

# 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	Eigenwertlöscher	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	Eigenwertlöscher 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 äußereren 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>