

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Wissenschaftlich-technische Zielstellung .....</b>	<b>12</b>
<b>3 Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
3.1 Schallausbreitung in Luft .....	14
3.1.1 Modellgleichungen.....	14
3.1.1.1 Gleichung der Massenerhaltung .....	15
3.1.1.2 Gleichung der Impulserhaltung .....	15
3.1.1.3 Entropiegleichgewicht.....	17
3.1.1.4 Thermodynamische Zustandsgleichung .....	18
3.1.1.5 Vereinfachte Grundgleichungen.....	18
3.1.1.6 Vollständige Wellendifferentialgleichung zweiter Ordnung.....	19
3.1.1.7 Verlustfreie, lineare Wellendifferentialgleichung .....	20
3.1.1.8 Verlustbehaftete, lineare Schallausbreitung .....	20
3.1.2 Elementare Wellenformen .....	21
3.1.3 Energie und Leistung .....	24
3.1.4 Raum- und Klimaeinflüsse auf die Schallausbreitung .....	24
3.2 Nichtlineare Akustik.....	27
3.2.1 Ursache der Nichtlinearität .....	28
3.2.2 Unterscheidung zwischen linearer und nichtlinearer Akustik .....	31
3.2.3 Westervelt-Gleichung .....	31
3.2.4 Nichtlineare Phänomene .....	32
3.2.4.1 Progressive Verzerrungen, Stoßbildung und akustische Sättigung ..	32
3.2.4.2 Isotropisierung eines Schallstrahls .....	37
3.2.4.3 Differenztonerzeugung .....	38
3.2.4.4 Reflexion an einer Stoßfront.....	38

---

3.3 Akustischer Strahlungsdruck .....	39
3.4 Elektroakustische Schallquellen .....	42
3.4.1 Modell des Kolbenstrahlers .....	42
3.4.2 Ultraschall-Lautsprecher .....	46
3.4.2.1 Schallerzeugung mittels parametrischen Arrays .....	46
3.4.2.2 Schallerzeugung mittels modulierten Strahlungsdrucks .....	53
3.4.2.3 Nicht-parametrisch erzeugter Hörschall .....	54
3.4.2.4 Summe der an der Schallerzeugung beteiligten Effekte .....	55
3.5 Audible Wahrnehmung durch den Menschen .....	56
3.5.1 Anatomie und Funktion des menschlichen Gehörs .....	56
3.5.2 Hörschall .....	59
3.5.3 Sprachverständlichkeit .....	60
3.5.4 Ultraschall hören .....	63
3.5.5 Hochenergetischer Schall .....	64
3.6 Zusammenfassung .....	65
<b>4 Beurteilungskriterium zur stark gerichteten Audio-Beschallung .....</b>	<b>66</b>
4.1 Audiorichtwirkung .....	66
4.2 Audiofrequenzgang und Audioschalldruck .....	68
4.3 Zusammenfassung .....	69
<b>5 Stand der Technik .....</b>	<b>70</b>
5.1 Konventionelle Hörschallquellen zur gerichteten Beschallung .....	70
5.1.1 Einzelne Hörschallquellen .....	70
5.1.1.1 Konuslautsprecher .....	70
5.1.1.2 Horn- und Druckkammerlautsprecher .....	71
5.1.1.3 Elektrostatische Flachlautsprecher .....	73
5.1.1.4 Fokussierende Lautsprecher .....	73
5.1.2 Mehrfachanordnungen und Arrays .....	73
5.1.2.1 Unterdrückung von Nebenkeulen .....	74
5.1.2.2 Fokussierende Beschallung mit Arrays .....	74
5.1.2.3 Zeitumkehrtechnik .....	75
5.1.2.4 Endfire-Arrays in der Beschallungstechnik .....	76

---

5.2 Parametrische Ultraschall-Lautsprecher.....	76
5.2.1 Ultraschallquellen .....	76
5.2.1.1 Kapazitive Ultraschallquellen.....	77
5.2.1.2 Piezoelektrische Ultraschallquellen.....	79
5.2.2 Kommerziell verfügbare Ultraschall-Lautsprecher.....	82
5.2.3 Parametrische Systeme mit Strahlsteuerung .....	82
5.3 Zusammenfassung .....	83
<b>6 Lösungsansätze .....</b>	<b>84</b>
6.1 Dimensionierung der Ultraschallquelle .....	84
6.1.1 Vor betrachtungen zu Ultraschalldruck, Trägerfrequenz und Dimensionierung	85
6.1.2 Gewährleistung einer ausreichenden Sprachverständlichkeit.....	91
6.1.3 Maßnahmen zur Linearisierung des Audiofrequenzgangs.....	92
6.1.4 Maßnahmen zur Verzerrungsreduzierung.....	93
6.1.5 Erhöhung des Wirkungsgrades des Ultraschall-Lautsprechers.....	94
6.1.6 Wahl geeigneter Ultraschallquellen .....	94
6.1.7 Wahl geeigneter Anordnungen von Ultraschallquellen .....	96
6.2 Ultraschall-Lautsprecher für feste Ziele.....	97
6.3 Ultraschall-Lautsprecher für bewegte oder mehrere Ziele .....	103
6.3.1 Hybrider Ansatz .....	104
6.3.2 Mehrkanalansatz .....	106
6.4 Gewährleistung der medizinischen Unbedenklichkeit .....	109
6.5 Anwendungen in geringen Nutzungsentfernung .....	109
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
<b>Literatur- und Quellenverzeichnis .....</b>	<b>116</b>
<b>A Anhang.....</b>	<b>122</b>
A.1 Kommerziell verfügbare Ultraschall-Lautsprecher .....	122