navier-Stokes Gleichung	144
A.3	Iterationsroutine zur Reflexionspunktbestimmung	146
A.4	Messergebnisse: Phased-Array-Sensor	147
A.5	Frequenzgänge zur Bestimmung der Piezo-Übertragungsfunktion	149
A.6	Herleitung Wiener-Hopf-Gleichung	152
A.7	Levinson-Durbin Rekursion	154
A.8	Geschlossene Lösung zum Richtfaktor eines Einzelstrahlers	160
A.9	Vgl. gemessener und simulierter Schalldrucksignale	161
A.10	Messfehler Sekundärgeschwindigkeiten	163
A.11	Auswertung Strömungsbeschleunigungen	167
A.12	Matched-Filter-Design	169
A.13	Filterdesign der Hilbert-Transformation	172
A.14	Herleitung Kalman-Filter - Prädiktionskoeffizienten	174
A.15	Herleitung Kalman-Filter - Innovationskoeffizienten	179
A.16	Herleitung der a-priori Zuweisungswahrscheinlichkeit	181
A.17	Nachweis der Gaußverteilung bei Mess-zu-Prädiktionsfehlern	183
A.18	Simulierte und modellierte Geschwindigkeitsprofile	184
A.19	Messergebnisse: KF-PDA-Verfahren - vollgefülltes Rohr	188
A.20	Messergebnisse: KF-PDA-Verfahren - offener Kanal	189
A.21	Messergebnisse: KF-PDA-Verfahren - Klärwerk Ulm	191
A.22	Herleitung Auswertestreuung der Kovarianzmethode	192
A.23	Messergebnisse: DFT mit Zero-Padding - vollgefülltes Rohr	194
A.24	Messergebnisse: MUSIC-Verfahren - vollgefülltes Rohr	195

A.25 Messergebnisse: Fusionierte KF-PDA- mit DFT-Verfahren - vollgefülltes Rohr	196
A.26 Messergebnisse: Fusionierte KF-PDA- mit DFT-Verfahren - offener Kanal .	197
A.27 Messergebnisse: Erweiterte Dopplerauswertung MUSIC - vollgefülltes Rohr	198
A.28 Messergebnisse: Erweiterte Dopplerauswertung MUSIC - offener Kanal .	199

Literaturverzeichnis**201**