

# Inhaltsverzeichnis

<b>Geleitwort</b>	<b>7</b>
<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2 Status quo der raumakustischen Simulation</b>	<b>19</b>
2.1 Geometrische Verfahren . . . . .	23
2.1.1 Schallteilchenverfahren . . . . .	24
2.1.1.1 Schallquellen . . . . .	25
2.1.1.2 Begrenzungsflächen . . . . .	25
2.1.1.3 Umgebungsmedium . . . . .	27
2.1.1.4 Empfänger . . . . .	28
2.1.2 Spiegelschallquellen-Verfahren . . . . .	29
2.2 Wellentheoretisch basierte Verfahren . . . . .	32
2.2.1 Finite-Differenzen-Verfahren . . . . .	33
2.2.2 Finite-Elemente-Verfahren . . . . .	35
2.2.2.1 Variationsformulierung . . . . .	36
2.2.2.2 Darstellung in Matrixform . . . . .	41
2.2.2.3 Komplexität des Problems . . . . .	42
<b>3 Fallstudien</b>	<b>43</b>
3.1 Bezugsgrößen . . . . .	43
3.2 Gekoppelte Räume . . . . .	44
3.2.1 Simulation ohne Wandreflexionen . . . . .	45
3.2.1.1 Ergebnis der FE-Simulation . . . . .	46
3.2.1.2 Ergebnis der RAY-Simulation . . . . .	47
3.2.1.3 Bewertung der Ergebnisse . . . . .	47
3.2.2 Simulation mit Wandreflexionen . . . . .	49
3.2.2.1 Ergebnis der FE-Simulation . . . . .	49
3.2.2.2 Ergebnis der RAY-Simulation . . . . .	50
3.2.2.3 Bewertung der Ergebnisse . . . . .	50

3.2.3	Vergleich der Simulationszeiten . . . . .	52
3.3	Modenraum . . . . .	54
3.3.1	Simulationsergebnisse . . . . .	54
3.3.2	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	56
3.4	Zusammenfassung . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Effiziente Verfahren zur Schallfeldsimulation</b>	<b>59</b>
4.1	Einführung . . . . .	60
4.1.1	Matrixzerlegende direkte und iterative Löser	61
4.1.2	Modale Löser . . . . .	62
4.1.3	Sturm-Liouvillesches Problem . . . . .	64
4.2	Unterraum-Verfahren . . . . .	66
4.2.1	Galerkin-Verfahren . . . . .	66
4.2.2	Begriffsdefinitionen . . . . .	69
4.2.3	Bestimmung der Systemmatrizen . . . . .	70
4.2.4	Eigenwertlöser . . . . .	71
4.2.4.1	Orthogonale Projektionsmethode . .	72
4.2.5	Unterraumprojektion und Superposition . .	74
4.2.6	Approximationsfehler durch reduzierte Basis	75
4.2.7	Approximationsfehler durch Diskretisierung .	76
4.2.8	Zusammenfassung . . . . .	78
4.3	Adaptivität . . . . .	78
4.3.1	Motivation . . . . .	78
4.3.2	Grundlagen hierarchischer Finiter Elemente .	79
4.3.3	Fehlerschätzer . . . . .	81
4.3.3.1	Iterationsfehler . . . . .	82
4.3.3.2	Diskretisierungsfehler . . . . .	83
4.3.4	Gitterverfeinerung . . . . .	84
4.3.5	Zusammenfassung . . . . .	85
4.4	Eigenwertlöser mit Multigrid-Vorkonditionierung . .	85
4.4.1	Konvergenz klassischer Iterationsverfahren . .	86
4.4.1.1	Bedämpfung des Fehlers . . . . .	87
4.4.2	2-Gitterverfahren . . . . .	88
4.4.2.1	Wahl des Prolongationsoperators . .	89
4.4.2.2	Wahl des Restriktionsoperators . .	91
4.4.2.3	Fehlerübergangsoperator . . . . .	91
4.4.3	Multigrid-Verfahren . . . . .	92
4.4.3.1	Mehrgitter-Zyklen . . . . .	92
4.4.3.2	Fehlerübergangsoperator . . . . .	93
4.4.4	Bestimmung des Vorkonditionierers . . . . .	93
4.4.5	Zusammenfassung . . . . .	94

4.5	'Sparse matrix'-Algorithmen . . . . .	94
4.5.1	Optimierung auf Datenstrukturebene . . . . .	95
4.5.1.1	Bandstrukturierte Matrixspeicherung	96
4.5.1.2	Speicherung im CRS-Format . . . . .	98
4.5.1.3	Speicherung im mod. CRS-Format . . . . .	100
4.5.2	Optimierung auf algorithmischer Ebene . . . . .	101
4.5.2.1	Erzeugung von Testmatrizen . . . . .	101
4.5.2.2	Matrix-Vektor-Multiplikation . . . . .	102
4.5.2.3	Spezifische arithm. Performance . . . . .	103
4.5.2.4	CRS Matrix-Vektor-Multiplikation . . . . .	104
4.5.2.5	Elimination von Schleifeninvarianten	105
4.5.2.6	'Loop unrolling' der äußeren Schleife	106
4.5.2.7	'Data prefetch'-Optimierung . . . . .	109
4.5.2.8	Performance bei realen FE-Matrizen	115
4.5.3	Arithmetische Performance aktueller Systeme	117
4.6	Zusammenfassung . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Verifikation der Methoden</b>	<b>121</b>
5.1	Einführung . . . . .	121
5.2	Lösungsqualität uniformer Gitter . . . . .	122
5.2.1	Mittlerer quadratischer Fehler . . . . .	123
5.2.2	Maximaler Fehler . . . . .	124
5.3	Lösungsqualität adaptiver Gitter . . . . .	125
5.3.1	Rechteckraum . . . . .	126
5.3.2	Gekoppelte Räume . . . . .	128
5.3.3	Zusammenfassung . . . . .	130
5.4	Lösungsqualität reduzierter Basen . . . . .	132
5.4.1	Komplexwertige Modenpartizipation . . . . .	132
5.4.1.1	Einfluß der Dämpfung . . . . .	135
5.4.2	Einfluß red. Basen auf den Schalldruck . . . . .	140
5.4.2.1	Ergebnisse . . . . .	140
5.4.2.2	Zusammenfassung . . . . .	145
5.4.3	Einfluß red. Basen auf Übertragungsfunktionen	145
5.5	Rechenzeit bei feineren Gittern . . . . .	149
5.5.1	Testsysteme . . . . .	149
5.5.2	Benchmark-Ergebnisse . . . . .	150
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>153</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>159</b>
	<b>Literatur</b>	<b>163</b>