

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Ultraschallunterstützte Prozesse in Flüssigkeiten	1
1.1.1 Akustische Kavitation	1
1.1.2 Sonochemische Reaktoren	2
1.1.3 Modellierung sonochemischer Reaktoren	3
1.1.4 Kavitationsdetektion	5
1.2 Zielsetzung der Arbeit	6
1.3 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Anwendungen von Ultraschall in Flüssigkeiten	11
2.1 Akustische Kavitation	11
2.2 Anwendungsbereiche von Ultraschall in Flüssigkeiten	14
2.2.1 Ultraschallreinigung	14
2.2.2 Ultraschall in der chemischen und verfahrenstechnischen Prozessführung	16
2.3 Ultraschallsysteme zur Beschallung von Flüssigkeiten	24
2.4 Piezoelektrische Ultraschallwandler	26
2.4.1 Funktionsweise und Aufbau	27
2.4.2 Modellierung piezoelektrischer Ultraschallwandler	28
2.4.3 Charakterisierung und Betrieb piezoelektrischer Ultraschallwandler	32
2.5 Modellierung von Ultraschallsystemen zur Beschallung von Flüssigkeiten	36
2.6 Messung von Schall und Kavitation in Flüssigkeiten	39
2.6.1 Schallmessung in Flüssigkeiten	39
2.6.2 Messtechnische Charakterisierung von Kavitation	41
3 Aufbau und experimentelle Charakterisierung des Ultraschallsystems	53
3.1 Aufbau des sonochemischen Reaktors	53
3.1.1 Aufbau des Ultraschallwandlers	54
3.1.2 Integration des Ultraschallwandlers in den Autoklav	56
3.2 Unbelasteter Ultraschallwandler	58
3.3 Belasteter Ultraschallwandler	61
3.4 Belasteter Ultraschallwandler im Autoklav	62
3.5 Schallfeldmessung im Autoklav	64
3.5.1 Aufbau des piezoelektrischen Schalldruckwandlers	64
3.5.2 Schallfeldmessungen im offenen Autoklav	67
3.6 Korrelation zwischen Schallfeld und Kavitationsaktivität	69
3.7 Zusammenfassung	73

4	Wechselwirkung zwischen Ultraschallwandler und Flüssigkeit	75
4.1	Grundlagen des Schalls in Flüssigkeiten	75
4.1.1	Grundgrößen des Schallfeldes	76
4.1.2	Die Wellengleichung	77
4.1.3	Schallreflexion und Schallausbreitung in Rohrleitungen	78
4.2	Aufbau des Simulationsmodells	81
4.2.1	Geometrischer Aufbau des Modells	82
4.2.2	Materialparameter	82
4.2.3	Finite-Elemente und Vernetzung	84
4.2.4	Definition von Auswertgrößen	85
4.3	Analyse des freischwingenden Ultraschallwandlers	85
4.4	Analyse des belasteten Ultraschallwandlers	89
4.5	Modalanalyse des Flüssigkeitsvolumens	90
4.6	Analyse des eingetauchten Ultraschallwandlers	93
4.6.1	Ultraschallwandler mit gekoppelter Wassersäule	93
4.6.2	Ultraschallwandler eingetaucht in Wasservolumen mit idealisier- ten Randbedingungen	97
4.6.3	Ultraschallwandler im offenen Autoklav	101
4.6.4	Ultraschallwandler im geschlossenen Autoklav	105
4.6.5	Einfluss von Kavitation	118
5	Prozessbegleitende Überwachung der Kavitationsaktivität	123
5.1	Messaufbau, Versuchsdurchführung und Signalanalyse	123
5.1.1	Messaufbau und Versuchsdurchführung	123
5.1.2	Signalanalyse	126
5.2	Charakterisierung des unbelasteten Ultraschallwandlers	128
5.3	Bestimmung von Indikatoren zur Beschreibung der Kavitationsaktivität	130
5.3.1	Analyse der Kavitationsaktivität basierend auf akustischen Mes- sungen	130
5.3.2	Bestimmung von Indikatoren im Ansteuersignal des Ultraschall- wandlers	137
5.3.3	Korrelation und Auswahl der Indikatoren	143
5.3.4	Applikation und Nachweis der Anwendbarkeit im offenen Autoklav	146
5.3.5	Anwendung im skalierten Ultraschallsystem	147
6	Zusammenfassung	151
	Literaturverzeichnis	163