

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>16</b>
1.1	Problemstellung .....	16
1.2	Zielsetzung .....	16
1.3	Vorgehensweise .....	17
<b>2</b>	<b>Ausgangslage.....</b>	<b>20</b>
2.1	Begriffe und Definitionen .....	20
2.1.1	Begriffe zur Ultraschall-Akustik .....	20
2.1.2	Begriffe zur Ultraschall-Gerätetechnik.....	22
2.2	Anwendungsgebiete der Ultraschalltechnik.....	24
2.2.1	Allgemeine Anwendungsbereiche der Ultraschalltechnik.....	24
2.2.2	Anwendung von Luftultraschallsensoren in der Automatisierungstechnik...	25
2.3	Übersicht der Meßaufgaben und Randbedingungen für Sensoren .....	26
2.4	Stand der Technik .....	29
2.5	Stand der Forschung .....	32
<b>3</b>	<b>Anforderungen an Schallköpfe für Ultraschallsensoren.....</b>	<b>35</b>
3.1	Allgemeine Anforderungen an den Ultraschallsensor .....	35
3.2	Spezifische Anforderungen an die Schallköpfe.....	36
3.3	Abschätzung der erreichbaren Leistungseigenschaften .....	36
3.3.1	Näherungsformeln für Kolbenstrahler und Punktstrahlergruppen .....	37
3.3.2	Eindimensionale Fourier-Akustik für Linienstrahler .....	38
3.3.3	Erfassung flächiger Strahler durch Dimensionsreduktion .....	40
3.3.4	Ergebnisse der Abschätzung.....	42
3.4	Konkretisierung der Anforderungen für vier Typenklassen von Schallköpfen .....	43
3.4.1	Anforderungen an einen F-Schallkopf.....	43
3.4.2	Anforderungen an einen W-Schallkopf.....	44
3.4.3	Anforderungen an einen N-Schallkopf.....	45
3.4.4	Anforderungen an einen Gruppenstrahler-Schallkopf.....	46
3.5	Anforderungen an das Schallkopf-Konstruktionsverfahren .....	48

<b>4</b>	<b>Analyse der Lösungsmöglichkeiten zur Konstruktion von Ultraschallköpfen .....</b>	<b>49</b>
4.1	Zerlegung in funktionale Komponenten .....	50
4.2	Analyse der Lösungsmöglichkeiten für die funktionalen Komponenten eines Schallkopfes .....	51
4.2.1	Elektroakustische Wandler .....	51
4.2.2	Schallformung durch Wandergestaltung .....	51
4.2.3	Schallformung durch akustische Linsen und Beugungsgitter .....	52
4.2.4	Schallformung durch Reflektoren .....	52
4.2.5	Schallformung durch Wellenleiter und Kanäle .....	53
4.2.6	Schallformung durch Gruppenstrahler .....	54
4.3	Bewertung und Auswahl von Lösungsvarianten für die akustischen Komponenten .....	55
4.4	Konstruktion von Schallkanälen .....	57
4.4.1	Entwurf von Schallkanälen mit Konstruktionselementen .....	57
4.4.2	Konstruktive Auslegung von ausgewählten achsensymmetrischen Schallkanal-Varianten .....	63
4.4.3	Akustische Konstruktionselemente für nicht-achsensymmetrische Konstruktionen .....	67
4.5	Fragenkatalog zur Konstruktion akustischer Ultraschallelemente .....	69
<b>5</b>	<b>Experimentell gestützter Entwurf von Schallkanälen .....</b>	<b>71</b>
5.1	Vorgehensweise unter Einsatz der Simulationstechnik und der Meßtechnik an Labormustern .....	71
5.1.1	Vorteile der Simulationstechnik .....	71
5.1.2	Vorteile von Funktionsmusterbau und Meßtechnik .....	71
5.2	Meßtechnische Erfassung der Kenngrößen zur Analyse und Bewertung von Schallköpfen .....	72
5.2.1	Ansteuerung der Ultraschallwandler .....	72
5.2.2	Vermessung der erzeugten Ultraschallfelder .....	72
5.2.3	Graphische Darstellung der Meßergebnisse .....	73
5.2.3	Regeln für die Durchführung von akustischen Messungen .....	75
5.3	Verfahren zur Herstellung von Versuchsmustern .....	75
5.4	Verfahren zur Simulation der Ultraschallabstrahlung (BEM und FEM) .....	77
5.4.1	Überblick der theoretischen Grundlagen der verwendeten Boundary-Element-Methode .....	78
5.4.2	Regeln für die Verwendung der Simulationsverfahren .....	79
5.4.3	Numerische Besonderheiten .....	81
5.4.4	Modalanalyse (Finite Element Methode, FEM) .....	81
5.4.5	Zusammenfassung der simulationstechnischen Aspekte .....	82

5.5	Zusammenfassung der vorgeschlagenen empirisch / heuristischen Methodik.....	82
5.5.1	Vorgehensweise für achsensymmetrische Schallkanäle.....	84
5.5.2	Vorgehensweise für nicht-achsensymmetrische Schallkanäle.....	85
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zum anwendungsspezifischen Entwurf von Schallköpfen .....</b>	<b>86</b>
6.1	Meßtechnische Ermittlung der Ausgangsparameter .....	86
6.1.1	Der mechanische Schwingungszustand des Wandlers .....	86
6.1.2	Reflexionseigenschaften von Meßobjekten für Ultraschallsignale .....	89
6.2	Regelkatalog für achsensymmetrische Schallkanal-Konstruktionen .....	91
6.2.1	Ultraschall-Wandler (Piezobauform) .....	92
6.2.2	Druckkammer .....	93
6.2.3	Blende .....	95
6.2.4	Trichter .....	97
6.2.5	Apertur .....	106
6.3	Nicht-achsensymmetrische Schallkanäle .....	108
6.3.1	Wandler .....	108
6.3.2	Druckkammer .....	109
6.3.3	Blende .....	113
6.3.4	Trichter .....	114
6.3.5	Apertur und Frontfläche .....	118
6.4	Übersicht der erfaßten Effekte.....	118
<b>7</b>	<b>Erprobung anhand von Fallbeispielen.....</b>	<b>120</b>
7.1	W-Schallkopf.....	120
7.2	F-Schallkopf .....	122
7.3	N-Schallkopf .....	124
7.4	Gruppenstrahler - Schallkopf.....	126
7.5	Vergleichende Bewertung .....	129
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>134</b>